

Auswahl und optimale Auslegung industrieller Bauteilreinigungsanlagen

Von der Fakultät Maschinenbau
der Universität Dortmund
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Mathias Wullstein
aus Sprockhövel

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Horst-Artur Crostack

Mündliche Prüfung: 12.11.2004

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung	1
2	Zielsetzung und Vorgehensweise	3
3	Stand der Technik	6
3.1	Auslegung von Bauteilreinigungsanlagen	6
3.1.1	Komplexität der Reinigungsproblematik	6
3.1.2	Auswertung der Fachliteratur	13
3.1.3	Bestehende Hilfen bei der Anlagenauswahl und -optimierung.....	15
3.2	Simulation und Optimierung	17
3.2.1	Simulationsansätze	17
3.2.2	Optimierverfahren	17
3.2.3	Evolutionäre Algorithmen.....	18
3.3	Zusammenfassende Betrachtung	25
4	Internetbasierte Lösungsdatenbank für industrielle Bauteilreinigungs- anlagen.....	26
4.1	Vorüberlegungen	26
4.1.1	Definition der Benutzergruppen.....	26
4.1.2	Nutzungsmöglichkeit des Fachinformationssystems www.bauteilreinigung.de	26
4.2	Strukturierung der einzugebenden Daten	27
4.2.1	Anforderungen an die Datenstruktur	27
4.2.2	Bewertung der Reinigungsanlagen.....	28
4.2.3	Wirtschaftlichkeit von Reinigungsanlagen	34
4.2.4	Reinigungsanlagen mit Reinigungsbeispielen	43
4.2.5	Angaben zu Anlagen	43
4.2.6	Angaben zu Beispielen gereinigter Teile	44
4.2.7	Angaben zu Reinigungsmitteln	45
4.2.8	Anbieterdaten	46
4.2.9	Zusammenfassung der Datenstruktur	47
4.3	Erstellen der Datenbank	48
4.3.1	LAMP-System.....	48
4.3.2	Die MySQL-Datenbank „bauteilreinigung“	49
4.4	Internetbasierte Dateneingabe	52
4.4.1	Anbieter-Login	52
4.4.2	Anbieter-Hauptmenü	52
4.4.3	Stammdaten-Menü	53
4.4.4	Anlagen-Menü.....	54
4.4.5	Reinigungsbeispiel-Menü.....	56
4.4.6	Reinigungsmittel-Menü.....	59

4.5	Administration der Datenbank.....	60
4.5.1	Anbieterverwaltung.....	60
4.5.2	Serienmail.....	61
4.6	Integration in das Portal www.bauteilreinigung.de.....	62
4.6.1	Neue Portalseite.....	62
4.6.2	Datenübernahme aus der alten Herstellerdatenbank	64
4.7	Durchsuchen der Datenbank.....	65
4.7.1	Standardsuche.....	65
4.7.2	Expertensuche	66
4.7.3	Darstellung der Suchergebnisse	68
4.8	Auswahlsystem für Reinigungsanlagen und -mittel.....	69
4.8.1	Integration in den bestehenden Fragebogen.....	69
4.8.2	Anlagenauswahl	70
4.8.3	Sortierung technisch gleichwertiger Anlagen	74
4.8.4	Reinigungsmittelauswahl	75
4.9	Kontaktvermittlung zum Anbieter	77
4.9.1	Vernetzte Darstellung der Daten	77
4.9.2	Automatisierte Mailanfrage beim Anbieter.....	78
5	Simulationssystem für industrielle Bauteilreinigungsanlagen	80
5.1	Konzeptentwicklung.....	80
5.1.1	Vorüberlegungen.....	80
5.1.2	Zu modellierender Anlagentyp.....	80
5.1.3	Anforderungen an das Simulationssystem	82
5.1.4	Theoretische Betrachtung einer Reinigungsstufe.....	83
5.1.5	Simulationsansatz.....	87
5.2	Modellierung von Reinigungsprozessen.....	89
5.2.1	Prozess.....	89
5.2.2	Stoffe	90
5.2.3	Flüssigkeit	90
5.2.4	Bauteilcharge.....	91
5.2.5	Station.....	93
5.2.6	Tauchreinigungsstufe	94
5.2.7	Spülstufe.....	98
5.2.8	Quelle	99
5.2.9	Senke	100
5.2.10	Aufbereitung.....	100
5.2.11	Warmlufttrocknen	103
5.2.12	Zusammenschaltung zum Prozess.....	105
5.2.13	Ausblick auf weitere Module	106

5.3	Implementierung des Simulationssystems	107
5.3.1	Simulatorobjekt	107
5.3.2	Graphische Benutzeroberfläche	111
5.3.3	Verifikation an Spülprozessen	117
5.3.4	Simulationsergebnis	121
5.3.5	Beispielhafter Simulationslauf	126
6	Optimierung mit Hilfe Evolutionärer Algorithmen	131
6.1	Vorüberlegungen	131
6.1.1	Zu optimierende Reinigungsanlage.....	131
6.1.2	Ablauf des Evolutionären Algorithmus.....	132
6.2	Integration in das Simulationssystem.....	134
6.2.1	Die Objektklasse „Prozess“	134
6.2.2	Codierung	134
6.2.3	Prozesse zufällig generieren.....	136
6.2.4	Fitnessbewertung.....	138
6.2.5	Selektion.....	140
6.2.6	Rekombination	142
6.2.7	Mutation	142
6.3	Ausgabedaten des Optimierprogramms	143
6.3.1	Bildschirmausgabe	143
6.3.2	Ausgabedatei	144
6.4	Testläufe und Ergebnisse.....	144
6.4.1	Beispielhafter Programmlauf	144
6.4.2	Bester gefundener Prozess	146
7	Zusammenfassung.....	150
8	Literaturverzeichnis.....	153

1 Einleitung und Problemstellung

Die Reinigung von Bauteilen ist in nahezu jedem Bereich der industriellen Fertigung ein wichtiger Prozessschritt. Die Vor-, Zwischen- und/oder Endreinigung beeinflusst maßgeblich die Prozesssicherheit der vorbereiteten Fertigungsschritte und die Qualität der erzeugten Produkte.

Dennoch wird sie von den Produktionsverantwortlichen oft unterschätzt und lediglich als notwendiges Übel angesehen. Das liegt zum einen daran, dass beim Reinigungsprozess auf den ersten Blick keine echte Wertschöpfung am Bauteil erkennbar ist. Zum anderen ist der Grund aber auch darin zu sehen, dass die Bauteilreinigung ein sehr weites und für den Laien schwer überschaubares Gebiet darstellt und das notwendige Expertenwissen in den meisten (vor allem kleinen und mittelständischen) Unternehmen nicht vorhanden ist. Oft ist der Anwender sich nicht einmal über die genauen Spezifikationen seines Reinigungsproblems im Klaren, beispielsweise darüber, wie sauber seine Bauteile für den nächsten Prozessschritt genau sein müssen. Das Spektrum der in der Praxis zu reinigenden Teile ist nahezu unendlich groß. Es reicht von Kleinstteilen im Sub-Millimeterbereich bis hin zu sehr großen Teilen im Flugzeug- oder Schiffsbau. Auch die konstruktive Komplexität dieser Bauteile ist höchst unterschiedlich. Außerdem stehen für jede Reinigungsaufgabe vielfältige Lösungsmöglichkeiten zur Auswahl. Das beginnt bereits bei der Wahl eines geeigneten Reinigungsverfahrens, setzt sich bei der Gestaltung der entsprechenden Reinigungsanlage fort und endet schließlich bei der Auswahl geeigneter Prozessparameter sowie gegebenenfalls geeigneter Reinigungsmittel.

Die Vielfalt der Lösungsmöglichkeiten geht vor allem seit Beginn der 90er Jahre stark in die Breite, als der Einsatz von FCKWs (Fluorchlorkohlenwasserstoffen) in der industriellen Bauteilreinigung aufgrund der hohen Umweltschädlichkeit dieser Substanzen verboten wurde. Zuvor hatte gerade die Reinigung mit FCKWs eine sehr hohe Bedeutung in der Reinigungstechnik, da es sich um ein universell einsetzbares und gut beherrschtes Verfahren handelte. Auf der Suche nach Ersatz konnte vor allem mit der Reinigung mit Chlorkohlenwasserstoffen (CKWs) und nichthalogenierten Kohlenwasserstoffen (NHKWs) sowie mit wässrigen Reinigungsmedien für fast jeden Anwendungsfall eine Lösung gefunden werden, jedoch keine ähnlich universelle wie die frühere Reinigung mit FCKWs. Parallel wurden immer neue mehr oder weniger spezialisierte Sonderverfahren entwickelt und andere bekannte Verfahren weitergeführt, so dass sich das Gebiet der industriellen Bauteilreinigung heutzutage sehr umfangreich und unübersichtlich präsentiert.

Aus den genannten Gründen haben die meisten Anwender große Probleme, zur Lösung ihrer Reinigungsaufgaben geeignete Anlagen zu finden. Sie möchten ihre Bauteile möglichst wirtschaftlich reinigen, d. h. die minimale erforderliche Bauteilreinheit zu möglichst geringen Kosten erzielen. In der Praxis wird dazu meist ein Anbieter aus der Teilereinigungsbranche kontaktiert, welcher mit seinem Fachwissen eine Lösung herbeiführen soll. Dieser ist allerdings (wenn nicht aus fachlichen, dann aus wirtschaftlichen Gründen) auf das Angebotspektrum seines Unternehmens und damit meist schon auf ein oder wenige Reinigungsverfahren beschränkt. Die Anzahl und Vielfalt der vom jeweils konsultierten Hersteller angebotenen Reinigungsanlagen ist verglichen mit dem sehr breiten Markt der Reinigungstechnik naturgemäß relativ gering, so dass die Auswahl nur aus einem eingeschränkten Lösungsraum erfolgt, wobei die dabei berücksichtigten Kriterien für den Kunden oft nicht oder nur schwer nachvollzogen werden können. So wird selten eine für den Anwender optimale Lösung erzielt. Weiterhin hat nun der Hersteller der Anlage das Problem, dass der von ihm durch die

Reinigungsanlage vorgegebene Reinigungsprozess an den konkreten Anwendungsfall angepasst werden muss, wobei oft zahlreiche Prozessparameter zu berücksichtigen sind. Dies ist selbst für Experten meist mit der Durchführung zahlreicher Vorversuche verbunden, was zum einen sehr aufwändig ist und zum anderen durch die intuitive Vorgehensweise zu nicht optimalen Ergebnissen führt.

Diese Situation ist unbefriedigend, zumal gerade in den letzten Jahren ein deutlicher Wandel auf dem Gebiet der industriellen Bauteilreinigung erkennbar ist. Steigende Qualitätsansprüche, vor allem auch in der Automobilindustrie, sowie schärfere Rahmenbedingungen hinsichtlich Arbeits- und Umweltschutz, aber auch der durch den Wettbewerb getriebene Drang zu immer höherer Produktivität und Wirtschaftlichkeit lassen die Teilereinigung stärker in das Bewusstsein des produzierenden Gewerbes rücken. Die Forschung treibt die Technologie immer weiter voran, die Zahl der Veröffentlichungen zum Thema in der Fachpresse wächst, und Ende 2003 fand mit der ersten Parts2Clean in Friedrichshafen mit großem Zuspruch eine Internationale Fachmesse für Industrielle Teilereinigung und Teiletrocknung statt.

Die beschriebene Entwicklung macht das Gebiet der Bauteilreinigung allerdings für den unerfahrenen Anwender eher noch unüberschaubarer. Eine Erhöhung der Transparenz ist hier von zentraler Bedeutung. Der Anwender benötigt Hilfestellung bei der Lösung seines Reinigungsproblems, die möglichst unabhängig von dem eingeschränkten Angebotspektrum einzelner Anbieter der Reinigungsbranche sein sollte. Er sucht stets eine aus seiner Sicht beliebige Anlage, mit der er für seine Reinigungsaufgabe das mindestens geforderte Reinigungsergebnis zu möglichst geringen Kosten erzielen kann. Hier ist eine Marktübersicht erforderlich, in der nicht nur möglichst viele erhältliche Anlagen zusammengestellt werden, sondern vor allem eine Zuordnung zu Reinigungsproblemen der Anwender ermöglicht wird. Dies kann nur rechnergestützt in Form einer über das Internet geführten Lösungsdatenbank geschehen, da nur so eine genügend hohe Zahl von Herstellern angesprochen werden kann, um den Markt zu repräsentieren. Außerdem ist erst durch einen internetbasierten Ansatz eine fortlaufende Aktualisierung der Daten möglich, und das System steht einem größtmöglichen Teil der interessierten Anwender zur Verfügung.

Ist für ein Reinigungsproblem eine geeignete Anlage gefunden, benötigt wiederum der Anbieter dieser Anlage Hilfestellung bei der Optimierung des darin ablaufenden Reinigungsprozesses im Hinblick auf die technische Lösung des Problems mit möglichst hoher Wirtschaftlichkeit. Die geforderte Bauteilreinheit soll also zu möglichst geringen Kosten erreicht werden. Um die dazu bis jetzt erforderlichen aufwändigen Vorversuche zu vermeiden, ist auch hier ein rechnerbasierter Ansatz erforderlich, und zwar mittels Simulation. Am Simulationsmodell kann dann die Optimierung automatisiert werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich daher mit einem System, welches die Erstellung einer internetbasierten Lösungsdatenbank für Bauteilreinigungsanlagen sowie eine Auswahl von Lösungen für konkrete Reinigungsprobleme ermöglicht. Weiterhin wird ein rechnerbasierter Ansatz zur Optimierung solcher Reinigungsanlagen unter technischen sowie wirtschaftlichen Gesichtspunkten entwickelt. Das Ziel dieser Arbeit sowie die zu dessen Erreichung erforderliche Vorgehensweise wird im folgenden Kapitel detaillierter beschrieben.

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, den Vorgang der Auswahl und optimalen Auslegung industrieller Bauteilreinigungsanlagen für konkrete Reinigungsprobleme rechnerunterstützt besser zu gestalten.

Am Beginn dieser Überlegungen steht der Anwender, dessen Reinigungsaufgabe darin besteht, einen vorgegebenen Mengendurchsatz an bestimmten Bauteilen zu reinigen. Diese sind mit einer vorgegebenen Verschmutzung versehen und sollen einen geforderten Reinheitsgrad erreichen, um die Bauteile im Anschluss weiter verwenden oder verarbeiten zu können. Ein solcher Anwender ist meist unerfahren auf dem komplexen Gebiet der Bauteilreinigung und hat auch wenig Zeit, sich dort einzuarbeiten. Er möchte lediglich seine Bauteile zu möglichst geringen Kosten ausreichend sauber bekommen. Dazu muss er idealerweise alle am Markt erhältlichen Bauteilreinigungsanlagen hinsichtlich der Eignung für sein Reinigungsproblem bewerten. Dies ist bis dato unmöglich, da es allein in Deutschland mehrere hundert Anlagenhersteller gibt. Mit jedem einzelnen davon müsste das Problem erörtert werden, und selbst dann ist die Vergleichbarkeit für den unerfahrenen Anwender schwierig.

Abhilfe soll hier eine internetbasierte Lösungsdatenbank schaffen, in der am Markt erhältliche Reinigungsanlagen strukturiert zusammengetragen werden. Zur Bewertung und Auswahl der Anlagen müssen spezielle Kriterien aufgenommen werden. Vor allem die wirtschaftlichen Eckdaten der Prozesse sind von Interesse. Diese können jedoch nicht losgelöst von Reinigungsaufgaben betrachtet werden. Beispielsweise kann eine wirtschaftlich sinnvolle Anlagengröße nur ausgewählt werden, wenn der geforderte Teiledurchsatz bekannt ist. Daher sollen beispielhaft bereits auf der Anlage gereinigte Teile betrachtet werden. Hier muss konkret beschrieben werden, wie viele Teile welcher Art und Verschmutzung wie sauber gereinigt wurden. Durch Bilanzieren aller dabei angefallenen Kosten ist eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsanalyse möglich. Die Anbieter von Bauteilreinigungsanlagen sollen die Möglichkeit erhalten, ihre Produkte selber in die Lösungsdatenbank einzutragen. Dadurch wird eine große Lösungsvielfalt erzeugt, und das System passt sich selbsttätig dem sich ständig weiterentwickelnden Stand der Technik in der Bauteilreinigung an. Hierbei ist es allerdings erforderlich, eine für Anbieter wie auch für Anwender möglichst übersichtliche Struktur vorzugeben, um die Akzeptanz des Systems nicht durch eine schlechte Benutzbarkeit zu beeinträchtigen.

Um bei der Anlagenbewertung und –auswahl die technische Funktionserfüllung zu möglichst geringen Kosten zu gewährleisten, ist eine zweistufige Vorgehensweise erforderlich: Zunächst soll eine Vorauswahl aus allen Anlagen erfolgen, bei der lediglich die Erfüllung der technischen Funktion bezüglich der jeweiligen Reinigungsaufgabe zugrunde gelegt wird. Die dabei gefundenen technisch geeigneten Anlagen sollen dann anhand der Reinigungsbeispiele hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet werden.

Diejenige Anlage, deren Einsatz nach dieser Betrachtung den größten Erfolg verspricht, wird ausgewählt, und damit steht der entsprechende Anbieter als Experte für die weiteren Schritte zur Verfügung. Die Anlage muss nämlich nun an den konkreten Anwendungsfall angepasst werden, da trotz der Vielfalt der internetbasiert gesammelten Lösungen die Wahrscheinlichkeit, dass die genaue Reinigungsaufgabe enthalten war, sehr gering ist. Dem Anbieter sollen Hilfestellungen für die Optimierung an die Hand gegeben werden. Da die Vorgehensweise stark vom Typ der zu optimierenden Anlage abhängt, kann im Rahmen der weiteren Untersuchungen nicht das gesamte Spektrum der in der Datenbasis abgebildeten Reinigungsanlagen

erfasst werden. Daher soll für die weitere Behandlung in dieser Arbeit der Anlagentyp ausgewählt werden, der in der gesammelten Datenbasis am häufigsten vorkommt bzw. die größte Marktdurchdringung besitzt. Außerdem soll das vorgeschlagene Optimierverfahren möglichst offen und erweiterbar und damit an andere Anlagentypen anpassbar gestaltet werden.

Die rechnergestützte Optimierung der betrachteten Reinigungsanlage soll wiederum darauf abzielen, das vorgegebene Reinigungsergebnis mit möglichst geringen Kosten zu erreichen. Die rechnerische Erfassung setzt zunächst eine Modellierung des in der vorgegebenen Anlage ablaufenden Reinigungsprozesses voraus. Da die vorgegebene Anlage durch die vorherige Auswahl als technisch für die Reinigungsaufgabe geeignet qualifiziert wurde, soll nun davon ausgegangen werden, dass die erreichte Bauteilreinheit ausreichend ist, dass sie jedoch mit möglichst geringen Kosten erreicht werden soll. Daher muss nun mit Hilfe einer Simulation dieses Reinigungsergebnis zahlenmäßig erfassbar gemacht werden. Fortan dient es als Mindestkriterium. Das sich anschließende Optimierverfahren soll die Prozessparameter dergestalt festlegen, dass die Kosten möglichst gering ausfallen, während das Reinigungsergebnis mindestens dieses Mindestkriterium erfüllt. Die damit gestaltete Anlage kann als technisch und wirtschaftlich optimal zur Lösung der Reinigungsaufgabe geeignet angesehen werden.

Um die genannten Ziele zu erreichen, sind im Einzelnen folgende Arbeitsschritte vorgesehen:

Zunächst ist der Stand der Technik zu analysieren. Hierbei sind die sich aus der Zielsetzung ergebenden Themenbereiche zu betrachten. Daher soll zunächst die Auslegung von Bauteilreinigungsanlagen in der heutigen industriellen Praxis erörtert werden. Dabei sollen auch bestehende theoretische Ansätze untersucht werden. Gemäß der Zielsetzung soll im nächsten Schritt der Stand der Technik auf dem Gebiet der „Simulation und Optimierung“ aufgezeigt werden. Zum Schluss dieses Kapitels soll eine zusammenfassende Betrachtung im Hinblick auf die weitere Vorgehensweise erfolgen.

Als nächster Arbeitsschritt ist ein internetbasiertes System zur Lösungssammlung industrieller Bauteilreinigungsanlagen zu erstellen. Als Ausgangspunkt eignet sich hier voraussichtlich das am Fachgebiet Maschinenelemente der Universität Dortmund geschaffene Internetportal, welches unter der Webadresse „www.bauteilreinigung.de“ öffentlich zugänglich ist /NN04/. Es handelt sich dabei in seiner ursprünglichen, in /KLO03/ beschriebenen Form (vgl. auch Kap. 3.1.3) um ein Auswahlssystem für Reinigungsverfahren und eine Wissensbasis zum Thema Bauteilreinigung. Auch eine Herstellerdatenbank ist enthalten, in welche Anbieter der Reinigungsbranche ihre Kontaktdaten und angebotene Reinigungsverfahren eingeben können. Hier ist ein guter Ansatzpunkt gegeben, um von diesen Herstellern Daten zu konkreten Lösungen zu sammeln. Schließlich zeigen die Hersteller mit ihrer Registrierung, dass sie grundsätzlich an einer Repräsentation ihres Angebotspektrums im Internet interessiert sind.

Die bisherige rudimentäre Datensammlung ist allerdings in eine umfangreiche Lösungsdatenbank umzuwandeln. Dazu muss zunächst eine geeignete Strukturierung für die einzugebenden Daten entwickelt werden. Dabei sind neben technischen vor allem auch wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen. Dies kann nur durch die Sammlung von Beispielen gereinigter Teile erfolgen, da nur an konkreten Anwendungsfällen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sinnvoll möglich sind. An dieser Stelle ist es sehr wichtig, beste Voraussetzungen für eine breite Akzeptanz des Systems zu schaffen, indem die Komplexität so hoch gewählt wird, dass sich ein möglichst hoher Nutzen ergibt, jedoch so gering, dass eine ausreichende Benutzerfreundlichkeit sowohl für Anbieter als auch für Anwender gegeben ist. Als nächstes ist eine geeignete

Datenbank zu erstellen und die internetbasierte Dateneingabe informationstechnisch umzusetzen. Damit können die Anbieter die Datenbank mit Lösungen füllen.

Parallel soll die Programmierung der Anwenderseite durchgeführt werden. Hier ist neben einer normalen Durchsuchungsmöglichkeit der Datenbank vor allem eine automatische Auswahl von Lösungsmöglichkeiten für vorgegebene Reinigungsprobleme zu realisieren. Dabei sind technische und, so gut es geht, auch wirtschaftliche Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Letztere würden voraussetzen, dass ein oder mehrere Anbieter Beispiele gereinigter Teile in die Datenbank eingepflegt haben, die exakt mit dem Reinigungsproblem des Anwenders übereinstimmen. Dies kann im Normalfall aufgrund der Vielzahl verschiedener Reinigungsprobleme nicht gegeben sein. Im nächsten Schritt ist also eine Anpassung der ausgewählten Anlage auf das konkrete Problem des Anwenders erforderlich. Dies ist für den Anwender als Laien unmöglich. Allerdings soll nun der Hersteller als Experte die weiteren Schritte durchführen. Damit dies geschehen kann, ist eine automatische Kontaktvermittlung vorzusehen, bei der dieser Hersteller möglichst viele Informationen über das Reinigungsproblem erhält. Nun muss er die Anlage auf das konkrete Problem hin optimieren.

Bei dieser Optimierung sind heutzutage noch aufwändige Vorversuche erforderlich, um die Auswirkungen von Parametereinstellungen auf den Reinigungsprozess zu ermitteln. Die Notwendigkeit dieser Versuche soll durch Rechnerunterstützung eliminiert werden. Dazu ist im nächsten Schritt ein Simulationssystem zu erstellen, mit dessen Hilfe der in der Reinigungsanlage ablaufende Prozess rechnerisch nachgebildet werden kann. Im Rahmen der Konzeptfindung hierfür muss zunächst zur Einschränkung der Vielfalt der Anlagentypen die Beschränkung auf einen gängigen Typ erfolgen, der exemplarisch weiter betrachtet werden soll. Dieser Anlagentyp muss im Hinblick auf die sich anschließende Modellierung theoretisch betrachtet werden. Auch muss ein geeigneter Simulationsansatz gefunden werden.

In den nächsten Schritten erfolgt dann die Modellierung und die Implementierung des Simulationssystems. Die Elemente des Prozesses sollten möglichst modular miteinander kombiniert werden können, um mit weiteren Modultypen eine Übertragung auf andere Anlagentypen zu erleichtern. Es ist eine geeignete Datenstruktur zu entwickeln sowie der Simulationsalgorithmus zu entwerfen und mit einer graphischen Benutzeroberfläche zu versehen. Das Ergebnis der Simulationsrechnung soll das Reinigungsergebnis des Prozesses sowie die dabei verursachten Kosten beinhalten. Die erhaltenen Werte ändern sich bei Variation der Prozessparameter. Das bei Simulation des in der Ausgangsanlage ablaufenden Prozesses erhaltene Reinigungsergebnis soll als geforderte Mindestreinheit angesehen werden, welche auch nach der sich anschließenden Optimierung der Anlage weiterhin erreicht werden muss.

Ziel dieser Optimierung ist es, die Parameter des simulierten Reinigungsprozesses so einzustellen, dass die ermittelten Kosten möglichst gering sind, wobei jedoch die festgelegte Mindestreinheit noch zu erreichen ist. Der hierfür voraussichtlich geeignete Weg ist die Anwendung Evolutionärer Algorithmen. Demnach ist als letzter Schritt ein solcher Evolutionärer Algorithmus zu erstellen, mit dessen Hilfe die Optimierung am Simulationsmodell vorgenommen wird. Dazu ist es erforderlich, die Grundelemente, wie Codierung, Fitnessbewertung, Selektion usw. zugeschnitten auf die Problemstellung zu entwickeln. Die Funktionsfähigkeit der Optimierung soll mit Hilfe von Testläufen an einem Beispielprozess nachgewiesen werden.

Als letzter Schritt sollen die Ergebnisse der Untersuchungen und Entwicklungen zusammengefasst sowie ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben werden.

3 Stand der Technik

3.1 Auslegung von Bauteilreinigungsanlagen

3.1.1 Komplexität der Reinigungsproblematik

Der Begriff der Reinigung wird in den verschiedensten Zusammenhängen und mit unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Hier soll er im Sinne der DIN 8592 verstanden werden. Danach bedeutet Reinigen das „Entfernen unerwünschter Stoffe (Verunreinigungen) von der Oberfläche von Werkstücken bis zu einem erforderlichen, vereinbarten oder möglichen Grad (siehe auch DIN 50 902)“ /DIN03b/ /DIN94/.

Gemäß /JEL99/ „stellt die Reinigung als Vor-, Zwischen- oder Endbehandlung einen Verfahrensschritt dar, der zu den im Fertigungsablauf am häufigsten vorkommenden gehört“. Dabei wird auf folgende Reinigungsaufgaben näher eingegangen:

- Teilereinigung in der mechanischen Fertigung, z. B. vor spanabhebender Bearbeitung, Umformen, Montage, Messen oder Verpacken
- Reinigen vor einer Oberflächenbehandlung, z. B. vor dem Phosphatieren, Galvanisieren, Lackieren, Vakuumbeschichten usw.
- Reinigen vor einer Wärmebehandlung
- Reinigen zur Wartung und zur Reparatur
- Reinigen zur Sicherung der Funktion

Dies ist nur eine mögliche Klassifizierung der zahlreichen Anwendungen industrieller Bauteilreinigung. Gemäß /GRU99/ unterteilt sich der Bereich Reinigung „in die Sparte Zwischenreinigung, z. B. in der spanenden Fertigung, und Endreinigung, beispielsweise vor der Montage oder Beschichtung“. Die von der Deutschen Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e. V. in Hilden geschätzten Marktanteile belaufen sich auf 70% für die Zwischenreinigung und 30% für die Endreinigung.

Aus den vielfältigen Einsatzfällen resultiert eine große Vielfalt zu reinigender Teile, die sich konstruktiv, also hinsichtlich Größe, Geometrie mit Besonderheiten, Werkstoff usw., stark unterscheiden. In /KLO03/ werden Leitregeln zur reinigungsgerechten Bauteilgestaltung vorgestellt, deren Berücksichtigung die spätere Teilereinigung erleichtern soll. Neben der bereits angesprochenen Problematik der meist geringen Sensibilisierung des Anwenders für die Bauteilreinigung besteht hier allerdings ein weiteres großes Problem: Ein Konstrukteur hat in der Praxis neben der reinigungsgerechten Gestaltung noch zahlreiche weitere Gerechtheiten zu berücksichtigen. In der gängigen Fachliteratur zur Konstruktionsmethodik (z. B. /KUE01/, /KUE03/, /PAB97/) wird beispielsweise auf die funktionsgerechte, beanspruchungsgerechte, fertigungsgerechte, montagegerechte und auf viele weitere Gestaltungsarten eingegangen. Diese widersprechen sich zum Teil untereinander, und so bestehen auch Konflikte zu der reinigungsgerechten Gestaltung. Hier sind unter Anderem schöpfende Bauteile zu vermeiden, was aber beispielsweise bei der Konstruktion eines Behälters nicht möglich ist, da sonst die Funktion nicht gewährleistet ist. Somit treten in der industriellen Praxis immer wieder zahlreiche Problemteile auf.

Aus den vielen unterschiedlichen Einsatzfällen ergeben sich auch unterschiedliche Anforderungen an den anzustrebenden Reinheitsgrad der Teile. Vor allem aber treten die unterschiedlichsten Verschmutzungsarten auf, teilweise auch in Kombinationen. Aus der großen Menge möglicher Verunreinigungen werden in /JEL99/ die folgenden genannt:

- Schmiermittel, Gleitmittel, Ziehfette
- Kühlschmiermittel
- Schleif- und Polierpasten
- Korrosionsschutzmittel
- Feste Schmutzpartikel
- Rost, Oxide, Zunder
- Flux oder Lötpasten
- Allgemeiner Werkstattdschmutz
- Alte Beschichtungen
- Fingerabdrücke, Handschuhmuster

Oft wird anstatt „Reinigung“ auch der Begriff „Entfettung“ verwendet. Dies hebt die besondere Bedeutung der Verschmutzung durch Fette und Öle hervor, welche in der Praxis sehr häufig auftreten, vor allem in Form von bei der spanenden Bearbeitung anfallenden Kühlschmiermitteln oder auch bei Umformverfahren eingesetzten Ziehfetten. Reinigung ist hier jedoch eindeutig der Oberbegriff.

Insgesamt präsentiert sich die industrielle Bauteilreinigung als sehr weites, unübersichtliches Gebiet. Die hohe Komplexität resultiert aus den vielen zu berücksichtigenden Aspekten, welche mit folgender Gliederung kurz betrachtet werden sollen:

- Reinigungsverfahren und –mittel
- Bauteilreinigungsanlagen
- Definition und Prüfung der Bauteilreinheit
- Arbeits- und Umweltschutz

3.1.1.1 Reinigungsverfahren und -mittel

Anlagen zur industriellen Bauteilreinigung können nach den unterschiedlichsten Reinigungsverfahren arbeiten. Nach DIN 8592 /DIN03b/ ist das Fertigungsverfahren Reinigen in die Hauptgruppe 3 (Trennen) der Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 /DIN03a/ eingeordnet und in weitere Reinigungsverfahren unterteilt.

Einen vollständigeren Überblick über die verschiedenen Reinigungsverfahren gibt /KLO03/. Hier wird unter Anderem ein Ordnungsschema für 43 dem Stand der Technik entsprechende Reinigungsverfahren vorgeschlagen, und jedes Verfahren wird detailliert beschrieben. Eine Zusammenstellung zeigt **Bild 3.1**.

Nassverfahren	Strahlverfahren	Mechanische Verf.	Thermische Verf.	Sonderverfahren
Tauchreinigung	Druckluftstrahlen	Abwischen	Flammstrahlen	UV-Licht-Reinigung
Spritzreinigung	Schleuderstrahlen	Bürsten/Fegen	Ofenreinigung	Blitzlampenreinigung
Druckumfluten	Feuchtstrahlen	Schleudern	Laserstrahlreinigung	Plasmareinigung
Powerwasher	Nassdruckluftstrahlen	Ausdrücken	Wirbelbettreinigung	Biologische Reinigung
Abkochen	Schlammstrahlen	Vibrationsreinigung	Salzbadreinigung	elektrochem. Reinigung
Dampfentfetten	Druckflüssigkeitsstrahlen	Reinigungsschleifen		Reinig. m. flüssigem CO ₂
Trommelreinigung	Dampfreinigungsstrahlen	Abkratzen/Abschaben		R. m. überkritischem CO ₂
Bürstenreinigung	CO ₂ -Schnee-Strahlen	Gleitschleifen		Vakuumtölen
Wischreinigung	CO ₂ -Pellet-Strahlen	Ausklopfen		
Ultraschallreinigung		Abblasen		
		Absaugen		

Bild 3.1 Reinigungsverfahren nach /KLO03/

Die Einschätzung der Marktanteile von Reinigungsverfahren gemäß /GRU99/ ist in **Bild 3.2** dargestellt. Hier zeigt sich die große Bedeutung der Nassreinigungsverfahren, also der Verfahren, in denen flüssige Reinigungsmedien eingesetzt werden. Dies sind vor allem die Tauchreinigungsverfahren in ihren verschiedenen Varianten (z. B. Ultraschallreinigung, Druckumfluten, elektrolytische Reinigung) sowie die Spritzreinigungsverfahren. Zusammen haben diese Nassreinigungsverfahren laut Schätzungen der Deutschen Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e. V. einen Marktanteil von über 95%.

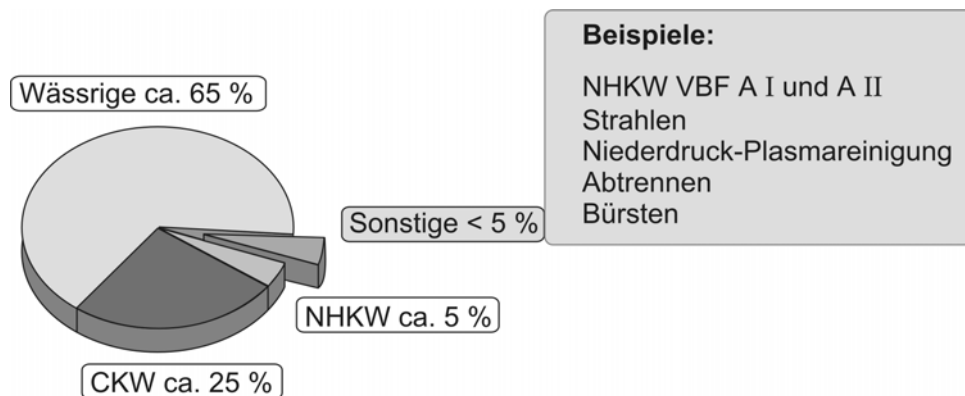


Bild 3.2 Marktanteile der Verfahren gemäß Schätzungen des DGO-FA Reinigen nach /GRU99/

Die bei den Nassreinigungsverfahren eingesetzten Reinigungsmittel haben die Aufgabe, am Bauteil anhaftende Verschmutzungen zu lösen und abzutransportieren. Es gibt unterschiedliche Arten von Reinigern. In /KLO03/ werden acht Reinigungsmitteltypen unterschieden und nach ihrer Polarität in drei Gruppen eingeteilt (s. **Bild 3.3**). Dort werden die Reinigertypen auch ausführlich beschrieben.

Wirkung	Reinigungsmitteltypen
Polar	Neutralreiniger Alkalische Reiniger Saure Reiniger
Polar/Unpolar	Sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffe Emulsionsreiniger
Unpolar	Kohlenwasserstoffe Chlorkohlenwasserstoffe Pflanzenölbasierte Reiniger

Bild 3.3 Reinigungsmitteltypen nach /KLO03/

In **Bild 3.2** ist zu erkennen, dass die größten Marktanteile bei den wässrigen Reinigern (65%), bei den Chlorkohlenwasserstoffen [CKW] (25%) sowie bei den nichthalogenierten Kohlenwasserstoffen [NHKW] (5%) liegen. Mit wässrigen Reinigern sind hier die polaren Reinigungsmittel aus **Bild 3.3** gemeint, also die sauren, die alkalischen und die Neutralreiniger. Die Kohlenwasserstoffe, vor allem die CKWs, gehören zu den unpolaren Reinigungsmitteln. Es handelt sich um organische Lösemittel, die aufgrund ihrer Polarität ein sehr gutes Fettlösevermögen besitzen („Gleiches löst Gleiches“). Die Anwendung dieser organischen Lösemittel ist gegenüber der Verwendung wässriger Reiniger in der industriellen Praxis weiter rückläufig, vor allem, da hier ein sehr hoher anlagentechnischer Aufwand im Rahmen des Arbeits- und Umweltschutzes gefordert ist (vgl. Kap. 3.1.1.4). Daher sollen im Folgenden nur die wässrigen Reiniger näher beschrieben werden; ansonsten wird auf die Fachliteratur verwiesen, z. B. /HBG96/, /HER00/, /JEL99/, /KAN01/, /KLO03/ und /LUH99/.

Ein Überblick über wässrige Reinigungsmittel findet sich beispielsweise in /DGO89/. Der Hauptbestandteil ist Wasser, welches mit verschiedenen Zusatzstoffen versetzt ist, die für die Eigenschaften der Reinigers verantwortlich sind, beispielsweise für den pH-Wert. Eine besondere Bedeutung kommt den Tensiden zu. Diese sind notwendig, da in der industriellen Praxis oft unpolare Öle und Fette in der Schmutzzusammensetzung enthalten sind, welche von polarem Wasser nicht gelöst werden können. Tenside sind langkettige Moleküle mit je einem polaren (hydrophilen) und einem unpolaren (hydrophoben) Ende. Sie lagern sich an der Grenzschicht zwischen Öl und Wasser ab und verringern dort die Grenzflächenspannung, welche einer Vergrößerung der Grenzfläche entgegenwirkt. Dadurch können sich kleine Öltröpfchen ablösen und im Wasser emulgiert werden (vgl. **Bild 3.4**).

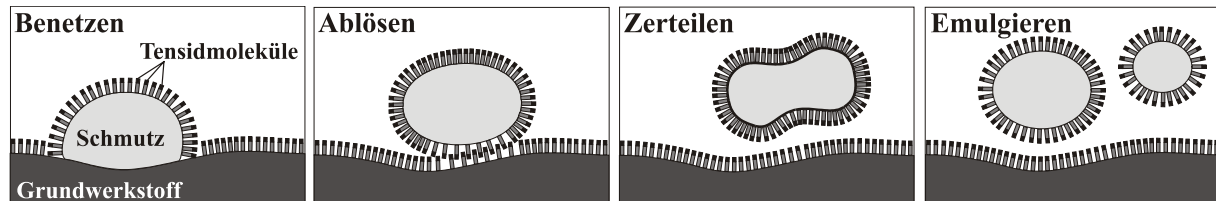


Bild 3.4 Emulgieren unpolare Verschmutzungen mit Hilfe von Tensiden /KLO03/

Insgesamt gibt es am Markt unzählige verschiedene Formulierungen von Reinigungsmitteln, die alle verschiedene Vor- und Nachteile besitzen und damit für unterschiedliche Einsatzgebiete geeignet sind.

3.1.1.2 Bauteilreinigungsanlagen

In /PAB97/ werden Anlagen als technische Gebilde bezeichnet, die der Lösung technischer Aufgaben dienen. Insgesamt werden die Begriffe „Anlage“, „Apparat“, „Maschine“, „Gerät“, „Baugruppe“, „Maschinenelement“ und „Einzelteil“ unterschieden, welche „grob nach dem Grad ihrer Komplexität geordnet“ sind. Demnach können Bauteilreinigungsanlagen als relativ komplexe technische Gebilde definiert werden, welche der industriellen Reinigung von Bauteilen dienen.

Die Komplexität hängt dabei vor Allem von dem Grad der Automatisierung und der Anzahl der Stufen des Prozessablaufes ab. Auch die Handhabung der zu reinigenden Teile ist von Bedeutung.

Zur Veranschaulichung sollen die beiden Spritzreinigungsanlagen in **Bild 3.5** oben dienen. Diese beiden Anlagen arbeiten beide nach demselben Verfahren und verwenden dabei wozumöglich sogar ähnliche Reinigungsmittel, unterscheiden sich jedoch sehr stark in Größe und Automatisierungsgrad und damit natürlich auch im konstruktiven Aufwand.

Weiterhin kann der Reinigungsprozess einstufig ausgeführt sein oder aus mehreren hintereinander geschalteten Stufen bestehen, die alle nach dem gleichen oder auch nach unterschiedlichen Reinigungsverfahren arbeiten. Vor allem bei der Tauchreinigung (oft mit Ultraschallunterstützung) werden meist mehrere Tauchbäder und ggf. Spülstufen hintereinander geschaltet. In der Mitte von **Bild 3.5** sind Beispiele für diesen gängigen Anlagentyp dargestellt.

Es gibt auch zahlreiche verschiedene Sonderanlagen, in denen beispielsweise Sonderverfahren, wie die in **Bild 3.1** genannten, ablaufen. Insgesamt ist an den vielfältigen Beispielen zu erkennen, dass das Gebiet der Reinigungsanlagen sehr vielschichtig und komplex ist, so dass bei deren Auswahl und Gestaltung ein großes Expertenwissen unumgänglich ist.




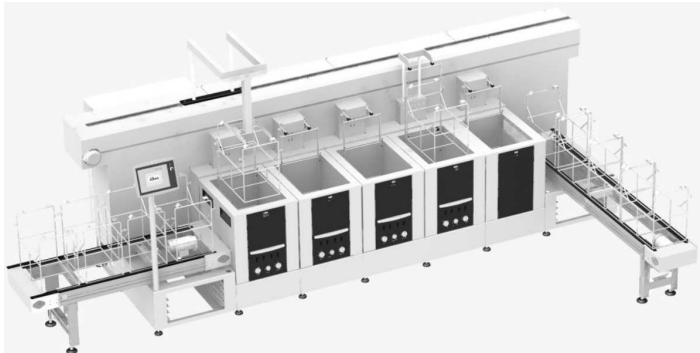

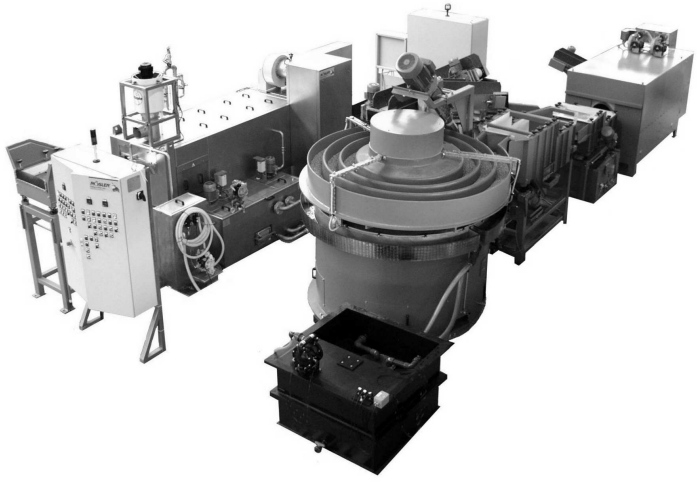
Verfahren	Größe / Automatisierungsgrad / Komplexität der Anlage	
	gering	hoch
Spritzreinigung	 <p>(Schickert GmbH & Co. KG)</p>	 <p>(Rippert Anlagentechnik GmbH & Co. KG)</p>
Tauchreinigung	 <p>(ELMA GmbH & Co. KG)</p>	 <p>(ELMA GmbH & Co. KG)</p>
Gleitschleifen	 <p>(Rösler Oberflächentechnik GmbH)</p>	 <p>(Rösler Oberflächentechnik GmbH)</p>
⋮	⋮	⋮

Bild 3.5 Beispiele für verschiedene Bauteilreinigungsanlagen /NN04/

3.1.1.3 Definition und Prüfung der Bauteilreinheit

Das Erzielen der geforderten Bauteilreinheit ist ein zentraler Aspekt bei der Auslegung von Bauteilreinigungsanlagen, da es sich hierbei um die eigentliche technische Zielgröße handelt. Dabei besteht jedoch zunächst das Problem, dass eine „Bauteilreinheit“ noch gar nicht in einer praktisch sinnvollen und gleichzeitig objektiv bewertbaren, weil quantitativ erfassbaren, Art und Weise definiert ist.

Der Reinheitsgrad eines Bauteils kann beispielsweise ermittelt werden, indem das gereinigte Teil nach einer Sichtprüfung durch denjenigen, der es weiter verwenden möchte, für „ausreichend sauber“ oder für „nicht ausreichend sauber“ erklärt wird. Dies kann in der Praxis Sinn machen, ist jedoch für eine objektive Bewertung nicht praktikabel. Neben der Sichtprüfung sind noch weitere Schnelltests üblich, wie zum Beispiel die Wasserablaufprobe. Bei dieser wird die gereinigte Oberfläche in Wasser getaucht und nach dem Herausziehen die Benetzung beurteilt. Je weniger Restöl sich auf der Oberfläche befindet, desto länger bleibt sie mit Wasser benetzt. In /KLO03/ sind zahlreiche Schnelltests zusammengestellt und hinsichtlich Aufwand, Dauer und Kosten beurteilt.

Neben den Schnelltestverfahren gibt es auch genaue Mess- und Analyseverfahren für die Bauteilreinheit, welche ebenfalls in /KLO03/ zusammengestellt sind. Nach verschiedenen Wägemethoden ist es z. B. möglich, die Verunreinigung in „ml Restöl pro Bauteil“ anzugeben, was viel besser quantitativ zu handhaben ist als die Ergebnisse der Schnelltests. Dadurch ist eine größere Objektivität gegeben. In der Praxis ergibt sich allerdings neben dem erhöhten Analyseaufwand das Problem, festzulegen, welche Restschmutzmenge überhaupt für eine gegebene Reinigungsaufgabe zu fordern ist.

Die bisher unbefriedigend gelöste Problematik der Definition und Messung der Bauteilreinheit rückt gerade in letzter Zeit immer mehr in den Mittelpunkt des Interesses der Anwender, da immer steigende Qualitätsanforderungen sinnvolle und praxisgerechte Klassifikationen von Reinheitsgraden und standardisierte Prüfverfahren erfordern. Vor allem die Automobilindustrie hat den großen Qualitätseinfluss der Bauteilreinheit erkannt und treibt die Entwicklung mit ihrem bedeutenden Einfluss voran /NN03/.

Bild 3.6 zeigt ein Analysegerät, welches das zu prüfende Bauteil in einem sehr effektiven Lösemittel-Ultraschallreinigungsprozess reinigt und den danach im Reiniger befindlichen Schmutz hinsichtlich Art und Menge analysiert. Es besteht jedoch das Problem, dass bislang keine Standards für eine solche Anlagentechnik existieren. Gemäß Vortrag eines Mitarbeiters der 2003 gegründeten Fraunhofer Allianz Reinigungstechnik auf der Parts2Clean 2003 /ERN03/ ist deshalb zur Zeit eine VDMA-Richtlinie zur Restschmutzanalyse in Vorbereitung, welche in eine ISO-Norm übergehen soll.



Bild 3.6 Anlage zur Restschmutzanalyse der Firma PMT Partikel-Messtechnik AG /NN04/

Im Hinblick auf eine gute Anwendbarkeit auch durch unerfahrene Anwender, die den bei ihrer Reinigungsaufgabe anzustrebenden Reinheitsgrad abschätzen wollen, sind in /KLO03/ vier Reinheitsklassen definiert, wobei die Zuordnung über gegebene Einsatzbeispiele erfolgt (vgl. auch Kapitel 3.1.3). Im Folgenden werden die vier Klassen mit Auszügen aus den Einsatzbeispielen aufgelistet:

- Grobreinigung (z. B. Putzen von Gusstücken oder Entrosten von Stahlkonstruktionen)
- Reinigung (z. B. als Vorbereitung für spanende Bearbeitung, Verkauf oder Lagerung)
- Feinreinigung (z. B. als Vorbereitung für Lackierung oder Klebung)
- Feinstreinigung (z. B. in der Halbleiterfertigung oder als Vorbereitung für Galvanisierung)

Diese Klassen sind zwar relativ grob eingeteilt, jedoch gerade dadurch gut geeignet, um diesen Aspekt eines Reinigungsproblems vom Anwender selbst spezifizieren zu lassen.

3.1.1.4 Arbeits- und Umweltschutz

Sowohl hinsichtlich Arbeits- als auch hinsichtlich Umweltschutz unterliegen Bauteilreinigungsanlagen wie alle industriellen Anlagen bzw. Maschinen Richtlinien, Normen und Gesetzen.

Grundlegende Sicherheitsanforderungen finden sich beispielsweise in der so genannten Maschinenrichtlinie /EG98/ sowie in DIN EN 292 bzw. deren Entwurf zur Neufassung /EN00/, welcher in die ISO-Norm 12100 überführt werden soll. Letztere ist eine so genannte Sicherheitsgrundnorm, auf der weitere Normen basieren, von denen sich einige auch direkt auf Reinigungsanlagen beziehen: DIN EN 1248 /EN02/ legt Sicherheitsanforderungen für Schleuder- und Druckluftstrahlanlagen fest, in dem Entwurf zu DIN EN 1829 /EN95/ werden sicherheitstechnische Anforderungen an Hochdruckreiniger und Hochdruckwasserstrahlmaschinen beschrieben, und der Entwurf zu DIN EN 12921 /EN97/ beschäftigt sich mit der Sicherheit von Maschinen zur Oberflächenreinigung und -vorbehandlung von industriellen Produkten mittels Flüssigkeiten oder Dampfphasen, also von Nassreinigungsanlagen.

Hinsichtlich des Umweltschutzes ist gerade bei den weit verbreiteten Nassreinigungsanlagen vor allem die Emission von umwelt- und/oder gesundheitsgefährdenden Substanzen ein wichtiger Aspekt. 1990 wurde in Deutschland die 2. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (2. BImSchV) /BIS90/ verabschiedet. Hierin wird unter anderem der Einsatz von halogenierten Kohlenwasserstoffen in Bauteilreinigungsanlagen reglementiert. Seitdem dürfen nur noch die drei Chlorkohlenwasserstoffe Trichlorethylen, Perchloroethylen und Methylenchlorid eingesetzt werden, wobei auch hier strenge Regeln gelten. Für den Einsatz nichthalogener Lösemittel in technischen Anlagen gibt es mittlerweile ebenfalls eine Gesetzgebung: 1999 wurde die EG-Richtlinie Nr. 1999/13 EG über die Begrenzung von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen /EG99/ (sog. VOC-Richtlinie) verabschiedet, welche mit der 31. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (31. BImSchV) /BIS01/ umgesetzt wird. Hier wird der Einsatz organischer Lösemittel reglementiert, die nicht unter die 2. BImSchV fallen.

Die Einhaltung all dieser Gesetze und Normen ist von jedem Anbieter industrieller Bauteilreinigungsanlagen für seine Produkte zu gewährleisten. Der Anwender setzt dies zu Recht voraus, denn er kann sich nicht mit jedem der teilweise komplexen Regelwerke auseinandersetzen.

Eine umfassende Untersuchung zum Umwelteinfluss von Bauteilreinigungsanlagen wurde Mitte der 90er Jahre an der Universität Jena in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung und der Deutschen Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e. V. durchgeführt /KRE98/. Dabei wurden drei Nassreinigungsanlagen-typen unter Voraussetzung der alternativen Anwendbarkeit zur Lösung der jeweiligen Reinigungsaufgabe (funktionelle Äquivalenz) vergleichend betrachtet, basierend auf Chlorkohlenwasserstoffen (CKW), nichthalogenierten Kohlenwasserstoffen (NHKW) und wässrigen Reinigungsmedien. Es wurde eine detaillierte Ökobilanz in Anlehnung an DIN EN ISO 14040 aufgestellt, bei der Entnahmen aus der Umwelt (Rohstoffe, Wasser, Primärenergieträger, Raum) und Abgaben an die Umwelt (Emissionen, Abwärme, Einleitungen) ganzheitlich betrachtet wurden, d. h. über den gesamten Lebensweg der Anlage von der Herstellung über die Nutzung bis zur Verwertung/Entsorgung, wobei als Systemgrenze Deutschland gewählt wurde. Obwohl dabei sehr umfangreiche Datenerhebungen vorgenommen wurden, hat sich ergeben, dass keine generelle Aussage dahingehend gemacht werden kann, dass einer der Anlagentypen ökologisch vorteilhaft oder ungünstig ist. Vielmehr kann eine Bewertung immer nur im Zusammenhang mit der Reinigungsaufgabe erfolgen. Wichtig ist vor allem der Optimierungszustand der Anlage und der Betriebsführung sowie eine Anpassung der Anlagendimensionierung an den geforderten Teiledurchsatz.

3.1.2 Auswertung der Fachliteratur

Es gibt mittlerweile im deutsch- wie auch im englischsprachigen Raum einige Fachbücher zum Thema Bauteilreinigung. Meist werden hier jedoch eher allgemeine Grundlagen vermittelt, eventuell auch Komponenten von Anlagen beschrieben. Konkrete Anlagen- und Prozessbeschreibungen mit Beispielen gereinigter Teile finden sich nur selten. Vor allem Angaben zur Wirtschaftlichkeit von Bauteilreinigungsprozessen lassen sich kaum finden. Hinweise auf eine Möglichkeit zur Simulation und automatische Optimierung von Bauteilreinigungsprozessen fehlen gänzlich.

Beispiele für bestehende Anlagen finden sich in /MIN91/. Bei den Anwendungsfällen sollten jeweils Reinigungsverfahren mit FCKWs aufgrund des damals ausgesprochenen Verbotes ersetzt werden. Meist werden wässrige Reinigungsprozesse beschrieben. Zum damaligen Zeitpunkt lag der Schwerpunkt auf der technischen Lösung des Ersetzens der weit verbreiteten FCKWs. Daher bleiben wirtschaftliche Aspekte in diesem Buch abgesehen von der Pauschalaussage, dass große Investitionen auf die Anwender zukommen, unberücksichtigt.

B. Haase und Mitautoren beschreiben in dem Buch „Bauteilreinigung – Alternativen zum Einsatz von Halogenkohlenwasserstoffen“ /HBG96/ die Grundlagen der wässrigen Reinigung sowie der Reinigung mit Kohlenwasserstoffen in Verbindung mit Wasser. Als Vorgehensweise bei der Neuanschaffung von Reinigungsanlagen wird vorgeschlagen, das Reinigungsproblem einem oder einigen Anlagenanbietern zu beschreiben, welche mit Hilfe von Vorversuchen eine möglichst passende Anlage auswählen und auslegen. Dieses Verfahren entspricht weitgehend dem in der Problemstellung dieser Arbeit (s. Kapitel 1) beschriebenen. Die Wirtschaftlichkeit wird vor allem über Maßnahmen zur Standzeitverlängerung der Bäder berücksichtigt, nicht jedoch mit konkreten Zahlen an Einsatzbeispielen belegt.

Mit dem „Reinigen mit Kohlenwasserstoff-Lösemitteln und Wasser“ beschäftigt sich /HER00/. Neben den Grundlagen und einigen Untersuchungen zu sicherheitstechnischen Anforderungen werden auch einige Ergebnisse von Reinigungsversuchen vorgestellt, um die Einsatzmöglichkeiten verschiedener Reinigungsmittel aufzuzeigen. Auch einige Beispielanlagen werden vorgestellt, meist als Ersatz für bestehende CKW-Anlagen, wobei Angaben zur Wirtschaftlichkeit, vor allem zu den Betriebskosten, meist fehlen.

Mit der Reinigung mit Kohlenwasserstoff-Lösemitteln und Wasser beschäftigt sich auch /LUH99/. Hier wurden mit einer Versuchsanlage Reinigungsversuche durchgeführt und der Einfluss der Faktoren Badkonzentration, Rotation der Teile, Volumenstrom der Badbewegung, Badtemperatur, Wasseranteil in der Kohlenwasserstoff-Reiniger-Wasser-Dispersion, Anschließen eines Spülvorganges und Reinigungsdauer untersucht. Als signifikanter Parameter wird die Badkonzentration, also die bereits im Bad gelösten Verunreinigungen, identifiziert. Damit wird die große Bedeutung von Badpflegemaßnahmen bei der Reinigung mit Kohlenwasserstoff-Lösemitteln und Wasser hervorgehoben, wofür eine Vakuum-Destillation als geeignetes Verfahren vorgeschlagen wird. Es wird eine erforderliche Destillationsleistung errechnet, um im stationären Zustand die geforderte Bauteilreinheit zu erreichen. Damit ist eine technische Optimierung der Versuchsanlage erfolgt. Wirtschaftliche Gesichtspunkte fanden dabei allerdings keine Berücksichtigung.

Jelinek gibt in „Reinigen und Entfetten in der Metallindustrie“ /JEL99/ einen umfassenden Überblick über die Nassreinigung sowie über die Plasmareinigung. Nicht nur die Verfahren werden ausführlich beschrieben, sondern auch die erforderlichen Anlagen und einzelne Komponenten davon. Es werden einige Anwendungsbeispiele der wässrigen Reinigung beschrieben, jedoch ohne Berücksichtigung der Kosten.

Der „Practical Guide to industrial metal cleaning“ /PET97/ beschäftigt sich zunächst mit Grundlagen zu verschiedenen Reinigungsverfahren, vor allem der Nassreinigung. Auch gängige Anlagenkomponenten werden beschrieben. Weiterhin wird in einem Kapitel die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments) beschrieben, mit deren Hilfe Einflüsse von Prozessparametern identifiziert und quantifiziert werden können. Zwei Beispiele beschäftigen sich mit dem Schäumverhalten eines alkalischen Spritzreinigers und mit der Abfallminimierung bei einem sauren Reinigungsprozess an Kupferbauteilen.

Im „Handbook for Critical Cleaning“ /KAN01/ werden Verfahren zur Feinreinigung von Bauteilen beschrieben, vor allem Nassreinigungsverfahren, aber auch einige Sonderverfahren. Es wird sowohl auf lösemittelbasierte als auch auf wässrige Reinigung eingegangen. Neben einer ausführlichen Beschreibung der Grundlagen werden auch einige wenige Anwendungsbeispiele vorgestellt, wobei jedoch nur in einem Fall bei einer Dampfentfettung auch auf konkrete Reinigungskosten eingegangen wird.

Die komplexe Thematik der industriellen Bauteilreinigung wird auch in einigen Fachzeitschriftenartikeln aufgegriffen, beispielsweise in dem „JOT – Journal für Oberflächentechnik“ des Vieweg-Verlags, der „Metalloberfläche“ des Carl-Hanser-Verlags, der „Galvanotechnik“ des Eugen G. Leuze-Verlags oder auch in dem amerikanischen Online-Magazin „CleanTech-Central“ sowie der zugehörigen Printausgabe „CleanTech“. Diese Artikel beschäftigen sich meist mit Anwenderberichten zu einzelnen Anlagen bzw. gelösten Reinigungsproblemen (z. B. /BAU01/, /BFB01/, /DRE03/, /HEI97/, /HOL00/, /SCH00/, /VER99/) oder mit Grundlagenberichten und Auswahlhilfen zu Reinigungsverfahren und -mitteln (z. B. /CTC03/,

/HAT94/, /LES98/, /QUK95/, /SCH94/). Auch Neuentwicklungen und Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Bauteilreinigung werden hier vorgestellt (z. B. /KKL01/, /KWU03/, /SKH99/). Umfassende Angaben zur Wirtschaftlichkeit bei konkret gelösten Reinigungsproblemen konnten nur in /DGO92/ gefunden werden. Dort werden mit acht Fallbeispielen Aufgabenschwerpunkte der Reinigungstechnologie mit wässrigen Reinigern und mit organischen Lösemitteln herausgestellt. Dabei werden auch die Investitionskosten angegeben, und über Kostenfaktoren können die Betriebskosten abgeschätzt werden.

Im Rahmen der Literaturrecherche sollten unter anderem Parametereinflüsse auf Bauteilreinigungsprozesse identifiziert und quantifiziert werden, um eine Grundlage für die Modellierung zu erhalten. Dies erwies sich jedoch als äußerst schwierig, da kaum quantitativ spezifizierte Ergebnisse von Reinigungsversuchen dokumentiert sind. Einige Ansätze, bei denen die statistische Versuchsplanung eingesetzt wurde, sind in /IHB96/, in /LAK94/, in /LUH99/ (s. o.) sowie in /PET97/ (s. o.) beschrieben.

Für Spülprozesse existieren bereits theoretische Betrachtungen, welche in den Zeitschriftenartikeln /HAS96/, /UNR96/ und /WIN95/ dokumentiert sind. Hier wird in Äquivalenz zum Reinheitsgrad bei Reinigungsprozessen ein so genanntes Spülkriterium eingeführt, welches als Verhältnis der Schmutzkonzentration in der dem Bauteil anhaftenden Lösung vor und nach dem Spülvorgang definiert ist. Die dabei angestellten Überlegungen sollen in das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Simulationssystem mit einfließen (vgl. Kap. 5.3.3).

3.1.3 Bestehende Hilfen bei der Anlagenauswahl und -optimierung

Wie die obigen Ausführungen zeigen, ist die industrielle Bauteilreinigung ein sehr umfangreiches Gebiet. Für den potentiellen Anwender scheint die Thematik zunächst unüberschaubar, das nötige Expertenwissen ist bei ihm nicht vorhanden. Aus diesem Grund wurde am Fachgebiet Maschinenelemente der Universität Dortmund ein internetbasiertes Auswahlssystem zum Thema Bauteilreinigung geschaffen /NN04/. Die ursprüngliche Version dieses mittlerweile weiterentwickelten Systems ist in /KLO03/ beschrieben. Das internetbasierte System kann von einem breiten Anwenderkreis genutzt werden. Es wurde ein Anforderungsprofil entwickelt, auf dessen Basis vom Benutzer wichtige Informationen über seine spezifische Reinigungsaufgabe abgefragt werden, beispielsweise die Teiledimensionen, die Verschmutzungsart und -menge, die geforderte Bauteilreinheit usw. Daraufhin werden verschiedene Reinigungsverfahren und Reinigertypen aufgelistet, die für die Problemstellung in Frage kommen, und ihre Eignung in Bezug auf die einzelnen abgefragten Kriterien erläutert. In einer umfangreichen Wissensbasis sind außerdem ausführliche Informationen zu den einzelnen Verfahren hinterlegt, so dass sich der unerfahrene Anwender nach dem Grobüberblick weiter mit den für ihn geeigneten Verfahren bzw. Reinigern beschäftigen kann. Somit steht ein nützliches Hilfsmittel zur Auswahl von Bauteilreinigungsverfahren und Reinigungsmitteltypen für individuelle Reinigungsprobleme zur Verfügung.

Damit ist dem Anwender allerdings noch nicht endgültig geholfen, da er zur Lösung seines Reinigungsproblems eine konkrete Reinigungsanlage benötigt, die sein Reinigungsproblem möglichst wirtschaftlich löst. Reinigungsanlagen sind in dem System in seiner ursprünglichen Form allerdings nicht enthalten. Auch der Aspekt der Wirtschaftlichkeit wird nur in rudimentärer Form berücksichtigt, indem für die Investitionskosten von Anlagen, die nach den jeweiligen Verfahren arbeiten, Untergrenzen abgeschätzt werden. So scheidet beispielsweise bei

einem maximalen Investitionsbudget von bis zu 5.000 € die Laserstrahlreinigung aus, da solche Anlagen in der Regel erst ab 50.000 € erhältlich sind. Eine Tauchreinigung beispielsweise wird hier uneingeschränkt empfohlen, obwohl eine solche Anlage je nach Größe und Komplexität durchaus auch mehrere hunderttausend € kosten kann (vgl. Kap. 3.1.1.2). Weiterhin sind die Investitionskosten gegenüber den Betriebskosten von untergeordneter Bedeutung, da letztere die eigentlichen Reinigungskosten verkörpern und die Investitionskosten in Form von Abschreibungen dort mit eingehen. Betriebskosten lassen sich allerdings nur an Beispielen gereinigter Teile festmachen, welche ebenfalls in dem ursprünglichen Auswahlssystem nicht enthalten sind. Dies zeigt den großen Bedarf an einer Überarbeitung des Systems.

Ein weiteres internetbasiertes Auswahlssystem für Reinigungsverfahren ist der amerikanische „Solvent Alternatives Guide“, kurz SAGE /SAG04/. Hier werden jedoch deutlich weniger Verfahren abgedeckt, und die Auswahlkriterien, nach denen die Verfahren bewertet werden, sind für den Anwender nicht transparent. Auch hier fehlt jegliche Berücksichtigung von Anlagen, gereinigten Teilen sowie Reinigungskosten.

Im Rahmen eines noch in Bearbeitung befindlichen EU-Projektes soll unter dem Namen „CLEANTOOL“ /CLE04/ eine Datenbank erstellt werden, in welcher ca. 250 Bauteilreinigungsprozesse aus der Praxis gesammelt werden. Diese sollen hinsichtlich verschiedenster Kriterien aufgrund von individuellen Anforderungen ausgewählt werden können. Da sich die Datenbank noch in der Entwicklung befindet, kann an dieser Stelle keine weitere Beschreibung erfolgen. Ein definitiver Nachteil wird jedoch sein, dass sie nach ihrer Fertigstellung statisch sein wird und keine Anpassung an den sich ständig wandelnden Stand der Technik in der Bauteilreinigung erfolgen kann. Dies ist eine sehr wichtige Eigenschaft des im Rahmen dieser Arbeit zu erstellenden Datenbanksystems.

Im Hinblick auf eine automatische Optimierung von Reinigungsanlagen finden sich in der Literatur kaum theoretische Betrachtungen. So findet sich in /JEL99/ die Aussage: „Bei schwierig zu reinigenden Teilen sind unter Umständen mehrere Reinigungsbäder mit dem gleichen Reiniger oder unterschiedlichen Reinigern sowie mehrere Spülschritte erforderlich. Das jeweils optimale Verfahren hängt von der ganz spezifischen Anwendungssituation ab und kann häufig nur durch Versuche ermittelt werden.“ Damit wird die Simulation von Reinigungsprozessen quasi für unmöglich erklärt.

Dennoch wurden bereits erfolgreich Bauteilreinigungsprozesse simuliert, und zwar 1993 an der Universität Passau /CLE93/. Hier wurden CKW-freie Reinigungsanlagen mit bis zu zehn Reinigungsstufen und zwei Recyclingmodulen simuliert. Als Verschmutzungsart wurde dabei ausschließlich Öl und als Reiniger ein wässriger Neutralreiniger betrachtet. Jede Reinigungsstufe wird dabei als Black Box angesehen, d. h. es wird unabhängig vom tatsächlichen Reinigungsverfahren ein mathematisch definierter oder durch empirische Daten vorgegebener Verlauf der Schmutzablösung angenommen.

Der erfolgreiche Verlauf dieses Projektes zeigt, dass theoretische Betrachtungen an Bauteilreinigungsprozessen durchaus möglich sind. Aufgrund des schlecht zugänglichen Expertenwissens ergibt sich sogar ein starker Bedarf dafür. Ein allgemeiner theoretischer Ansatz zur Simulation von Bauteilreinigungsprozessen, welcher dann jedoch noch umfangreicher Forschung im Hinblick auf Praxistauglichkeit bedarf und daher möglichst offen gehalten werden muss, bietet zudem einen vielversprechenden Ausgangspunkt für eine automatische Optimierung der Prozesse, wie sie im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe evolutionärer Algorithmen er-

folgen soll. Diese ist ohne Modell kaum möglich. Daher beschränkt sich die Prozessoptimierung in der Praxis bis dato darauf, dass Reinigungsexperten in spezialisierten Anbieterfirmen den Prozess mit ihrem Erfahrungswissen und mit Hilfe von Versuchsreihen möglichst gut (d. h. möglichst wirtschaftlich, mit möglichst gutem Reinigungsergebnis usw.) gestalten.

3.2 Simulation und Optimierung

3.2.1 Simulationsansätze

Schuler /SCH95/ bezeichnet Simulation als „Experiment am Modell“, womit der Ausgangspunkt jeder Simulation angesprochen wird: Die Modellbildung. Ein interessierender Ausschnitt aus der Realität muss zunächst modelliert werden, um eine Grundlage für dessen Simulation am Computer zu schaffen. In */KAZ94/* wird eine allgemeine Vorgehensweise zur Modellbildung beschrieben. Demnach schafft das „Wissen über die abzubildende Realität“ die Grundlage für ein abstraktes Modell, dessen Parameter so eingestellt werden müssen („Feintuning“), dass das Modellverhalten mit dem Verhalten der Realität möglichst gut übereinstimmt. Ist dies der Fall, können an dem Modell Simulationsläufe durchgeführt und die Ergebnisse interpretiert werden.

In */BOS94/* werden vier Gruppen von Simulationsansätzen unterschieden:

- Eigenentwicklung (Programmierung des gesamten Simulationssystems in einer beliebigen Programmiersprache)
- Simulationsverfahren mit einer gängigen Programmiersprache als Modellsprache (Modellierung in einer beliebigen Programmiersprache, für die Simulationsumgebung wird eine Funktionsbibliothek verwendet)
- Simulationsverfahren in einer speziellen Programmiersprache als Modellsprache (wie vorheriger Punkt, jedoch in einer speziellen Simulationsprache, wie z. B. CSMP oder DYNAMO)
- Interaktive Modellerstellung ohne Programmieraufwand (Verwendung einer vorgefertigten Simulationssoftware)

Für das im Rahmen dieser Arbeit zu erstellende Simulationssystem für Bauteilreinigungsanlagen muss bei der Konzeptfindung (s. Kap. 5.1) aus diesen Ansatzmöglichkeiten eine Auswahl getroffen werden.

3.2.2 Optimierverfahren

Das erstellte Reinigungsanlagenmodell soll in einem weiteren Schritt automatisch optimiert werden, d. h. es sollen diejenigen Parametereinstellungen gefunden werden, mit denen das vorgegebene Reinigungsergebnis zu möglichst geringen Kosten erreicht wird.

Dazu ist ein geeignetes Optimierverfahren auszuwählen, welches gut zu dem Konzept des Simulationssystems passen soll. Dieses sieht unter anderem vor, den Simulator so zu gestalten, dass eine leichte Erweiterbarkeit und Anpassbarkeit auf unterschiedliche Reinigungsverfahren ermöglicht wird. Daher sind viele klassische Optimierverfahren nicht geeignet, denn diese benötigen gewisse Informationen über das Optimierproblem bzw. die Gütefunktion.

Viele solcher Verfahren sind unter anderem in /PAP96/ beschrieben. Ein bekanntes Beispiel ist die Suche nach dem globalen Minimum einer eindimensionalen Funktion $f(x)$, wobei die notwendige Bedingung ausgenutzt wird, dass die erste Ableitung dieser Funktion an jedem Extremum eine Nullstelle besitzt. Ohne Wissen über die Funktion, in diesem Beispiel über deren Ableitung, würde das genannte Optimierverfahren scheitern.

Die Gütefunktion der im Rahmen dieser Arbeit geforderten Optimierung ist quasi das Simulationssystem selbst, welches für beliebige Parametereinstellungen Ergebnisse hinsichtlich Reinigungsergebnis und Kosten liefert, welches aber ansonsten als Black-Box betrachtet werden soll, damit Änderungen am Modell keine Änderungen am Optimierverfahren erfordern. Aus diesem Grund eignen sich hier als Optimierverfahren besonders Evolutionäre Algorithmen, deren Stärke genau solche Black-Box-Probleme sind. Sie sollen daher im folgenden Unterkapitel näher betrachtet werden.

3.2.3 Evolutionäre Algorithmen

3.2.3.1 Grundlegende Funktionsweise

Die Grundidee der Evolutionären Algorithmen stammt schon aus den 60er Jahren. Es sollte ein höchst effektives Optimierverfahren aus der Natur genutzt werden: die Evolution. Die Natur hat unter Verwendung der drei Mechanismen Selektion, Rekombination und Mutation erstaunlich leistungsfähige „Lösungen“ gefunden, nämlich Pflanzen und Lebewesen, die sich ihrer Umgebung optimal angepasst haben und damit für ihre Lebensbedingungen optimale Lösungen entwickelt haben.

Das Anwenden dieser Mechanismen auf beliebige Probleme führt zu dem grundlegenden Ablauf eines Evolutionären Algorithmus (vgl. **Bild 3.7**):

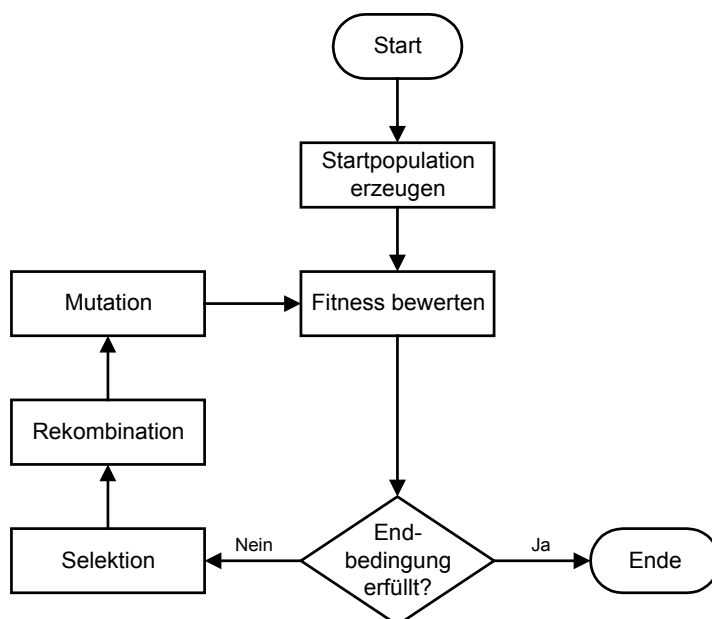


Bild 3.7 Grundsätzlicher Ablauf eines Evolutionären Algorithmus

Zunächst wird eine Anzahl möglicher Lösungen eines Problems zufällig erzeugt. Diese wird als Population bezeichnet, hier als Startpopulation. Die einzelnen Lösungen werden als Indi-

viduen bezeichnet. Dadurch, dass die Lösungsvorschläge zufällig festgelegt wurden, werden sie mit großer Wahrscheinlichkeit sehr schlecht sein. Dies wird sich bei der nun erfolgenden Fitnessbewertung in entsprechend niedrigen Fitnesswerten niederschlagen, so dass die Endbedingung sicherlich noch nicht erfüllt ist.

Deshalb beginnt nun die Evolutionsschleife, d. h., es wird eine neue Generation von Individuen aus der alten erzeugt, und zwar mit Hilfe der Mechanismen Selektion, Rekombination und Mutation. Diese drei Schritte müssen für jedes zu erzeugende Individuum einmal durchlaufen werden. Damit die Stärke der Population sich nicht von Generation zu Generation ändert, müssen genauso viele Nachkommen erzeugt werden, wie Individuen in der Startpopulation enthalten sind.

Die drei Mechanismen, mit denen ein neues Individuum erzeugt wird, funktionieren folgendermaßen: Zunächst werden bei der Selektion in der Regel zwei Individuen ausgewählt, welche als „Eltern“ für den „Nachkommen“ fungieren. Die Auswahl erfolgt abhängig von der Fitness, so dass die Auswahlwahrscheinlichkeit eines Individuums umso höher ist, je besser es sich zur Lösung des betrachteten Problems eignet. Hier spiegelt sich *Darwins* Theorie des „Überleben des Tüchtigsten“ („Survival of the fittest“) wider /DAR67/. Dabei wird ein sogenannter „Selektionsdruck“ hin zu guten Lösungen erzeugt.

Bei der Rekombination werden nun die Eltern zu einem neuen Individuum kombiniert. Der Nachkomme erhält dabei einige seiner Eigenschaften von dem einen Elter und die anderen von dem zweiten Elter. Dabei kann es natürlich vorkommen, dass ein Nachkomme genau die guten Eigenschaften beider Eltern erbt und damit eine sehr gute Lösung ist.

Zuletzt wird der Nachkomme noch mit einer sehr geringen sogenannten Mutationswahrscheinlichkeit der Mutation unterworfen. Dabei wird zufällig eine oder auch mehrere Eigenschaften um eine wiederum zufällige Schrittweite verändert, so dass unabhängig von der Elterngeneration auch völlig neuartige Nachkommen entstehen können.

Die durch Selektion, Rekombination und Mutation gebildete neue Generation wird nun wiederum einer Fitnessbewertung unterzogen, und der Zyklus beginnt von neuem, sofern nicht eine Abbruchbedingung erfüllt ist. Dies könnte zum Beispiel das Auftauchen einer hinreichend guten Lösung sein, die einen vorher festgelegten minimal geforderten Fitnesswert erreicht. Der Algorithmus könnte auch eine festgelegte Anzahl von Generationen durchlaufen oder nach einer vorgegebenen Rechenzeit abbrechen. In diesem Fall würde das Ergebnis durch die beste in der zur Verfügung stehenden Rechenzeit gefundene Lösung gebildet.

3.2.3.2 Verschiedene Arten Evolutionärer Algorithmen

Ursprünglich gab es drei Strömungen der Evolutionären Algorithmen (EA), die sich in den 60er Jahren zunächst unabhängig voneinander entwickelt haben (vgl. **Bild 3.8**):

- *Rechenberg* /REC73/ /REC94/ und *Schwefel* /SWE75/ /SWE95/ entwickelten an der Technischen Universität Berlin die Evolutionsstrategien (ES).
- *Holland* entwickelte an der University of Michigan, USA, die Genetischen Algorithmen (GA) (vgl. /POH00/).
- Die evolutionäre Programmierung (EP) geht auf *Fogel*, *Owens* und *Walsh* zurück (vgl. /POH00/).

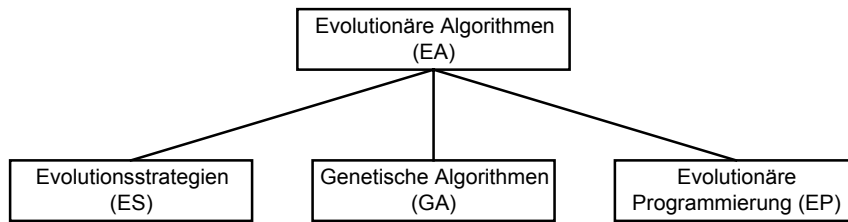


Bild 3.8 Die drei ursprünglichen Strömungen der Evolutionären Algorithmen (nach /NIS97/)

Die verschiedenen Arten der Evolutionären Algorithmen sollen in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden. Heute ist die strikte Trennung der Arten allerdings aufgehoben, und Forschungsaktivitäten sowie Seminare und Konferenzen (z. B. „evolutionary/adaptive computing conference“ an der University of Plymouth /PAR00/ oder auch VDI-Fachtagung „Computational Intelligence im industriellen Einsatz“ in Baden-Baden /VDI00/) richten sich an das Obergebiet der „Evolutionären Algorithmen“. Dabei fließen meist Ideen und Vorteile aus verschiedenen Grundverfahren in sogenannte „hybride Verfahren“ ein. Diese und weitere Begrifflichkeiten werden auch in Blatt 3 der VDI/VDE-Richtlinie 3550 /VDI03/ erläutert.

Evolutionstrategien (ES)

Die Evolutionstrategie in ihrer Reinform betrachtet reellwertige Probleme, d. h. die Individuen werden als Vektoren aus n reellen Zahlen codiert:

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad x_i \in \mathbb{R}$$

Die Koordinaten x_i sind nun die Parameter des Optimierungsproblems, womit die Evolutionstrategie also auf dem Suchraum \mathbb{R}^n arbeitet. Dazu gibt es die sogenannte Fitnessfunktion f , welche jeden Vektor auf einen reellen Fitnesswert abbildet:

$$f : \vec{x} \rightarrow f(\vec{x}), \quad f(\vec{x}) \in \mathbb{R}$$

Das Ziel der Evolutionstrategie ist die Suche nach einem Individuum \vec{x} mit maximalem Fitnesswert $f(\vec{x})$. Sollte die Fitnessfunktion so beschaffen sein, dass ein Minimum gesucht wird, lässt sich durch Transformation jederzeit ein Maximierproblem erzeugen, so dass hier die Allgemeinheit nicht eingeschränkt wird.

Die ES hält sich an das in Kapitel 3.2.3.1 beschriebene Grundmuster Evolutionärer Algorithmen. Eine Generation besteht aus μ Individuen, welche als potentielle Eltern für die Nachfolgeneration fungieren.

Es werden nun insgesamt λ Nachkommen erzeugt. Dazu werden jeweils zwei der μ Elternindividuen ausgewählt und rekombiniert. Dabei erhält der Nachkomme jede Eigenschaft (Koordinate x_i des Vektors \vec{x}) zufällig von dem einen oder von dem anderen Elternteil, so dass sich die Eigenschaften beider Eltern beim Nachkommen vermischen.

Nun wird dieser Nachkomme noch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit mutiert, indem einzelne Parameter zufällig verändert werden. Dies geschieht durch Addition einer normalver-

teilten Zufallsvariablen mit Erwartungswert 0. Die Normalverteilung hat den Vorteil, dass kleine Änderungen der jeweiligen Variablen wahrscheinlicher sind als große. Dies trägt dem natürlichen Phänomen Rechnung, dass Kinder ihren Eltern meist ähneln, starke Mutationen also eher selten sind.

Jeder erzeugte Nachkomme wird einer Fitnessbewertung unterzogen. Wenn alle λ Nachkommen erzeugt und bewertet sind, erfolgt die Selektion von μ Individuen für die nächste Generation. Dabei unterscheidet man die (μ, λ) - und die $(\mu + \lambda)$ -Strategie, auch einfach als Komma- oder Plusstrategien bezeichnet. Bei der Kommastrategie bilden die besten μ Individuen aus der Menge der λ Nachkommen die neue Elterngeneration, bei der Plusstrategie werden die Elternindividuen für die nächste Generation aus der Gesamtmenge der vorhandenen μ Eltern und λ Nachkommen ausgewählt. Die Selektion erfolgt dabei immer dergestalt, dass Individuen mit besseren Fitnesswerten mit höherer Wahrscheinlichkeit ausgewählt werden als „schlechtere“ Individuen. So wird der Selektionsdruck hin zu guten Lösungen erzeugt.

Mit den μ Individuen der neuen Generation kann die Schleife von neuem durchlaufen werden, bis eine Abbruchbedingung erfüllt wird. Dies kann zum Beispiel das Erreichen einer vorher festgelegten Rechenzeit oder Anzahl von Generationen, aber auch das Auffinden eines den Anforderungen genügenden Lösungsvektors (Fitnesswert $f(\bar{x})$ ausreichend groß) sein.

Zu betonen ist noch, dass der Mutation gegenüber der Rekombination eine wesentlich höhere Bedeutung zukommt. In den ersten Anwendungen war die Mutation sogar der einzig angewendete Variationsoperator, denn es handelte sich lediglich um eine (1+1)-Strategie. Hier gibt es also jeweils nur ein Elter, so dass eine Rekombination unmöglich ist. Der Nachkomme wird durch Mutation erzeugt, und aus diesen beiden Individuen wird dasjenige für die nächste Generation selektiert.

Genetische Algorithmen (GA)

Im Gegensatz zur Evolutionsstrategie besteht jedes Individuum bei den Genetischen Algorithmen aus einem Bitstring $\{0,1\}^n$. Zur Codierung werden dabei meist sämtliche Parameter des Optimierungsproblems binär dargestellt und die Ergebnisse aneinandergelagert.

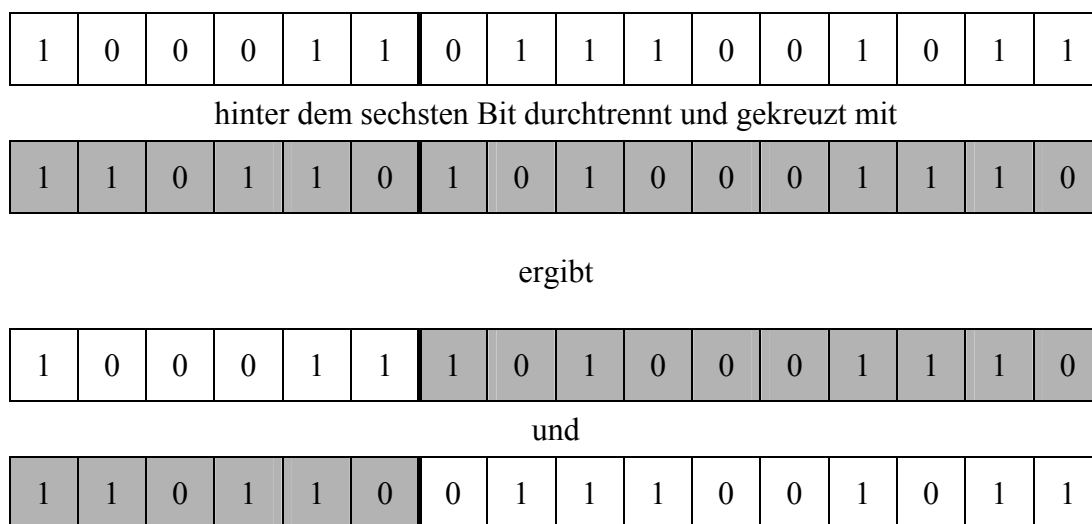
So könnten beispielsweise zwei ganzzahlige Variablen x_1 und x_2 mit dem Wertebereich $\{0 \dots 31\}$ und eine Variable x_3 mit dem Wertebereich $\{0 \dots 63\}$ in einem insgesamt 16 Bit langen String mit folgender Ausprägung codiert werden:

1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

In diesem Beispiel ist $x_1 = 17$ (10001_b), $x_2 = 23$ (10111_b) und $x_3 = 11$ (001011_b). Es ist sofort ersichtlich, dass die einzelnen Parameter hier nur diskrete Werte annehmen können, doch die Auflösung ist über die Anzahl der codierenden Bits einstellbar. So gesehen ist es möglich, an die Auflösung bei Evolutionsstrategien (rechnerinterne Genauigkeit bei Speicherung der „reellwertigen“ Parameter) heranzukommen. Der eigentliche Unterschied besteht darin, dass von hier an nur noch der gesamte Bitstring als Genom betrachtet wird und nicht mehr die einzelnen Parameter. So werden auch bei der Mutation nur einzelne Bits negiert, unabhängig davon, zu welcher Variable sie gehören. Dabei ist allerdings nicht mehr gegeben, dass kleine

Mutationen wahrscheinlicher als große sind, denn beim Flippen eines beliebigen Bits ist die Auswirkung auf die Variable abhängig von der Wertigkeit des Bits. Eine Negation des sechstletzten Bits würde in obigem Beispiel die Variable x_3 von 11 (001011_b) auf 43 (101011_b) setzen. Diese im Dezimalsystem sehr unterschiedlichen Zahlen haben eine sogenannte Hamming-Distanz (Anzahl der unterschiedlichen Bits) von 1. Eine solche Mutation, bei der eine kleine Änderung eine beliebig kleine oder auch beliebig große Auswirkung hervorruft, erscheint bei einem Optimierverfahren als nicht sehr sinnvoll. Umgangen werden kann dieses Problem durch Verwendung des sogenannten Gray-Codes anstatt einer binären Codierung der einzelnen Variablen nach dem Dualsystem: Im Dezimalsystem benachbarte Zahlen haben im Gray-Code eine Hamming-Distanz von 1 /NIS97/. Dennoch spielt der Mutationsoperator bei den Genetischen Algorithmen eher eine untergeordnete Rolle (gängige Mutationswahrscheinlichkeiten pro Bit liegen zwischen 0,01 und 0,001, neuere Untersuchungen lassen die Länge des Bitstrings mit einfließen).

Statt dessen wird viel stärkerer Wert auf die Rekombination (crossover) gelegt. Bei der einfachen Einpunktkreuzung (one-point crossover) werden beide Elternstrings an derselben zufällig gewählten Stelle durchtrennt und überkreuz wieder zusammengesetzt. Dabei entstehen zwei Nachkommen. Beispiel:



In ähnlicher Weise werden bei Mehrpunktkreuzungen (multi-point crossover) mehrere Trennstellen zufällig festgelegt und die entstandenen Segmente über Kreuz vertauscht. Bei der gleichmäßigen Kreuzung (uniform crossover) wird jedes einzelne Bit eines Nachkommens zufällig von dem einen oder von dem anderen Elter übernommen.

Bei der Rekombination werden Teile der Genome der Eltern zu neuen Genomen zusammengesetzt. *Holland* hat dazu das Schema-Theorem formuliert /NIS97/, wobei mit dem Begriff Schema spezielle Genom-Teile bezeichnet werden, die sich durch ihre Länge, ihre Position im Genom und durch eine spezielle Ausprägung einzelner Bits auszeichnen. Das Schema-Theorem besagt nun, dass sich über die Generationen gute Schemata immer stärker durchsetzen, während schlechte immer weniger auftreten. In dem Zusammenhang behauptet die Building-Block-Hypothese, dass bei der Rekombination in Genetischen Algorithmen hocheffektive Einzelbausteine (relativ kurze Schemata, die einen guten Beitrag zur Fitness leisten) zu effektiven Gesamtlösungen (Genome mit hoher Fitness) zusammengesetzt werden. Schema-Theorem und Building-Block-Hypothese sind heute allerdings umstritten, da sie voraussetzen, dass voneinander unabhängige Schemata existieren, die für sich betrachtet einen hohen Bei-

trag zur Gesamt-Fitness leisten können, was in der Praxis nicht immer gewährleistet sein muss. Dennoch beschreiben sie den Grundgedanken der Genetischen Algorithmen, dass durch Rekombination (vor allem crossover) gute Genomteile der Eltern zu sehr guten Genomen der Nachkommen zusammengesetzt werden sollen.

Evolutionäre Programmierung (EP)

Bei der Evolutionären Programmierung soll ein endlicher Automat gefunden werden, der sich möglichst gut zur Lösung eines Problems eignet und dabei möglichst kompakt ist. Deterministische endliche Automaten (DFAs oder auch finite-state machines) sind aus der Informatik bekannt. Sie werden meist als Graphen mit Knoten (Zustände) und Kanten (Zustandsänderungen) dargestellt. So erzeugen sie für definierte Eingaben definierte Ausgaben. Die Population besteht nun aus zahlreichen solchen Automaten. Zur Erzeugung neuer Individuen wird der Evolutionsmechanismus Mutation verwendet, eine Rekombination findet bei der Urform der Evolutionären Programmierung nicht statt. Somit ähnelt diese Form der Evolutionären Algorithmen sehr stark der Evolutionsstrategie, wobei die Individuen anstatt aus Vektoren reeller Zahlen aus finiten Automaten bestehen.

Genetische Programmierung (GP)

Deutlich nach der Entstehung der drei ursprünglichen Strömungen der Evolutionären Algorithmen, nämlich Ende der 80er Jahre, entwickelte *Koza* die Genetische Programmierung /NIS97/, welche wiederum starke Ähnlichkeit mit den Genetischen Algorithmen besitzt. Jedoch bestehen die Individuen hier nicht aus Bitstrings, sondern aus Computerprogrammen. Diese werden als Baumstrukturen aufgebaut, in denen die Knoten Operatoren oder Funktionsaufrufe und die Blätter Parameter oder Konstanten repräsentieren. Die Funktion $x^3 + \cos(y/2)$ könnte beispielsweise durch den in **Bild 3.9** abgebildeten Baum dargestellt werden.

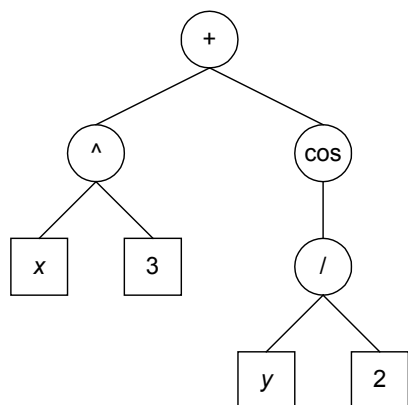


Bild 3.9 Baumstruktur der Funktion $x^3 + \cos(y/2)$

Als Variationsoperator kommt bei der Genetischen Programmierung vorwiegend die Rekombination zum Einsatz. Es werden also Teilbäume unterschiedlicher Eltern zu neuen Individuen zusammengesetzt. Im Laufe der Generationen sollen so Programme entstehen, welche die jeweilige Aufgabenstellung möglichst gut lösen können.

Hybride Verfahren

Heute geht man von der klaren Trennung der verschiedenen Algorithmusarten weg und entwickelt stattdessen meist Algorithmen, die die jeweils benötigten Vorteile der verschiedenen Arten kombinieren. Als Oberbegriff für Evolutionsstrategien, Genetische Algorithmen, Evolutionäre und Genetische Programmierung hat man sich auf Evolutionäre Algorithmen geeinigt. Diese zeichnen sich allgemein dadurch aus, dass die Evolutionsmechanismen Selektion, Rekombination und Mutation auf eine Population von unterschiedlichen möglichen Lösungen angewendet werden, um möglichst gute Lösungen zu erhalten. Dabei wird nur das Ergebnis als entscheidend angesehen, nicht jedoch die Einhaltung irgendwelcher Normen und Richtlinien bei der Gestaltung des Algorithmus. Daher spricht man auch von hybriden Verfahren, womit zum einen die Verschmelzung der verschiedenen Strömungen zu allgemeinen Evolutionären Algorithmen gemeint ist, zum anderen aber auch die Verquickung Evolutionärer Algorithmen mit anderen Verfahren. Es ist dabei erlaubt und auch ratsam, eventuell vorhandenes Wissen über eine Problemstellung in den Evolutionären Algorithmus mit einfließen zu lassen. So kann beispielsweise eine Startpopulation statt mit reinen Zufallswerten durch heuristische Verfahren erzeugt werden, deren Ergebnis schon gute Startwerte liefern, auf denen der EA dann aufbauen kann. Auch spezialisierte Rekombinations- oder Mutationsoperatoren sind denkbar, die nicht rein zufallsgesteuert agieren. In dieser Arbeit sollen Evolutionäre Algorithmen so verstanden werden, wie sie in diesem Kapitel beschrieben sind, nämlich als ergebnisorientierte Optimierverfahren, die nach dem natürlichen Vorbild der Evolution ablaufen.

3.2.3.3 Anwendungsbeispiele Evolutionärer Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen sind sehr vielseitig einsetzbare Optimierverfahren. Dementsprechend wurden sie auch schon häufig erfolgreich angewendet. Im Folgenden sind einige Anwendungsbeispiele aus der Literatur aufgeführt.

Optimierung von Modellparametern

Hierbei werden die Parameter eines Simulationsmodells gesucht, mit denen die Abweichungen zwischen Simulationsergebnissen und realen Messwerten minimal sind. In /HAF98/ wird eine Modellkalibrierung am Beispiel von Kläranlagen beschrieben. In derselben Quelle findet sich auch ein Beitrag zur Parameterschätzung in der Stahlindustrie. Dort werden die Parameter eines Modells zur Abkühlgeschwindigkeit gewalzter Stahlbänder optimiert. In /POH00/ wird die Optimierung eines Dieselmotormodells beschrieben.

Lösen kombinatorischer Probleme

Mit kombinatorischen Problemen (scheduling problems) sind hier solche gemeint, bei denen gegebene Ressourcen durch geschickte Planung optimal eingesetzt werden sollen. Ein Standardbeispiel ist die Maschinenbelegungsplanung, bei der eine vorgegebene Menge von Aufträgen auf vorhandene Fertigungseinrichtungen möglichst günstig (z. B. hinsichtlich kurzer Durchlaufzeiten) verteilt werden sollen. In /HAF98/ findet sich beispielsweise ein Bericht über einen Hersteller von 30 verschiedenen Glasbildschirmtypen, welcher für seine Produktion Muss- und Sollbedingungen festlegt. Darauf basierend wird evolutionär ein möglichst günstiger Maschinenbelegungsplan entwickelt. Auch in /STA94/ und in /CLA96/ geht es um die Optimierung von Produktionsplanungs- und Steuerungsprozessen.

Optimierung technischer Konstruktionen

Technische Konstruktionen können mit den verschiedensten Zielsetzungen optimiert werden. Dies können unter anderem geringe Herstellkosten, ein geringes Gewicht, wenig Bauraum, eine hohe erreichbare Geschwindigkeit usw. sein. In /DAM97/ wird beispielsweise die Optimierung von Druckkesseln mit möglichst geringen Herstellkosten, die Optimierung von Tellerfedern mit möglichst geringem Gewicht sowie die Optimierung hydrostatischer Axiallager mit möglichst wenig Energiebedarf bzw. Verlust beschrieben. In /MUE86/ wird eine optimierte Lichtleiterauslegung, eine optimierte Leuchtauslegung, eine optimierte Heizleiterauslegung, eine Toleranzoptimierung an Getrieben, eine Rezepturoptimierung an Porzellanmassen und eine Geräuschoptimierung an Axialventilatoren beschrieben. In /BRA98/ werden komplexe optische Systeme optimiert, also Linsen und Linsensysteme, die definierte Eigenschaften haben sollen. In /TRI97/, /UTE97/ und /PET98/ geht es um die Optimierung ebener Fachwerke, welche ein möglichst geringes Gewicht bei ausreichender Festigkeit aufweisen sollen. In /WEG99/ wird die Optimierung zylindrischer Schraubendruckfedern, ebener Viergelenkmechanismen und der Einlasskanäle bei Zylinderköpfen beschrieben. In /GAN98/ wurde eine Getriebewelle mit angrenzenden Bauteilen auf möglichst geringe Herstellkosten hin optimiert.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Evolutionäre Algorithmen zur Optimierung von Bauteilreinigungsanlagen eingesetzt werden, was ebenfalls in den Bereich der Optimierung technischer Konstruktionen eingeordnet werden kann.

3.3 Zusammenfassende Betrachtung

Die Analyse des Standes der Technik hat ergeben, dass es sich bei der industriellen Bauteilreinigung um ein vielschichtiges und für den unerfahrenen Anwender höchst unübersichtliches Themengebiet handelt. Daraus ergibt sich ein großer Bedarf an Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Reinigungsanlagen für konkrete Problemstellungen. Dazu bereits existierende Ansätze basieren auf einer Vorauswahl geeigneter Reinigungsverfahren, womit sie sich aber auf einer zu abstrakten Ebene bewegen. Vor allem die für den Anwender meist maßgebliche Wirtschaftlichkeit kann auf dieser Ebene kaum berücksichtigt werden, da umfassende Kostenbetrachtungen erst an konkreten Einsatzbeispielen von Anlagen durchgeführt werden können. Abhilfe soll hier ein internetbasiertes Datenbanksystem schaffen, in das Anbieter am Markt erhältliche Reinigungsanlagen strukturiert eintragen können. Dabei sind vor allem Wirtschaftlichkeitsdaten an Einsatzbeispielen von Interesse. Damit kann eine problemspezifische Auswahl von Anlagen erfolgen.

Die Betrachtung des Standes der Technik hat aber auch ergeben, dass auf der Anbieterseite Hilfestellung benötigt wird, und zwar bei der weiteren Optimierung einer Anlage hinsichtlich konkreter Problemstellungen. Um die hierbei erforderlichen aufwändigen Vorversuche zu eliminieren, ist ein theoretischer Ansatz erforderlich. Ein solches durchgängiges Konzept zur Simulation und anschließenden automatischen Optimierung von Reinigungsanlagen ist allerdings noch nicht untersucht. Dies soll im Rahmen dieser Arbeit geschehen.

4 Internetbasierte Lösungsdatenbank für industrielle Bauteilreinigungsanlagen

4.1 Vorüberlegungen

4.1.1 Definition der Benutzergruppen

Das zu erstellende internetbasierte Datenbanksystem soll von zwei Gruppen von Benutzern verwendet werden, welche in **Bild 4.1** dargestellt sind: Die eine Gruppe sind die **Anbieter** aus der Bauteilreinigungsbranche, welche die Datenbank mit Reinigungsanlagen aus ihrem Erfahrungsbereich füllen. Bei der anderen Gruppe handelt es sich um **Anwender**, die Lösungen für konkrete Reinigungsprobleme suchen. Damit sind die im Folgenden immer wieder verwendeten Begriffe „Anbieter“ und „Anwender“ definiert.



Bild 4.1 Die beiden Benutzergruppen des Systems

4.1.2 Nutzungsmöglichkeit des Fachinformationssystems www.bauteilreinigung.de

Um von vornherein möglichst viele Anbieter wie auch interessierte Anwender zu erreichen, bietet es sich an, das am Fachgebiet Maschinenelemente erstellte Fachinformationssystem für die industrielle Bauteilreinigung als Ausgangspunkt zu verwenden, da dieses bereits unter der Internetadresse „www.bauteilreinigung.de“ /NN04/ etabliert ist. Die ursprüngliche Form des im Rahmen dieser Arbeit stark veränderten Systems ist in /KLO03/ beschrieben.

Neben einer umfassenden Wissensbasis in Form eines HTML-Lexikons zum Thema Bauteilreinigung und einem Auswahlssystem, welches für Reinigungsprobleme geeignete Verfahren vorschlägt, enthielt das System auch eine Herstellerdatenbank. Hier konnten Anbieter ihre Kontaktdaten eingeben und Angaben darüber machen, welche Reinigungsverfahren bzw. Reinigungsmitteltypen von Ihrem Unternehmen angeboten werden. Angaben zu konkret angebotenen Reinigungsanlagen waren jedoch nicht enthalten. Dies wird im Rahmen dieser Arbeit zum Anlass genommen, die Datenbank zu erneuern, wobei die bereits gesammelten Kontaktdaten in die neue Datenbank überführt werden sollen (vgl. Kap. 4.6). Damit ist bereits ein Grundstock an Herstellern vorhanden, welche die benötigten Daten eingeben können.

Die Wissensbasis soll auch in dem neuen System erhalten bleiben. Sie kann durch Verlinkung mit den Anwenderseiten der neuen Datenbank zur Benutzerfreundlichkeit beitragen. Auch das Auswahlssystem für Reinigungsverfahren soll inhaltlich nicht verändert werden. Für die Auswahl von Reinigungsanlagen muss allerdings ein neues Werkzeug erstellt werden. Hier sollten jedoch die Kriterien der Problembeschreibung möglichst beibehalten werden, um die Zusammenführung zu einem Gesamtsystem zu erleichtern (s. Kap. 4.8.1).

4.2 Strukturierung der einzugebenden Daten

4.2.1 Anforderungen an die Datenstruktur

Das zu erstellende Datenbanksystem soll den Anwender bei der Auswahl einer Lösung für sein konkretes Reinigungsproblem unterstützen. Als Lösungen sollen dabei Reinigungsanlagen von den Anbietern selber in die Datenbank eingepflegt werden. Dazu muss zunächst eine Art „Datenblatt“ erstellt werden, in das jede Anlage nach dem gleichen Schema eingetragen wird. Im Zusammenhang mit der Datenbank, in welcher die Lösungen schließlich gespeichert werden sollen, wird hier der Begriff „Datenstruktur“ verwendet. Darin sind alle Daten zusammengefasst, die zu einem Datenbankeintrag gehören.

Mit dieser Datenstruktur müssen sowohl die Anbieter (bei der Dateneingabe) als auch die Anwender (bei der Datenabfrage) arbeiten. Daher kommt der sorgfältigen Auswahl des Komplexitätsgrades der Struktur eine besondere Bedeutung zu: Je höher die Komplexität, desto schwieriger gestaltet sich die Benutzung des gesamten Systems für beide Anwendergruppen. Eine schlechte Benutzbarkeit ist allerdings ein gravierender Nachteil, da das System nur mit einer Vielzahl eingegebener Lösungen von Nutzen sein kann. Diese hängt jedoch mit einer hohen Akzeptanz des Systems bei den Anbietern zusammen. Die Akzeptanz bei den Anbietern wiederum ist erst gegeben, wenn eine hohe Akzeptanz seitens der Anwender gewährleistet ist, da die Anbieter sich Kundenkontakte versprechen. Auch wenn nun diese Argumentation für einen eher geringen Komplexitätsgrad spricht, so ist doch eine vollständige Beschreibung der Lösungen mit allen für den Anwender erforderlichen Angaben notwendig. Im Hinblick auf die Benutzerfreundlichkeit kann also zusammenfassend festgestellt werden: Es sollen so viele Daten wie nötig und so wenige wie möglich aufgenommen werden. Die Daten, die abgefragt werden, müssen übersichtlich und eingängig strukturiert sein.

Um den Lösungsraum nicht künstlich auf einzelne Reinigungsverfahren zu beschränken und eine gute Erweiterbarkeit der Datenbank bei Änderungen des Standes der Technik in der Bauteilreinigung zu gewährleisten, sollten keine verfahrensspezifischen Angaben hinterlegt werden. Die Abfrage einer Beckengröße impliziert beispielsweise von vornherein ein Nassreinigungsverfahren, wahrscheinlich eine Tauchreinigung. Soll nun gerade eine Schleuderstrahlanlage eingegeben werden, macht diese Abfrage wiederum keinen Sinn. Statt dessen sollten flexible Eingabefelder vorgesehen werden, die auch für die Eingabe von Anlagen geeignet sind, die nach gänzlich neuen Verfahren arbeiten.

Weiterhin müssen Daten aufgenommen werden, die eine Auswahl und Bewertung der Anlage im Hinblick auf die Eignung für verschiedene Problemstellungen ermöglichen. Dabei muss zum einen der technische Aspekt des Reinigungsproblems betrachtet werden, nämlich die Frage, ob auf der jeweiligen Anlage die beschriebenen Bauteile von der angegebenen Verschmutzung grundsätzlich im geforderten Maße befreit werden können. Zum anderen ist aber vor allem auch der wirtschaftliche Aspekt von Interesse: Welche Anlage löst das Reinigungsproblem und verursacht dabei die geringsten Kosten? Dementsprechend müssen Daten sowohl für eine technische als auch für eine wirtschaftliche Bewertung aufgenommen werden. Die Bewertung der Reinigungsanlagen wird in dem folgenden Unterkapitel ausführlicher betrachtet.

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Datenstruktur noch einmal zusammengefasst:

- übersichtliche, eingängige Strukturierung der Daten
- vollständige Beschreibung der Lösungen mit allen für den Anwender relevanten Daten
- Dateneingabe flexibel und nicht auf einzelne Verfahren beschränkt, mit dem Stand der Technik erweiterbar um neue Verfahren
- so viele Daten wie nötig, so wenige wie möglich (Benutzerfreundlichkeit)
- Möglichkeit der Bewertung von Lösungen hinsichtlich verschiedener Reinigungsprobleme
- Umfassende Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit

4.2.2 Bewertung der Reinigungsanlagen

4.2.2.1 Technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225

Eine bewährte Methode zur Bewertung technischer Lösungen wird in der VDI-Richtlinie 2225 beschrieben /VDI97a/ /VDI98a/ /VDI98b/ /VDI97b/. Es handelt sich hierbei um eine Richtlinie zur Konstruktionsmethodik. Sie beschäftigt sich mit dem Technisch-wirtschaftlichen Konstruieren. Unter diesem Begriff „werden verschiedene Methoden zusammengefasst, die die Aufgabe des Konstrukteurs erleichtern sollen, nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich, d. h. kostenmäßig, hochwertige Produkte zu schaffen.“ /VDI97a/ Hier ist vor allem Blatt 3 /VDI98b/ von Interesse, da es sich mit der Technisch-wirtschaftlichen Bewertung beim Entwerfen technischer Produkte beschäftigt. Diese könnte sich als Ansatz zur Bewertung der in der Datenbank gespeicherten Reinigungsanlagen eignen. Die wichtigsten in der Richtlinie enthaltenen Punkte sollen im Folgenden näher erläutert werden, bevor dann die Möglichkeit der Anwendung auf die Bewertung von Reinigungsanlagen diskutiert wird (Kap. 4.2.2.5).

4.2.2.2 Technische Bewertung

Grundlage für die technische Bewertung gemäß Blatt 3 der VDI-Richtlinie 2225 /VDI98b/ ist eine Liste von Anforderungen an das zu konstruierende Produkt. Eine solche Anforderungsliste enthält Festforderungen, Mindestforderungen und Wünsche. Festforderungen müssen unter allen Umständen erfüllt werden. Deshalb gehen sie nicht in die Bewertung ein, denn eine Lösung, die mindestens eine Festforderung nicht erfüllt, scheidet direkt aus. Mindestforderungen sollen nach der günstigen Seite hin über- bzw. unterschritten werden. Eine Mindestforderung könnte beispielsweise sein, dass der Energieverbrauch einer Anlage weniger als 5 kW betragen soll, je weniger, desto besser. Wünsche sollen nach Möglichkeit berücksichtigt werden, liefern jedoch keine Ausschlusskriterien. Demnach kann der Erfüllungsgrad von Mindestforderungen und Wünschen zur technischen Bewertung eines Produktes dienen, sofern die Erfüllung aller Festforderungen gewährleistet ist. Die Liste der wesentlichen Bewertungskriterien sollte ca. 10 bis 15 Punkte umfassen, welche im Hinblick auf den Erfüllungsgrad positiv formuliert werden sollen (z. B. „geringe Baugröße“ statt „Baugröße“).

Die Bewertung einer Lösung hinsichtlich der einzelnen Bewertungskriterien soll dann als Punktbewertung erfolgen. Dazu wird für jedes Kriterium definiert, wann der Erfüllungsgrad als „sehr gut“, als „gut“, als „ausreichend“, als „gerade noch tragbar“ oder als „unbefriedigend“ eingestuft wird. Diesen Stufen werden gemäß **Bild 4.2** Punktwerte zugeordnet. Je nach Anwendungsfall können auch davon abweichende Punkteskalen verwendet werden.

Annäherung an die ideale Verwirklichung:	
sehr gut (ideal)	$p = 4$ Punkte
gut	$p = 3$ Punkte
ausreichend	$p = 2$ Punkte
gerade noch tragbar	$p = 1$ Punkt
unbefriedigend	$p = 0$ Punkte

Bild 4.2 Punktbewertungsskala nach /VDI98b/

Die technische Wertigkeit x einer Lösung ergibt sich nun als Summe der Punktbewertungen aller Kriterien, bezogen auf die maximal mögliche Gesamtpunktzahl:

$$x = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{n_{\text{Krit}} \cdot p_{\text{max}}} \quad (4.1)$$

x = technische Wertigkeit

p_i = Punktbewertung des i -ten Kriteriums

n_{Krit} = Gesamtanzahl der Kriterien

p_{max} = Maximale Punktbewertung je Kriterium

Bei dieser Berechnungsmethode wird vorausgesetzt, dass alle n Kriterien von gleicher Bedeutung sind. Ist dem nicht so, kann für jedes Kriterium über einen Faktor eine Gewichtung festgelegt werden, so dass sich die technische Wertigkeit folgendermaßen errechnet:

$$x_g = \frac{g_1 p_1 + g_2 p_2 + g_3 p_3 + \dots + g_n p_n}{(g_1 + g_2 + \dots + g_n) \cdot p_{\text{max}}} \quad (4.2)$$

x_g = technische Wertigkeit, gewichtet

g_i = Gewichtung des i -ten Kriteriums

Normalerweise können technische Wertigkeiten über 0,8 als „sehr gut“, bei 0,7 als „gut“ und unter 0,6 als „nicht befriedigend“ bezeichnet werden.

4.2.2.3 Wirtschaftliche Bewertung

Die wirtschaftliche Bewertung nach Blatt 3 der VDI-Richtlinie 2225 /VDI98b/ basiert auf den Herstellkosten des zu bewertenden Produktes. Analog zur technischen Wertigkeit x wird eine wirtschaftliche Wertigkeit y eingeführt, die sich an einer wirtschaftlichen Ideallösung orientiert, deren Herstellkosten als „ideal“ angenommen werden. Dazu ist zunächst eine Markuntersuchung hinsichtlich der Marktpreise konkurrierender Produkte erforderlich, in deren Rahmen der niedrigste Marktpreis eines solchen Produktes ermittelt wird. Unter Verweis auf Blatt 1 der VDI-Richtlinie 2225 /VDI97a/ werden dann die Gleichungen für die zulässigen Herstellkosten angegeben:

$$H_{\text{zul}} = \frac{P_{\text{M,min}}}{\beta} \quad (4.3)$$

H_{zul} = zulässige Herstellkosten des Produkts

$P_{\text{M,min}}$ = niedrigster ermittelter Marktpreis aller Konkurrenzprodukte

β = Zuschlagsfaktor, bei der Kalkulationsabteilung zu erfragen

Weiterhin wird empfohlen, die idealen Herstellkosten dann mit 70% der zulässigen Herstellkosten festzulegen, um dem wirtschaftlichen Fortschritt des Wettbewerbs in ausreichendem Maße voraus zu sein:

$$\boxed{H_i = 0,7 \cdot H_{zul}} \quad (4.4)$$

H_i = ideale Herstellkosten

Dementsprechend wird die wirtschaftliche Wertigkeit eines Produktes, dessen Herstellkosten H nach VDI 2225 Blatt 1 /VDI97a/ abgeschätzt wurden, folgendermaßen definiert:

$$\boxed{y = \frac{H_i}{H} = \frac{0,7 \cdot H_{zul}}{H}} \quad (4.5)$$

y = wirtschaftliche Wertigkeit

H = Herstellkosten des Produkts

Eine wirtschaftliche Wertigkeit von 0,7 kann als gut angesehen werden, da hierbei gemäß Gleichung (4.5) genau die zulässigen Herstellkosten verursacht werden. Eine höhere wirtschaftliche Wertigkeit als 0,7 ist anzustreben, eine geringere muss durch eine hohe technische Wertigkeit kompensiert werden.

4.2.2.4 Gesamtbewertung

Um die technische und die wirtschaftliche Bewertung in eine Gesamtbewertung einfließen zu lassen, wird in Blatt 3 der VDI-Richtlinie 2225 /VDI98b/ vorgeschlagen, ein Koordinatensystem aufzuzeichnen, bei dem die technische Wertigkeit von 0 bis 1 auf der Abszisse und die wirtschaftliche Wertigkeit von 0 bis 1 auf der Ordinate angetragen wird. In dieses sogenannte s -Diagramm (s steht für die „Stärke“ der Konstruktion) kann dann jede bewertete Lösung mit einem Punkt eingetragen und die Lage dieses Punktes beurteilt werden.

In Anlehnung an VDI 2225 wird in /KUE01/ ein Wertigkeitsdiagramm vorgestellt, in welchem die einzelnen Zonen eines s -Diagramms beurteilt werden. Dieses ist in **Bild 4.3** dargestellt.

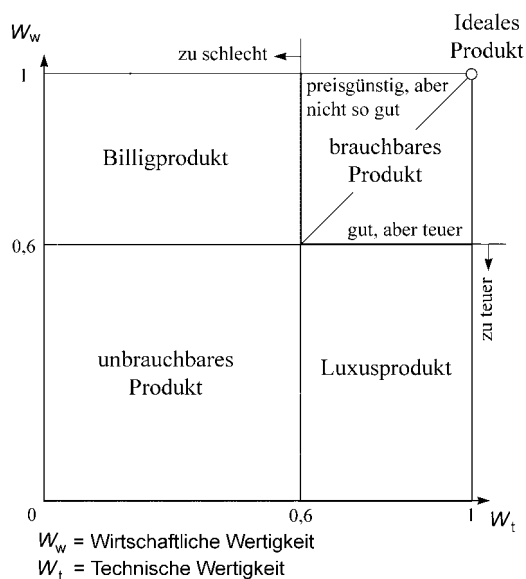


Bild 4.3 Verschiedene Zonen eines Wertigkeitsdiagramms nach /KUE01/

Der rechte obere Punkt ist der Idealpunkt, da hier die technische sowie die wirtschaftliche Wertigkeit 1,0 beträgt. Produkte innerhalb des Gebietes mit sowohl einer technischen als auch einer wirtschaftlichen Wertigkeit ab 0,6 werden als brauchbar bezeichnet, Produkte mit beiden Wertigkeiten unter 0,6 sind unbrauchbar. Eine hohe wirtschaftliche ($< 0,6$), aber eine geringe technische Wertigkeit ($< 0,6$) zeichnet Billigprodukte aus, im umgekehrten Fall handelt es sich um Luxusprodukte. Ausgewogene Lösungen liegen ungefähr auf der Diagonalen vom Ursprung zum Idealpunkt, technisch ungefähr gleichwertige Produkte liegen in etwa auf Senkrechten zu dieser Diagonalen oder auch auf Kreisbögen um den Nullpunkt /KUE02/. Mit diesem Wissen lassen sich Produkte technisch-wirtschaftlich beurteilen.

4.2.2.5 Anwendung auf die Bewertung von Reinigungsanlagen

Die Anwendung der technisch-wirtschaftlichen Bewertung nach VDI 2225 /VDI98b/ auf die in die Datenbank aufzunehmenden Reinigungsanlagen hat den Vorteil, dass hier technische und wirtschaftliche Aspekte getrennt betrachtet werden können. Im Normalfall benötigt der Anwender eine technische Lösung seines Reinigungsproblems, d. h. er fordert das Erreichen einer bestimmten Mindestreinheit. Darüber hinaus sind technische Wünsche allerdings meist irrelevant. Statt dessen ist eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit von Interesse.

Die **technische Bewertung** basiert also auf einer Anforderungsliste, die aus Festforderungen an die Reinigungsanlage besteht, nämlich der Eignung der Anlage hinsichtlich der Bewältigung der Reinigungsaufgabe mit all ihren Aspekten. In /KLO03/ wird ein Anforderungsprofil für Reinigungsanlagen vorgeschlagen, in dem diese Aspekte berücksichtigt sind. Es sind die Geometrie, der Werkstoff und gegebenenfalls die Beschichtung der Bauteile, die Art und Menge der Verschmutzung, der angestrebte Reinheitsgrad sowie die maximalen Investitionskosten und der zu bewältigende Teiledurchsatz. Die in dem Anforderungsprofil enthaltenen Kategorien sind in **Bild 4.4** dargestellt. Weiterhin wurde für jede Anforderungskategorie eine Unterteilung in Klassen vorgenommen, um eine strukturierte Aufnahme einer individuellen Reinigungsaufgabe zu ermöglichen. So ist beispielsweise die Kategorie „Bauteilgewicht“ eingeteilt in die Klassen „unter 1 g“, „1 g bis 100 g“, „100 g bis 1 kg“, „1 kg bis 10 kg“, über 10 kg“ und „Bauteil wird nicht bewegt“ /KLO03/. Insgesamt ergeben sich in den zehn in **Bild 4.4** dargestellten Kategorien 82 Klassen.

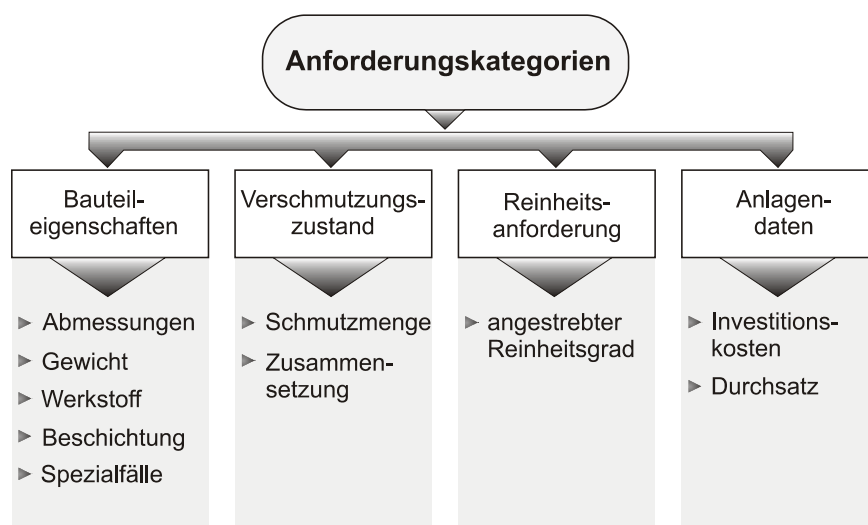


Bild 4.4 Kategorien des Anforderungsprofils für Bauteilreinigungsanlagen /KLO03/

In /KLO03/ wird als Bewertungsmethode für Reinigungsverfahren das System „+/-“ vorgeschlagen. Demnach wird bei der Beurteilung der Eignung eines Verfahrens für eine Reinigungsaufgabe in jeder Kategorie einer von drei Erfüllungsgraden vergeben: Das Kurzzeichen „+“ steht für „gut geeignet“, „0“ steht für „bedingt geeignet“ und „-“ steht für „nicht geeignet“. Eine bedingte Eignung („0“) führt nicht zum generellen Ausschluss des Verfahrens. Es müssen hier lediglich Randbedingungen beim Einsatz berücksichtigt werden. Sobald jedoch in einer Kategorie ein „-“ vergeben wird, ist das gesamte Verfahren für die Aufgabe ungeeignet. Dies entspricht dem in /KUE01/ beschriebenen „Durchschlageffekt“, welcher besagt, dass eine Lösung generell als unbrauchbar eingestuft werden soll, sobald sie bezüglich eines Kriteriums mit $p = 0$ Punkten gemäß **Bild 4.2** bewertet ist. Dies soll unabhängig von den Bewertungen in anderen Kriterien geschehen.

Das beschriebene Bewertungsverfahren soll im Rahmen dieser Arbeit auf die technische Bewertung von Bauteilreinigungsanlagen angewendet werden. Als Beispiel soll die Bewertung einer Spritzreinigungsanlage mit 800 x 800 x 800 mm großen Kammern in der Kategorie „längste Abmessung des Bauteils“ dienen: Für Bauteile "zwischen 100 und 500 mm" und darunter ist die Anlage uneingeschränkt geeignet („+“). Für Bauteile "zwischen 500 und 1000 mm" ist die Anlage nur eingeschränkt geeignet. Die Einschränkung ergibt sich hier durch die Kammergröße von 800 mm. Bauteile dieser Klasse können also nur unter der Bedingung gereinigt werden, dass die längste Abmessung 800 mm nicht übersteigt. Für Bauteile von 800 bis 1000 mm sind die Kammern zu klein. Ebenso für eine längste Abmessung „zwischen 1000 und 5000 mm“ und darüber, so dass hier ein „-“ vergeben werden muss. Auch für „Coilware“ ist die Anlage ungeeignet, da sich ihre geschlossenen Kammern nicht für eine Reinigung im Durchlaufverfahren eignen. Die sich insgesamt ergebende Bewertung der acht Klassen mit den entsprechenden Erläuterungen ist in **Bild 4.5** dargestellt.

Längste Abmessung	Eignung der Anlage	Erläuterung
unter 1 mm	+	Diese Bauteile passen problemlos in die Kammern der Reinigungsanlage.
zwischen 1 und 10 mm	+	
zwischen 10 und 100 mm	+	
zwischen 100 und 500 mm	+	
zwischen 500 und 1000 mm	0	Diese Bauteile passen nur unter der Bedingung, dass die längste Abmessung weniger als 800 mm beträgt.
zwischen 1000 und 5000 mm	-	Diese Bauteile sind definitiv zu groß für die Kammern der Reinigungsanlage.
über 5000 mm	-	
Coilware	-	Coilware wird im Durchlaufverfahren gereinigt, wofür sich geschlossene Kammern nicht eignen.

Bild 4.5 Beispielbewertung einer Reinigungsanlage hinsichtlich der längsten Bauteilabmessung

Bis auf die Investitionskosten beziehen sich alle in **Bild 4.4** dargestellten Kategorien auf technische Anforderungen und sind somit sehr gut für eine technische Bewertung von Reinigungsanlagen geeignet. Dieses technische Bewertungsverfahren ist für den Anwender sehr einfach zu handhaben, denn er kann seine Reinigungsaufgabe leicht in den in Klassen eingeteilten Kategorien beschreiben und erhält eine Bewertung nach einem transparenten Schema. Vom Anbieter muss allerdings zu jeder Anlage für jede Kategorie in jeder Klasse die Eignung abgefragt werden. Bei Nichtberücksichtigung der Investitionskosten und doppelter Berücksichtigung der Beschichtungsklassen (jeweils einmal für „Beschichtung entfernen“ und „Beschichtung nicht entfernen“) sind dies die in **Bild 4.6** dargestellten Klassen.

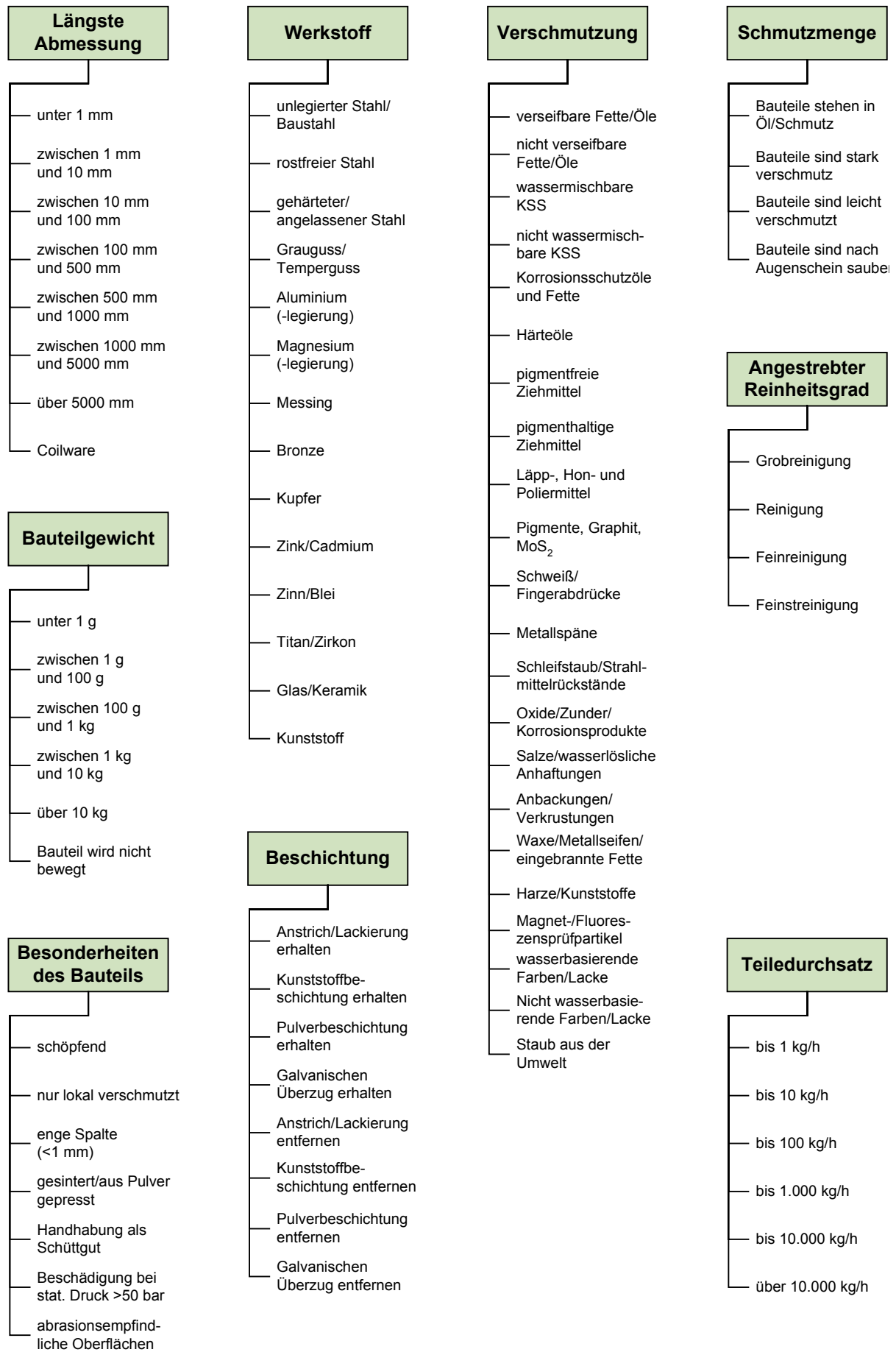


Bild 4.6 Klassen, zu denen für jede Anlage Eignungen in der Datenbank gespeichert werden müssen

Es ergeben sich pro Anlage 79 Eignungen, welche in der Datenbank gespeichert werden müssen. Dies ist relativ aufwändig, jedoch für eine sinnvolle technische Bewertung der Reinigungsanlagen unerlässlich. Daher wurden Felder für Eignungsangaben zu allen Klassen in die Datenbank aufgenommen, um eine technische Bewertung der Anlagen im Hinblick auf die Eignung für konkrete Reinigungsprobleme zu ermöglichen.

Eine **wirtschaftliche Bewertung** der Anlagen in Anlehnung an VDI 2225 /VDI98b/ (s. Kap. 4.2.2.3) würde folgendermaßen vonstatten gehen: Für jede Anlage muss der Verkaufspreis mit in der Datenbank gespeichert werden. Daraus ergibt sich eine Marktübersicht, in deren Rahmen der niedrigste Marktpreis $P_{M,\min}$ ermittelt werden kann, welcher in Gleichung (4.3) einfließt. Dabei werden nur diejenigen Anlagen betrachtet, welche nach der oben beschriebenen technischen Bewertung gut in der Lage sind, das Reinigungsproblem zu lösen. Nach Gleichung (4.3) erfolgt eine Umrechnung über den Zuschlagsfaktor β in zulässige Herstellkosten H_{zul} . Da im Zusammenhang mit der Datenbank jedoch eher der Marktpreis und damit die Investitionskosten für den Anwender von Interesse sind, soll diese Umrechnung hier nicht berücksichtigt werden. Statt dessen wird der ermittelte niedrigste Marktpreis als idealer Marktpreis $P_{M,\text{id}}$ angesetzt, so dass die wirtschaftliche Wertigkeit sich in Anlehnung an Gleichung (4.5) folgendermaßen errechnet:

$$y = \frac{P_{M,\text{id}}}{P_M} \quad (4.6)$$

y = wirtschaftliche Wertigkeit

$P_{M,\text{id}}$ = Marktpreis der gemäß Marktübersicht günstigsten Anlage

P_M = Marktpreis der bewerteten Anlage

Diese reine Betrachtung der Investitionskosten ist allerdings bei der wirtschaftlichen Bewertung von Bauteilreinigungsanlagen nicht ausreichend. Daneben spielen nämlich die bei der Reinigung der Teile anfallenden Betriebskosten eine entscheidende Rolle. Die Betriebskosten einer Anlage lassen sich allerdings ohne Betrachtung eines konkreten Anwendungsfalls gar nicht abschätzen und damit auch nicht einfach in der Datenbank zu jeder Anlage abspeichern. Zur näheren Erläuterung und zur Entwicklung einer Lösung dieses Problems wird die Wirtschaftlichkeit von Bauteilreinigungsanlagen in dem folgenden Unterkapitel näher betrachtet.

4.2.3 Wirtschaftlichkeit von Reinigungsanlagen

4.2.3.1 Definition des Begriffs „Wirtschaftlichkeit“

Um eine Auseinandersetzung mit der wirtschaftlichen Bewertung von Bauteilreinigungsanlagen zu ermöglichen, muss zunächst der Begriff „Wirtschaftlichkeit“ definiert werden. *Krems* /KRE03/ bezeichnet Wirtschaftlichkeit als „Zentralbegriff der Betriebswirtschafts- und Managementlehre“. Er definiert sie als „Aussage über das Verhältnis von Nutzen (Ausmaß der Zielerreichung) und Kosten (Ressourcenverbrauch, Opfern, Nachteilen)“:

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Kosten}} \quad (4.7)$$

In der Fachliteratur zur klassischen Betriebswirtschaftslehre (z. B. /WOE02/) wird die Wirtschaftlichkeit als numerische Kennzahl eingeführt, so dass noch auf eine einheitliche Bewertung von Zähler und Nenner in Geldeinheiten Wert gelegt wird. Dabei wird Wirtschaftlichkeit als das Verhältnis von Sollkosten zu Istkosten definiert, wobei die Sollkosten die Kosten der optimalen Lösung bedeuten. Dies entspricht der Sichtweise, wie sie bei der wirtschaftlichen Bewertung nach VDI 2225 /VDI98b/ vertreten wird und die sich in Gleichung (4.6) ausdrückt.

Letztere Gleichung berücksichtigt lediglich die Marktpreise der zu bewertenden Anlagen. Die Kosten einer (Bauteilreinigungs-) Anlage können allerdings aus zwei verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden, nämlich aus dem des Herstellers (Anbieters) und aus dem des Betreibers (Anwenders) der Anlage. Bei der Konstruktion und Entwicklung der Anlage ist zunächst die Sichtweise des Herstellers am naheliegendsten. So gibt es in der Fachliteratur zur Konstruktionsmethodik viele Hinweise zum kostenbewussten Konstruieren /EHR03/, /EKL03/, /KUE02/, /PAB97/, /VDI87/, /VDI90/, /VDI97a/, /VDI97b/, /VDI98a/, /VDI98b/. Zumeist werden hier als Kosten die Selbstkosten des Produktes betrachtet. Diese setzen sich zusammen aus Herstellkosten, Entwicklungskosten, Verwaltungs- und Vertriebskosten.

Erst in neueren Publikationen zum kostenbewussten Konstruieren /EHR03/ /EKL03/ werden die Kosten aus dem Blickwinkel des Nutzers, in diesem Fall also des Betreibers der Reinigungsanlage, gesehen. Dieser darf nicht nur den Anschaffungspreis berücksichtigen, welcher sich aus den Selbstkosten des Herstellers plus einer Gewinnmarge und eventueller Gebühren (z. B. für Verpackung und Transport) zusammensetzt, so dass eine solche Betrachtungsweise mit dem Blickwinkel des Herstellers (Selbstkosten) konform geht. Vielmehr muss der Nutzer die gesamten im Lebenszyklus des Produktes anfallenden Kosten berücksichtigen, welche gemeinhin als Life-Cycle-Costs bekannt sind. *Ehrlenspiel* bezeichnet sie als Lebenslaufkosten. Laut /EKL03/ setzen sie sich aus folgenden Kostenarten zusammen:

- Einstandskosten (Einstandspreis, ggf. abzüglich Wiederverkaufswert)
- einmalige Kosten (z. B. für Transport, Schulung, ggf. Entsorgung)
- Betriebskosten (z. B. für Betriebsstoffe und deren Entsorgung, Löhne, Energie)
- Instandhaltungskosten
- sonstige Kosten (z. B. Kapitalverzinsung, Versicherungen, Ausfallkosten)

Es werden also alle Kosten betrachtet, die beim Erwerb, beim Betrieb und bei der späteren Veräußerung bzw. Entsorgung eines Produktes anfallen. In **Bild 4.7** ist das sehr treffende Gleichnis des „Eisbergs der Lebenslaufkosten“ aus Sicht des Nutzers dargestellt. Für diesen würde es sich als fatal erweisen, lediglich den Kaufpreis als Spitze des „Kosteneisberges“ zu berücksichtigen, da während des Lebenslaufes des erworbenen Produktes noch viele andere Kosten anfallen.

Bild 4.8 zeigt die Entwicklung der anfallenden Lebenslaufkosten während des gesamten Produktlebenslaufes. Die gestrichelte Kurve zeigt, dass die Einflussmöglichkeiten auf diese Kosten zu Beginn, also in der Planungsphase, am allergrößten sind. Im späteren Verlauf entsteht zwar ein Großteil der Kosten, dieser ist jedoch kaum noch beeinflussbar. Sowohl der Anwender als auch der Anbieter muss also von Anfang an die gesamten Lebenslaufkosten einer Bauteilreinigungsanlage im Blick haben, um deren Wirtschaftlichkeit beurteilen zu können.

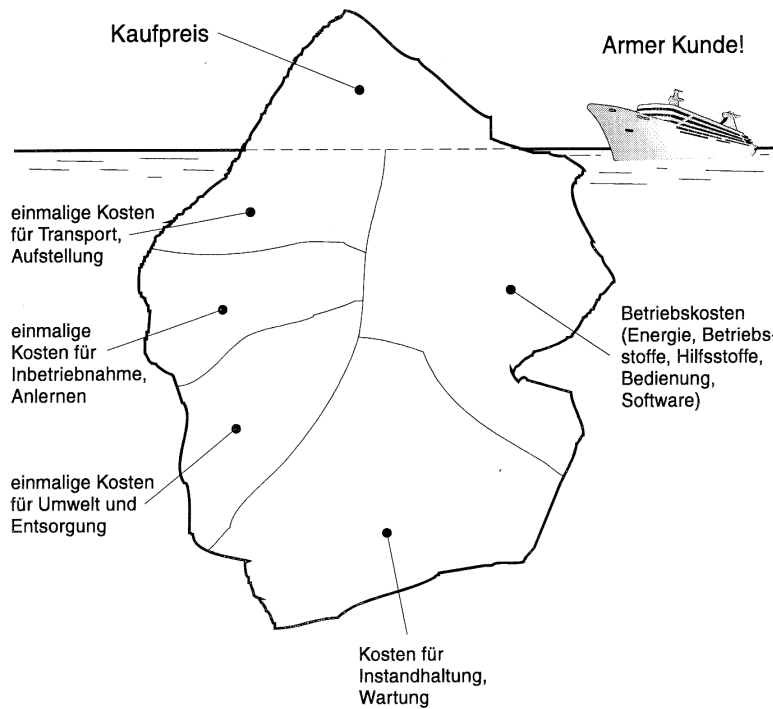


Bild 4.7 Der Eisberg der Lebenslaufkosten aus Sicht des Nutzers /EKL03/

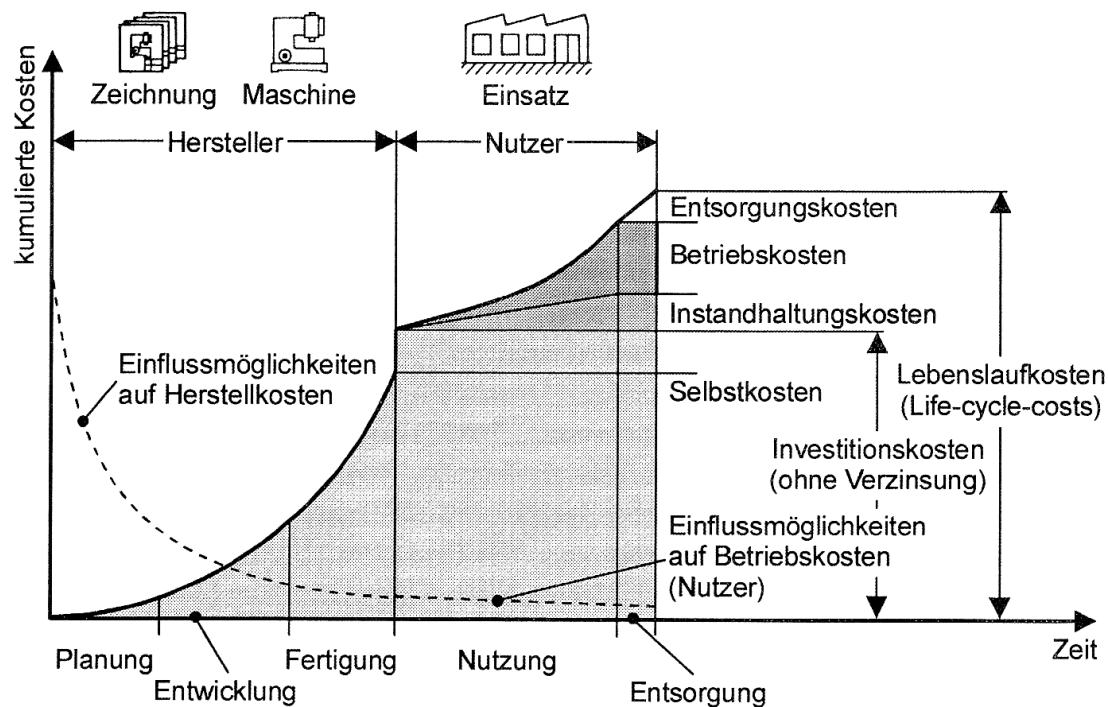


Bild 4.8 Lebenslaufkosten während der Produktlebensdauer (vereinfacht, ohne sonstige Kosten) /EKL03/

Auch *Ehrlenspiel* schreibt: „Für den Nutzer sind die Lebenslaufkosten das Kriterium, an dem er die Wirtschaftlichkeit eines Produkts messen kann. Diese streng ökonomische Sicht auf das Verhältnis von Nutzen und Kosten bei Produkten ist im Investitionsgüterbereich zunehmend wichtig.“ /EKL03/. Dementsprechend sollen die Lebenslaufkosten von Bauteilreinigungsanlagen im folgenden Unterkapitel genauer untersucht werden.

4.2.3.2 Die Lebenslaufkosten von Bauteilreinigungsanlagen

Die Lebenslaufkosten von Bauteilreinigungsanlagen werden durch ganzheitliches Bilanzieren aller im Lebenszyklus der Anlage, also vom Erwerb bis zur Veräußerung bzw. Entsorgung anfallender Kosten, ermittelt.

Bild 4.8 zeigt exemplarisch die Entwicklung der Lebenslaufkosten eines Produktes über seine Lebensdauer. Bei diesem Produkt machen die Investitionskosten über 60% der gesamten Lebenslaufkosten aus. Die Betriebskosten betragen knapp 20%, die Instandhaltungs- und die Entsorgungskosten je ca. 10%. Dies ist die Lebenslaufkosten-Struktur des Produktes. Eine solche Lebenslaufkosten-Struktur kann allerdings für unterschiedliche Produkte sehr verschieden sein. In **Bild 4.9** sind typische Beispiele für Lebenslaufkosten-Strukturen dargestellt.

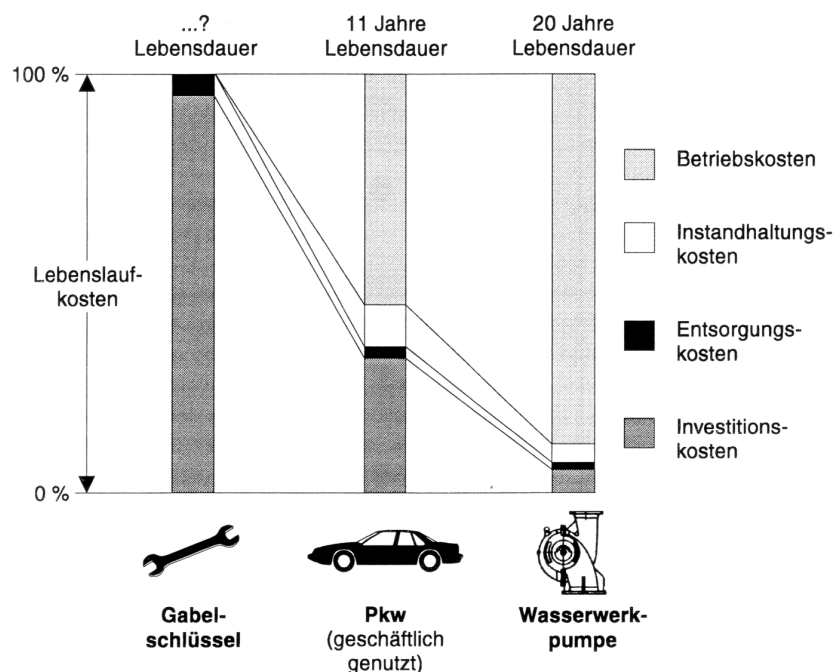


Bild 4.9 Lebenslaufkosten-Strukturen /EKL03/

Die Lebenslaufkosten-Struktur eines Produktes kann nur im Zusammenhang mit der Lebensdauer betrachtet werden, da sich die laufenden Kosten (Betriebs- und Instandhaltungskosten) über die Lebensdauer kumulieren, während die Investitionskosten von Beginn an feststehen. Auch die Entsorgungskosten fallen nur einmalig an, können jedoch bei geringer Nutzungsdauer wahrscheinlich durch einen (lebensdauerabhängigen) Wiederverkaufswert ersetzt werden, welcher abgezinst die Investitionskosten mindert.

Wie aus **Bild 4.9** ersichtlich ist, können Produktgruppen mit ähnlichen Lebenslaufkosten-Strukturen zusammengefasst werden. Somit würde es zunächst nahe liegen, eine Produktgruppe „Bauteilreinigungsanlagen“ zu definieren und hierfür eine charakteristische Lebenslaufkosten-Struktur zu ermitteln. Dabei ergibt sich allerdings das Problem, dass Bauteilreinigungsanlagen sehr unterschiedlich gestaltet sein können. Zum einen können als Wirkprinzipien die unterschiedlichsten Reinigungsverfahren Anwendung finden (s. Kap. 3.1.1.1), zum anderen kann auch die Größenordnung und der Automatisierungsgrad von Anlage zu Anlage stark variieren. Als Beispiel seien hier die beiden Spritzreinigungsanlagen oben in **Bild 3.5** genannt.

Ehrlenspiel schreibt in /EHR03/: „Der Blick auf die Lebenslaufkosten ist z. B. beim Leasing von Maschinen und Fahrzeugen selbstverständlich. Im Maschinenbau ist ihre Beachtung weniger eingeführt, weil Daten über die Lebenslaufkosten kaum zu erhalten sind.“ Um hier für Bauteilreinigungsanlagen Abhilfe zu schaffen, sollen solche Daten in die zu erstellende Datenbank mit aufgenommen werden. Dies sind gemäß **Bild 4.9**:

- Investitionskosten
- Entsorgungskosten
- Instandhaltungskosten
- Betriebskosten

Die **Investitionskosten** lassen sich leicht in die Datenbank integrieren, indem zu jeder Reinigungsanlage der Marktpreis gespeichert wird. Da dieser je nach genauer Ausgestaltung der Anlage, z. B. hinsichtlich verschiedener Ausstattungsvarianten, variieren kann, soll eine Investitionskostenpanne aufgenommen werden. Dazu werden die minimalen („Mindestausstattung“) sowie die maximalen Investitionskosten („Vollausstattung“) in der Datenstruktur abgebildet.

Die **Entsorgungskosten**, die **Instandhaltungskosten** und die **Betriebskosten** hingegen können von Anwendungsfall zu Anwendungsfall sehr verschieden sein. Sie hängen von der Reinigungsaufgabe, insbesondere dem Durchsatz an zu reinigenden Teilen, sowie von der Nutzungsdauer der Anlage ab. Auch örtliche Gegebenheiten in dem Betrieb des jeweiligen Anwenders spielen eine Rolle. Daher können diese Kosten nicht von vornherein abgeschätzt und mit jeder Reinigungsanlage in der Datenbank gespeichert werden. Statt dessen sollen zu jeder Anlage Beispiele für darauf gereinigte Teile aufgenommen werden. Anhand dieser Praxisbeispiele wird eine umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung möglich, indem sämtliche angefallenen Lebenslaufkosten bilanziert werden. Für die Betriebskosten ist hier eine Registrierung aller Verbräuche notwendig, welche dann über Kostensätze umgerechnet werden.

Bei der Integration der Lebenslaufkosten für Anwendungsbeispiele gereinigter Teile in die Datenbank muss allerdings darauf geachtet werden, dass die Datenstruktur flexibel bleibt und nicht auf einzelne Verfahren zugeschnitten wird. Die Abfrage eines Frischwasserverbrauchs impliziert z. B. eine wässrige Reinigung, macht aber im Zusammenhang beispielsweise mit einer Schleuderstrahlanlage keinen Sinn. Für letztere müsste unter anderem der Strahlmittelverbrauch berücksichtigt werden. Um hier eine größtmögliche Flexibilität zu gewährleisten, werden für jedes Reinigungsbeispiel 15 frei belegbare Felder integriert, in denen der Anbieter die jeweilige Kostenart benennen kann. Dazu kann er jeweils den Verbrauch in flexiblen Zeiteinheiten sowie einen Kostensatz pro Einheit eingeben.

Die Lebenslaufkosten werden damit bezogen auf die Zeit ermittelt, beispielsweise pro Jahr. Um sie nun noch auf die gereinigten Bauteile beziehen zu können, werden Informationen über den Bauteildurchsatz pro Zeit benötigt. Daher werden auch hierfür noch Felder in die Datenstruktur der Beispiele für gereinigte Teile aufgenommen, in denen die Bauteilmenge pro Zeiteinheit sowie die Betriebszeiten der Anlage pro Tag und Monat gespeichert werden. Als Mengeneinheit für die gereinigten Teile können „Stück“, „kg“, „Liter“ oder „m²“ (gereinigte Oberfläche) verwendet werden.

Beispiel für gereinigte Teile bearbeiten - Netscape

d) Kosten und Durchsatz

Durchschnittlicher Reinigungsdurchsatz: 20 kg pro Stunde

Betriebszeiten: 8 Stunden/Tag, 20 Tage/Monat

Kostenart	Menge	Einheit	pro Zeit	Kostensatz in Euro pro Einheit	Kosten pro kg
Frischwasserbedarf	12	m3	pro Tag	1	0.075
Abwasserentsorgung	12	m3	pro Tag	2	0.15
Energiebedarf	5	kWh	pro Stunde	0.17	0.0425
Arbeitskosten	1	Personenstunden	pro Stunde	21	1.05
Wartungskosten	1000	Euro	pro Jahr	1	0.026041
Reinigerbedarf	0.25	kg	pro Stunde	0.8	0.01
Reinigerentsorgung	0.25	kg	pro Stunde	0.5	0.00625
Anlagenabschreibung	1600	Euro	pro Jahr	1	0.041666
kalkulatorische Zinsen	480	Euro	pro Jahr	1	0.0125
	0		pro Stunde	0	0
	0		pro Stunde	0	0
	0		pro Stunde	0	0
	0		pro Stunde	0	0
	0		pro Stunde	0	0
	0		pro Stunde	0	0
Summe aller Einzelkosten pro kg					1.413957

neu berechnen

Bild 4.10 Tabellenkalkulations-Formular zur Eingabe der Lebenslaufkosten

Insgesamt können damit die Lebenslaufkosten für Anwendungsbeispiele gereinigter Teile auf einer Anlage mit Hilfe einer flexiblen Tabellenkalkulation eingegeben werden, deren Felder in der Datenbank gespeichert werden. Das Eingabeformular ist in **Bild 4.10** dargestellt. Dieses ist beispielhaft für eine Trommelreinigung von Kleinteilen ausgefüllt.

Die bauteilbezogenen Lebenslaufkosten errechnen sich folgendermaßen:

$$K_L \left[\frac{\text{€}}{E_T} \right] = \sum_{i=1}^{n_{KA}} \frac{M_{Ki} \cdot K_{Ki}}{d(Z_{Ki})} \quad (4.8)$$

K_L = Lebenslaufkosten

E_T = Einheit der gereinigten Teile (Stück/kg/Liter/m²)

i = Index der betrachteten Kostenart

n_{KA} = Gesamtanzahl der eingegebenen Kostenarten (bis zu 15)

M_{Ki} = Mengenverbrauch der i -ten Kostenart

K_{Ki} = Kostensatz der i -ten Kostenart

$d(Z_{Ki})$ = Teiledurchsatz pro für die i -te Kostenart eingegebener Zeiteinheit

$$d(Z_{Ki}) = D_T \cdot \frac{s(Z_{Ki})}{s(Z_T)} \quad (4.9)$$

D_T = Teiledurchsatz (in E_T/Z_T)

$s(Z_{Ki})$ = Stundenfaktor der für die i -te Kostenart eingegebener Zeiteinheit

$s(Z_T)$ = Stundenfaktor der für den Teiledurchsatz eingegebener Zeiteinheit

Der Stundenfaktor $s(Z)$ gibt die Anzahl der Betriebsstunden der Anlage pro Zeiteinheit Z an:

$$s(Z) = \begin{cases} 1, & \text{für } Z = \text{"Stunde"} \\ S_B, & \text{für } Z = \text{"Tag"} \\ S_B \cdot T_B, & \text{für } Z = \text{"Monat"} \\ S_B \cdot T_B \cdot 12, & \text{für } Z = \text{"Jahr"} \end{cases} \quad (4.10)$$

s = Stundenfaktor

Z = Zeiteinheit

S_B = Anzahl Betriebsstunden der Anlage pro Tag

T_B = Anzahl Betriebstage der Anlage pro Monat

Aus (4.8) und (4.9) ergibt sich für die Lebenslaufkosten:

$$K_L \left[\frac{\text{€}}{E_T} \right] = \frac{s(Z_T)}{D_T} \cdot \sum_{i=1}^{n_{KA}} \frac{M_{Ki} \cdot K_{Ki}}{s(Z_{Ki})} \quad (4.11)$$

K_L = Lebenslaufkosten

E_T = Einheit der gereinigten Teile (Stück/kg/Liter/m²)

$s(Z_T)$ = Stundenfaktor der für den Teiledurchsatz eingegebenen Zeiteinheit

D_T = Teiledurchsatz (in E_T/Z_T)

i = Index der betrachteten Kostenart

n_{KA} = Gesamtanzahl der eingegebenen Kostenarten (bis zu 15)

M_{Ki} = Mengenverbrauch der i -ten Kostenart

K_{Ki} = Kostensatz der i -ten Kostenart

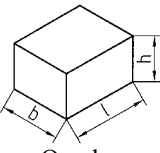
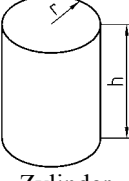
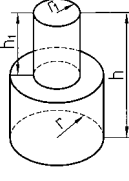
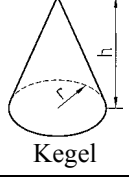

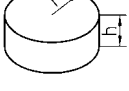
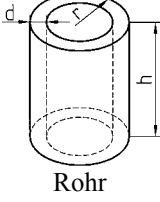
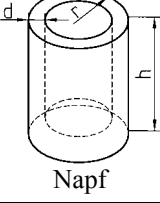
$s(Z_{Ki})$ = Stundenfaktor der für die i -te Kostenart eingegebenen Zeiteinheit

In dieser Gleichung können alle Kostenarten berücksichtigt werden, also Investitionskosten, Entsorgungskosten, Instandhaltungskosten und Betriebskosten. Die einmalig anfallenden Kosten müssen dabei auf die Lebensdauer der Anlage verteilt werden. Beispielsweise werden Investitionskosten von 16.000 € bei einer erwarteten Lebensdauer von 10 Jahren mit jährlich 1.600 € angesetzt. Weiterhin schlagen hier kalkulatorische Zinsen von beispielsweise 6 % p. a. bezogen auf die durchschnittlich gebundenen halben Investitionskosten zu Buche, in diesem Fall also 480 € pro Jahr.

Die beschriebene Vorgehensweise gewährleistet eine größtmögliche Flexibilität, da alle relevanten Kostenarten für jede Anlage individuell festgelegt und die angefallenen Kosten bilanziert werden können. Das Tabellenkalkulations-Formular in **Bild 4.10** dient also der geführten Ermittlung der Lebenslaufkosten einer Anlage für einen konkreten Anwendungsfall.

Um nun die Lebenslaufkosten für Anwendungsfälle von Anlagen zwecks einer wirtschaftlichen Bewertung miteinander vergleichen zu können, müssen sie sich auf dieselbe der vier Einheiten gereinigter Teile E_T beziehen. Sollen beispielsweise die Kosten pro dm³ Bauteile eines Beispiels mit den Kosten pro kg Bauteile eines anderen Beispiels verglichen werden, müssen letztere noch mit der Dichte ρ des Bauteilwerkstoffes multipliziert werden, damit beide vergleichbar auf das Bauteilvolumen bezogen werden:

$$K_L \left[\frac{\text{€}}{\text{dm}^3} \right] = \rho \cdot K_L \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] \quad (4.12)$$

Form	Annahmen	Volumen V , Oberfläche A	Oberfläche/Volumen
 Quader	$l = l_B$ $b = b_B$ $h = h_B$	$V = l \cdot b \cdot h$ $A = 2 \cdot (l \cdot b + l \cdot h + b \cdot h)$	$\frac{A}{V} = 2 \cdot \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h} \right)$
 Zylinder	$h = \max[l_B, b_B, h_B]$ $b = \min[l_B, b_B, h_B]$ $l = \text{med}[l_B, b_B, h_B]$ $r = \frac{l+b}{4}$	$V = \frac{\pi}{16} \cdot (l+b)^2 \cdot h$ $A = \frac{\pi}{8} \cdot (l+b) \cdot (l+b+4h)$	$\frac{A}{V} = \frac{8}{l+b} + \frac{2}{h}$
 Flasche	$h = \max[l_B, b_B, h_B]$ $b = \min[l_B, b_B, h_B]$ $l = \text{med}[l_B, b_B, h_B]$ $r = \frac{l+b}{4}$ $h_1 = \frac{h}{2} \quad r_1 = \frac{r}{2}$	$V = \frac{5}{128} \pi \cdot (l+b)^2 \cdot h$ $A = \frac{\pi}{8} \cdot (l+b) \cdot (l+b+3h)$	$\frac{A}{V} = \frac{16}{5} \cdot \left(\frac{3}{l+b} + \frac{1}{h} \right)$
 Kegel	$h = \max[l_B, b_B, h_B]$ $b = \min[l_B, b_B, h_B]$ $l = \text{med}[l_B, b_B, h_B]$ $r = \frac{l+b}{4}$	$V = \frac{\pi}{48} \cdot (l+b)^2 \cdot h$ $A = \frac{\pi}{16} \cdot (l+b) \cdot \left[l+b + \sqrt{16h^2 + (l+b)^2} \right]$	$\frac{A}{V} = \frac{3}{h} \left(1 + \frac{\sqrt{16h^2 + (l+b)^2}}{l+b} \right)$
 Kugel	$l = l_B$ $b = b_B$ $h = h_B$ $r = \frac{l+b+h}{3}$	$V = \frac{4}{81} \pi \cdot (l+b+h)^3$ $A = \frac{4}{9} \pi \cdot (l+b+h)^2$	$\frac{A}{V} = \frac{9}{l+b+h}$
 Scheibe	$h = \min[l_B, b_B, h_B]$ $b = \max[l_B, b_B, h_B]$ $l = \text{med}[l_B, b_B, h_B]$ $r = \frac{l+b}{4}$	$V = \frac{\pi}{16} \cdot (l+b)^2 \cdot h$ $A = \frac{\pi}{8} \cdot (l+b) \cdot (l+b+4h)$	$\frac{A}{V} = \frac{8}{l+b} + \frac{2}{h}$
 Rohr	$h = \max[l_B, b_B, h_B]$ $b = \min[l_B, b_B, h_B]$ $l = \text{med}[l_B, b_B, h_B]$ $r = \frac{l+b}{4} \quad d \approx 0$	$V = \frac{\pi}{16} \cdot (l+b)^2 \cdot h$ $A = \pi \cdot (l+b) \cdot h$	$\frac{A}{V} = \frac{16}{l+b}$
 Napf	$h = \max[l_B, b_B, h_B]$ $b = \min[l_B, b_B, h_B]$ $l = \text{med}[l_B, b_B, h_B]$ $r = \frac{l+b}{4} \quad d \approx 0$	$V = \frac{\pi}{16} \cdot (l+b)^2 \cdot h$ $A = \frac{\pi}{8} \cdot (l+b) \cdot (l+b+8h)$	$\frac{A}{V} = \frac{16}{l+b} + \frac{2}{h}$

l_B = Länge eines Bauteils
 b_B = Breite eines Bauteils
 h_B = Höhe eines Bauteils

$\max[x, y, z]$ = größter der drei Werte x, y, z
 $\min[x, y, z]$ = kleinster der drei Werte x, y, z
 $\text{med}[x, y, z]$ = mittlerer der drei Werte x, y, z

Bild 4.11 Umrechnung zwischen Volumen und Oberfläche für charakteristische Bauteilformen

Idealerweise sollten die Lebenslaufkosten jedoch auf die Bauteiloberfläche bezogen werden, denn diese wird bei der Bauteilreinigung von der Verschmutzung befreit. Die Umrechnung des Bauteilvolumens in die Bauteiloberfläche birgt allerdings das Problem, dass hierfür die genaue Geometrie der Bauteile bekannt sein muss. Für Beispiele gereinigter Teile können zwar die groben Abmessungen der Bauteile (Länge x Breite x Höhe) eingegeben werden, die Aufnahme der exakten Geometrie würde jedoch die aufwändige Hinterlegung eines Produktmodells erfordern.

Um diesen Aufwand zu reduzieren, soll nur die ungefähre Form hinterlegt werden, der die Bauteile gleichen. Dazu wurden einige charakteristische Formen hinterlegt, von denen der Anbieter die für seine Beispielteile am besten passende auswählt. Dann kann mit Hilfe der Formeln in **Bild 4.11** das Volumen und die Oberfläche pro Bauteil abgeschätzt werden. Auch die Umrechnung eines angegebenen gereinigten Bauteilvolumens in die gereinigte Bauteiloberfläche ist mit Hilfe von **Bild 4.11** möglich. Es ergibt sich folgende Umrechnungsformel:

$$K_L \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] = \frac{K_L \left[\frac{\text{€}}{\text{Stück}} \right]}{A} = \frac{K_L \left[\frac{\text{€}}{\text{dm}^3} \right]}{\frac{A}{V}} = \frac{\rho \cdot K_L \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right]}{\frac{A}{V}} \quad (4.13)$$

K_L = Lebenslaufkosten

A = Oberfläche pro Bauteil gemäß **Bild 4.11**

A/V = Verhältnis von Oberfläche zu Volumen pro Bauteil gemäß **Bild 4.11**

ρ = Dichte des Bauteilwerkstoffes (Achtung: bei Rohr und Napf mittlere Dichte des Bauteils abschätzen)

Somit ist zumindest annähernd eine Vergleichbarkeit der Lebenslaufkosten von Anlagen bei der Reinigung verschiedener Beispielteile gegeben. Die Lebenslaufkosten einer Bauteilreinigungsanlage sollen nun abgeschätzt werden, indem die Lebenslaufkosten aller dazu angegebenen Anwendungsbeispiele gemittelt werden:

$$\overline{K}_L = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{Bsp}}} K_{Li}}{n} \quad (4.14)$$

\overline{K}_L = gemittelte Lebenslaufkosten einer Reinigungsanlage

K_{Li} = Lebenslaufkosten des i -ten auf der Anlage gereinigten Beispielteils

n_{Bsp} = Anzahl der zu der Anlage angegebenen Beispielteile

Die wirtschaftliche Wertigkeit der Anlage errechnet sich dann in Anlehnung an Gleichung (4.6):

$$y = \frac{\overline{K}_{L,\text{id}}}{\overline{K}_L} \quad (4.15)$$

y = wirtschaftliche Wertigkeit der betrachteten Anlage

$\overline{K}_{L,\text{id}}$ = geringste gemittelte Lebenslaufkosten aller Anlagen der Datenbank

\overline{K}_L = gemittelte Lebenslaufkosten der betrachteten Anlage

4.2.4 Reinigungsanlagen mit Reinigungsbeispielen

In Kapitel 4.2.3.2 wurde das Konzept entwickelt, zu jeder Reinigungsanlage mehrere Anwendungsbeispiele darauf gereinigter Teile zu hinterlegen, um eine detaillierte Kostenbetrachtung zu ermöglichen. Diese Strukturierung ist in **Bild 4.12** dargestellt. Die Integration von Anwendungsbeispielen in die Datenbank hat noch einen weiteren Vorteil: Die hier gemachten Angaben zu der jeweiligen Reinigungsaufgabe können sehr konkret sein. Während bei Reinigungsanlagen die Angaben zur Eignung hinsichtlich verschiedener Aufgaben in Klassen gemäß **Bild 4.6** eingeteilt werden müssen, können für Beispiele gereinigter Teile in allen Kategorien genaue Beschreibungen gespeichert werden, beispielsweise die genauen Abmessungen, das genaue Bauteilgewicht usw. Je mehr Anwendungsbeispiele nun in der Datenbank gespeichert sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Anwender Beispiele findet, die seinem Problem entsprechen oder zumindest stark ähneln, beispielsweise durch die Suche nach dem Begriff „Zahnräder“. Dadurch kann er sehr konkrete Lösungsvorschläge vorfinden. Die genauen Angaben, die zu den Reinigungsanlagen und zu den Anwendungsbeispielen gereinigter Teile gespeichert werden sollen, sind in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben.



Bild 4.12 Strukturierung in Anlagenbeispielen mit Beispielen gereinigter Teile (Reinigungsbeispiele)

4.2.5 Angaben zu Anlagen

Zu jeder Reinigungsanlage wird eine Bezeichnung sowie ein Foto gespeichert. Für eine spätere gezielte Suche werden außerdem das bzw. die verwendete(n) Reinigungsverfahren abgefragt. Dabei können entweder eines oder mehrere der Verfahren ausgewählt werden, die in der Wissensbasis abgehandelt werden (s. **Bild 3.1**), oder es kann vom Anbieter ein anderer Verfahrensname vergeben werden. So ist eine Erweiterung der Datenbank bei einem sich verändernden Stand der Technik möglich. Weiterhin sind zwei Felder für die Investitionskosten vorgesehen. Darin kann in Form des minimalen und maximalen Verkaufspreises eine Spanne für die Investitionskosten für die Anlage angegeben werden, welche je nach Ausstattung variieren können.

Darüber hinaus kann die Anlage in einem Freitext näher beschrieben werden. Dadurch hat der Anbieter die größte Freiheit hinsichtlich der Angaben, die er für erforderlich hält. Gleichzeitig erfolgt so keine Beschränkung der Datenstruktur auf einzelne Anlagentypen oder Reinigungsverfahren.

Für die spätere technische Bewertung der Anlagen müssen noch Angaben zu den Fähigkeiten der Anlage hinsichtlich der in **Bild 4.6** dargestellten Klassen in den Kategorien von Reinigungsaufgaben nach dem System „+/0/-“ gemacht werden (s. Kap. 4.2.2.5)

4.2.6 Angaben zu Beispielen gereinigter Teile

Zu jeder Anlage können beliebig viele Anwendungsbeispiele gereinigter Teile gespeichert werden. Im Folgenden werden sie auch als „Reinigungsbeispiele“ bezeichnet.

Zunächst muss die im Beispiel gelöste Reinigungsaufgabe beschrieben werden. Während bei der Anlagenbeschreibung die Eignung einer Reinigungsanlage bezüglich abstrakter Klassen von Reinigungsaufgaben erfasst wurde, liegt nun ein konkreter Anwendungsfall vor. Daher kann die Beschreibung der Reinigungsaufgabe detailliert und konkret erfolgen.

Neben einer Bezeichnung des Reinigungsbeispiels werden das Bauteilgewicht in g oder kg und die genauen Abmessungen (Länge x Breite x Höhe) in mm angegeben. Daneben wird die charakteristische Form ausgewählt, der die Bauteile am ehesten gleichen (Quader, Zylinder, Flasche, Kegel, Kugel, Scheibe, Rohr oder Napf). Damit kann später im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eine Abschätzung der Bauteiloberfläche erfolgen (s. Kap. 4.2.3.2). Als nächstes werden Angaben zu Besonderheiten des Bauteils gemäß der gleichnamigen Kategorie aus **Bild 4.6** gemacht. Der oder die Bauteilwerkstoff(e) werden angegeben, und die Beschichtung wird spezifiziert. Auch wird abgefragt, ob diese Beschichtung entfernt wurde oder erhalten blieb. Als letzter Punkt zur Beschreibung der Bauteile selbst ist noch ein Freitext hinterlegt, in dem zusätzliche Angaben gemacht werden können. Dies dient der Flexibilität bei der Beschreibung des Reinigungsbeispiels, da der Anbieter hier selbst entscheiden kann, welche weiteren Informationen er für relevant hält.

Als nächster Punkt wird der Verschmutzungszustand der Bauteile vor der Reinigung beschrieben. Dabei werden die vorhandenen Schmutzarten aufgeführt und die Schmutzmenge angegeben. Letztere wird zunächst wieder in vier Klassen eingeteilt (von „Bauteile stehen in Öl/Schmutz“ bis „Bauteile sind nach Augenschein sauber“). Eine genauere Beschreibung, ggf. bis hin zu genauen quantitativen Angaben, kann jedoch in dem auch für den Verschmutzungszustand hinterlegten Freitext erfolgen.

Der in dem Anwendungsbeispiel erreichte Reinheitsgrad der Bauteile wird im nächsten Schritt beschrieben, auch hier mit der Einteilung in vier Klassen (von „Grobreinigung“ bis „Feinstreinigung“) und einem zusätzlichen Freitext. Weiterhin können Fotos von dem Aussehen der Bauteile vor und nach der Reinigung hinterlegt werden.

Für die spätere wirtschaftliche Bewertung der Anlagen muss noch eine detaillierte Kostenbetrachtung für jedes Reinigungsbeispiel vorgenommen werden. Diese erfolgt gemäß Kap. 4.2.3.2 durch Ausfüllen der Felder des in **Bild 4.10** dargestellten Tabellenkalkulationsformulars, welche dann in der Datenbank gespeichert werden.

Bereits in Kapitel 3.1.1.1 wurde die große Bedeutung von Nassreinigungsverfahren mit einem Marktanteil von ca. 95% hervorgehoben. Daher sind bei entsprechend vielen Reinigungsbeispielen auch die eingesetzten Reinigungsmittel von Interesse. Da diese allerdings in den allermeisten Fällen von Fremdanbietern bezogen werden, können genaue Angaben hierzu nicht von den Anlagenanbietern gemacht werden. Daher wurden parallel zu den Reinigungsanlagen auch Reinigungsmittel in die Datenbank mit aufgenommen, welche von den entsprechenden Reinigeranbietern eingepflegt werden können. Darauf kann dann von den Beispielen gereinigter Teile ausgehend verwiesen werden.

4.2.7 Angaben zu Reinigungsmitteln

Reinigungsmittel sollen parallel zu den Reinigungsanlagen in die Datenbank eingetragen werden können. Hierzu ist eine ähnliche Struktur zu erarbeiten. Dabei sollen jedes Reinigungsmittel beschrieben sowie seine Fähigkeiten hinsichtlich der Eignung für unterschiedliche Reinigungsaufgaben spezifiziert werden.

Ein wichtiger Bestandteil der Beschreibung eines Reinigungsmittels ist der Reinigertyp. Dieser kann aus einer Liste der acht Reinigungsmitteltypen gemäß **Bild 3.3** (s. Kapitel 3.1.1.1) ausgewählt werden. Alternativ kann ein davon abweichender Typ in ein Textfeld frei eingegeben werden, um den Anbieter möglichst wenig einzuschränken und um eine einfache Anpassung des Systems an einen sich ändernden Stand der Technik zu gewährleisten. Ansonsten dient zur Beschreibung lediglich ein flexibles Freitext-Feld, in dem der Anbieter alle seiner Meinung nach relevanten Angaben machen kann.

Hingegen macht es keinen Sinn, analog zu den Investitionskosten der Reinigungsanlagen auch Preise für Reinigungsmittel in die Datenbank mit aufzunehmen, da hier kein Mengenbezug gegeben ist. Dieser wird erst durch die Betrachtung im Zusammenhang mit einem bzw. mehreren Anwendungsbeispielen hergestellt, in denen die Verbrauchsmengen des Reinigers bekannt sind, welche dann im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit Hilfe der in Kapitel 4.2.3.2 beschriebenen Vorgehensweise in auf die gereinigten Teile bezogene Reinigerkosten umgerechnet werden können.

Daher ist auch die Verknüpfung der Reinigungsmittel in der Datenbank mit Beispielen gereinigter Teile sehr wichtig. Diese erfolgt, indem zu jedem Reinigungsbeispiel eine Liste darin verwendeter Reinigungsmittel gespeichert wird (s. Kap. 4.2.6). Dabei erhält der Anbieter, der das Reinigungsbeispiel einpflegt, eine Suchmaske, in der er die Datenbank nach dem jeweiligen Reiniger durchsuchen kann. Da ein Anlagenanbieter seine Reinigungsmittel in den seltensten Fällen selber herstellt, erfolgt dabei die Suche in der gesamten Datenbank mit allen eingetragenen Anbietern. Wenn der jeweilige (Fremd-) Anbieter des verwendeten Reinigers diesen noch nicht in die Datenbank eingepflegt hat, kann der Anlagenanbieter für sein Reinigungsbeispiel den verwendeten Reiniger selber eingeben. Dies erfolgt durch Texteingabe von Hersteller und Bezeichnung sowie durch Angabe des Reinigertyps. Eine Verknüpfung innerhalb der Datenbank kann nachträglich erfolgen, sobald der Fremdanbieter den Reiniger nachgetragen hat.

Um auch eine technische Bewertung der in der Datenbank eingetragenen Reinigungsmittel zu ermöglichen, werden analog zu den Anlagefähigkeiten auch Reinigerfähigkeiten gespeichert. Hierbei sind jedoch nicht alle in **Bild 4.6** dargestellten Kategorien von Interesse, sondern lediglich die Eignung für verschiedene Bauteilwerkstoffe, für den Erhalt oder die Entfernung verschiedener Beschichtungen, für verschiedene Verschmutzungen und Schmutzmengen sowie zur Erreichung bestimmter Reinheitsgrade. Die Geometrie und das Gewicht sowie Besonderheiten der Bauteile sind für die Auswahl eines geeigneten Reinigers von untergeordneter Bedeutung, da es lediglich Aufgabe der Anlagentechnik ist, den Reiniger hier an die richtigen Stellen zu bringen. Auch der geforderte Teiledurchsatz ist lediglich für die Anlagenauswahl von Bedeutung. Insgesamt wird also für jedes Reinigungsmittel die Eignung hinsichtlich der in **Bild 4.13** dargestellten Kategorien in insgesamt 52 Klassen nach dem System „+/-“ gespeichert (vgl. Kap. 4.2.2.5).

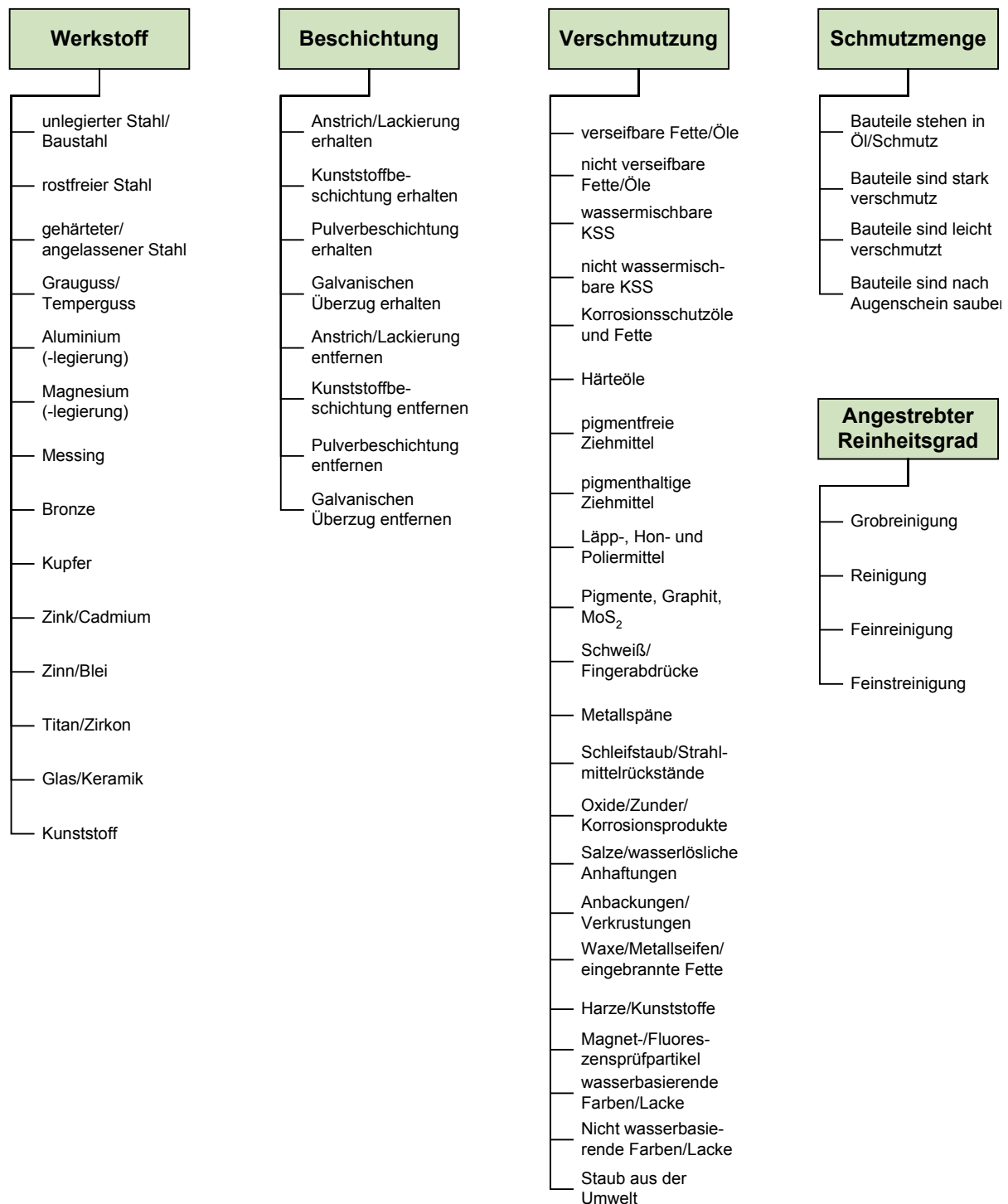


Bild 4.13 Klassen, zu denen für jedes Reinigungsmittel Eignungen in der Datenbank gespeichert werden müssen

4.2.8 Anbieterdaten

Neben den Anlagen mit Reinigungsbeispielen sowie den Reinigungsmitteln aus seinem Angebotsspektrum gehören zu jedem Anbietereintrag auch die Daten des Anbieters, vor allem die Kontaktdaten. Dies sind der Name und die Adresse der Firma, der Name eines Ansprechpartners mit Telefon- und Faxnummer sowie einer Email-Adresse. Weiterhin kann der Anbieter sein Unternehmen in einem Freitext beschreiben.

Zu den Anbieterdaten gehören aber auch die Login-Daten, also der Benutzername und das Passwort. Damit kann sich der Anbieter in seinen geschützten Datenbankbereich einloggen und Veränderungen an seinen Daten vornehmen. So ist sichergestellt, dass keine Unbefugten mutwillig oder versehentlich Daten manipulieren.

4.2.9 Zusammenfassung der Datenstruktur

Insgesamt ergibt sich die Struktur der Datenbank wie folgt: Jeder Anbieter erhält einen eigenen geschützten Datenbankbereich. Dort hinterlegt er neben seinen Kontaktdaten Daten zu Anlagen und/oder Reinigungsmitteln aus seinem Angebotsspektrum. Zu den Anlagen hinterlegt er Beispiele darauf gereinigter Teile. Diese Reinigungsbeispiele können wiederum mit den Reinigungsmitteln verknüpft sein, welche in dem jeweiligen Beispiel eingesetzt wurden. Dabei ist auch eine Verknüpfung zwischen unterschiedlichen Anbietern möglich, da ein Anlagenanbieter selten auch Reinigungsmittel herstellt. Die Datenbankstruktur eines jeden Anbieters ist in **Bild 4.14** dargestellt. Die gesamte Datenbank setzt sich nun aus vielen dieser Herstellerbereiche zusammen, die über die Verwendung von Reinigungsmitteln in Reinigungsbeispielen miteinander verknüpft sein können.

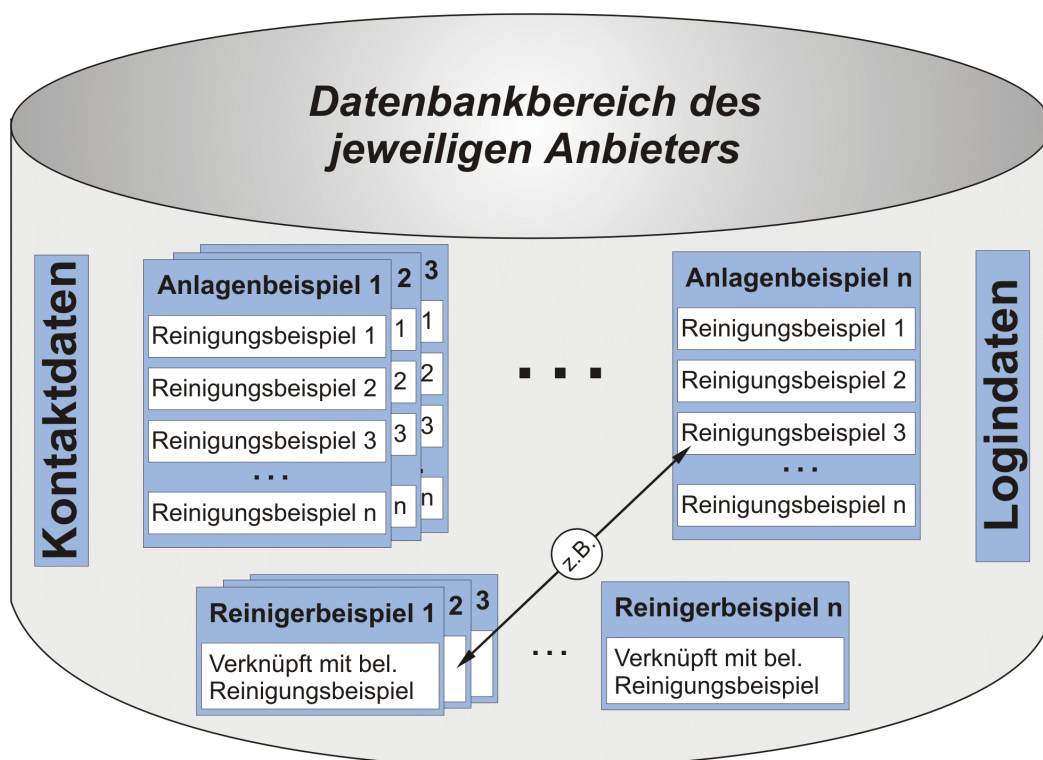


Bild 4.14 Struktur des Datenbankbereichs jedes Anbieters

In **Bild 4.15** ist die Datenstruktur aus Sicht des Anbieters als Baum dargestellt. Die Gesamtheit der einzugebenden Daten ist zwar relativ komplex, jedoch wird die Systembenutzung sowohl für den Anbieter als auch später für den Anwender durch die übersichtliche Struktur stark erleichtert.

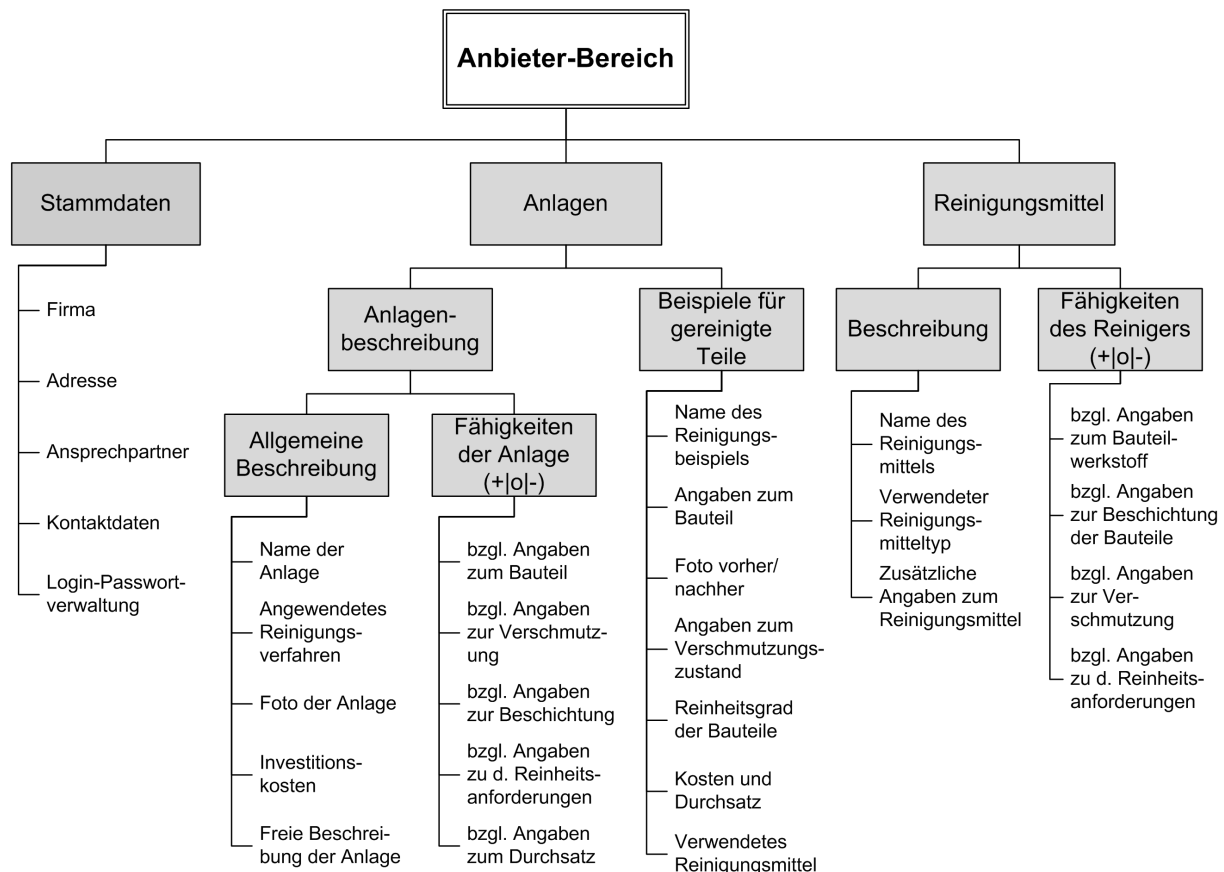


Bild 4.15 Datenstruktur aus Sicht eines Anbieters

4.3 Erstellen der Datenbank

4.3.1 LAMP-System

Das internetbasierte Informations- und Auswahlssystem für die industrielle Teilereinigung „www.bauteilreinigung.de“ ist als so genanntes LAMP-System realisiert. Diese weit verbreitete Technik, dynamische Internetseiten anzubieten, ist unter anderem in /GOL02/ beschrieben. Die vier Buchstaben **LAMP** sind als Abkürzungen für **L**inux, **A**pache, **M**ySQL und **P**HP zu verstehen, welche im Folgenden kurz beschrieben werden:

- **Linux** ist das verwendete Betriebssystem. Im Rahmen des Open-Source-Projektes ist dieses UNIX-Derivat frei verfügbar. Mittlerweile sind zahlreiche Distributionen mit umfangreicher Zusatzsoftware erhältlich, mit deren Hilfe die Installation und Anwendung stark vereinfacht wird. Linux eignet sich aufgrund seiner hohen Stabilität und Sicherheit hervorragend als Betriebssystem für Webserver.
- **Apache** ist die Webserver-Software, welche auf Anfrage aus dem Internet die Inhalte zur Verfügung stellt. Dies sind im Normalfall HTML-Seiten (**H**yper**T**ext **M**arkup **L**anguage), also statische Seiten, welche formatierten Text mit Grafiken sowie Verknüpfungen zu anderen Seiten enthalten können. Der HTML-Code wird vom Apache-Server an den Internetbrowser des Endbenutzers gesendet, wo er interpretiert und dargestellt wird. Mit reinem HTML alleine lassen sich jedoch keine dynamischen, d. h. vom Inhalt her veränderlichen, Webseiten mit Datenbankbindung realisieren. Dafür sind die folgenden zwei Punkte erforderlich.

- **MySQL** ist die verwendete Datenbanktechnologie, genauer gesagt ein relationales Datenbankmanagementsystem. Bei diesem werden die Daten in Tabellen abgespeichert, welche miteinander verknüpft sein können („Relationen“). Die Datensätze befinden sich dabei in den Zeilen der Tabellen. Neben der freien Verfügbarkeit ist ein großer Vorteil von MySQL die Multi-User-Architektur, welche es ermöglicht, dass mehrere Benutzer gleichzeitig mit der Datenbank arbeiten. Dies ist gerade bei über das Internet angeprochenen Datenbanken häufig der Fall.
- **PHP** (rekursive Abkürzung für **PHP: Hypertext Preprocessor**) heißt die eingesetzte Scriptsprache. Diese wird serverseitig interpretiert und ermöglicht es, dynamisch HTML-Code zu erzeugen, welcher dann an den Browser des Endbenutzers geschickt wird. Durch die ausgezeichnete Datenbankbindung können die Inhalte der ausgegebenen Webseiten auf den Daten der MySQL-Datenbank basieren. Umgekehrt können auch vom Benutzer in HTML-Formulare eingetragene Daten in der Datenbank gespeichert werden.

Eine Kombination aus PHP und MySQL ist also hervorragend für die Erstellung der geplanten Datenbank sowie der Benutzeroberflächen sowohl für Anbieter als auch für Anwender geeignet. Im folgenden Unterkapitel soll zunächst die erstellte Datenbank beschrieben werden.

4.3.2 Die MySQL-Datenbank „bauteilreinigung“

Die in Kapitel 4.2 entwickelte Datenstruktur muss nun als MySQL-Datenbank umgesetzt werden. Die dabei einzuhaltenden Grundregeln des Datenbank-Designs werden beispielsweise in /YRK00/ beschrieben.

Zunächst einmal gilt es, Redundanzen in der Datenbankstruktur zu vermeiden. Es wäre beispielsweise nicht sinnvoll, eine Tabelle mit Reinigungsanlagen anzulegen, in der zu jeder Anlage der Anbieter mit Name, Anschrift und weiteren Kontaktdaten gespeichert wird. Würde sich nun beispielsweise die Telefonnummer eines Anbieters ändern, müssten alle Anlagen dieses Herstellers gesucht und das jeweilige Datenfeld aktualisiert werden.

Statt dessen sollte die Relationalität des MySQL-Datenbankmanagementsystems ausgenutzt werden. Dazu werden zwei Datenbanktabellen angelegt: eine mit Anbietern und eine mit Anlagen. Diese werden dann miteinander verknüpft, und zwar in der Weise, dass ein Anbieter mehreren Anlagen, eine Anlage jedoch nur genau einem Hersteller zugeordnet sein kann. Dies wird als „1-zu-M-Beziehung“ bezeichnet. **Bild 4.16** zeigt die in /YRK00/ vorgeschlagene graphische Darstellung dieser Beziehung.

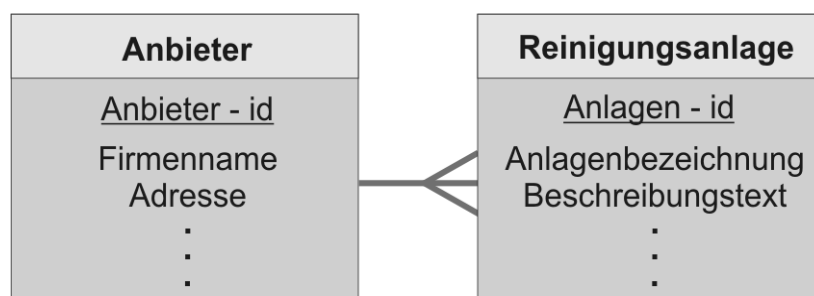


Bild 4.16 1-zu-M-Beziehung zwischen Anbietern und Reinigungsanlagen

Das Bild zeigt zwei so genannte „Entitäten“, also Objekte, zu denen Daten gesammelt werden. Dies sind „Anbieter“ und „Reinigungsanlage“. Die jeweils zugehörigen Attribute (Firmenname, Adresse usw. bzw. Anlagenbezeichnung, Beschreibungstext usw.) sind lediglich beispielhaft aufgelistet. Bei den unterstrichenen Attributen handelt es sich um den jeweiligen Primärschlüssel. Dies ist ein Attribut, welches für die jeweilige Entität eindeutig ist. Es darf also keine zwei Anbieter mit der gleichen Anbieter_id geben, ebensowenig wie zwei Reinigungsanlagen mit der gleichen Anlagen_id. Die 1-zu-M-Beziehung wird über die Verbindungslinie dargestellt, welche auf einer Seite dreifach verzweigt ist. Dies ist die Seite der Anlagen, was bedeutet, dass mehrere Anlagen zu einem Anbieter gehören können. Physikalisch wird diese Verbindung realisiert, indem die Entität „Anlage“ ein weiteres Attribut, „id_des_Anbieters“ (oder ähnliche Bezeichnung) erhält. In diesem wird für jede Anlage der Primärschlüssel des zugehörigen Anbieters abgelegt.

Die Reinigungsmittel werden gemäß Kapitel 4.2.7 parallel zu den Anlagen aufgenommen. Auch hier besteht eine 1-zu-M-Beziehung zu den Anbietern. Die Beispiele gereinigter Teile hingegen werden mit den jeweiligen Anlagen verknüpft, auf denen sie gereinigt wurden. Hier besteht ebenfalls eine 1-zu-M-Beziehung, da zu einer Anlage mehrere Reinigungsbeispiele gehören können, während ein Reinigungsbeispiel immer nur einer Anlage zugeordnet sein kann.

Gemäß Kapitel 4.2.6 besteht noch eine weitere Beziehung, und zwar zwischen Reinigungsbeispielen und den dabei verwendeten Reinigungsmitteln. Dies ist allerdings eine M-zu-M-Beziehung, da einerseits ein Reinigungsmittel in mehreren Reinigungsbeispielen zur Anwendung kommen kann, andererseits aber auch in einem Beispiel gereinigter Teile mehrere Reinigungsmittel verwendet werden können. Daher ist die zu dieser Beziehung gehörende Verbindungslinie in **Bild 4.17** auf beiden Seiten dreifach verzweigt.

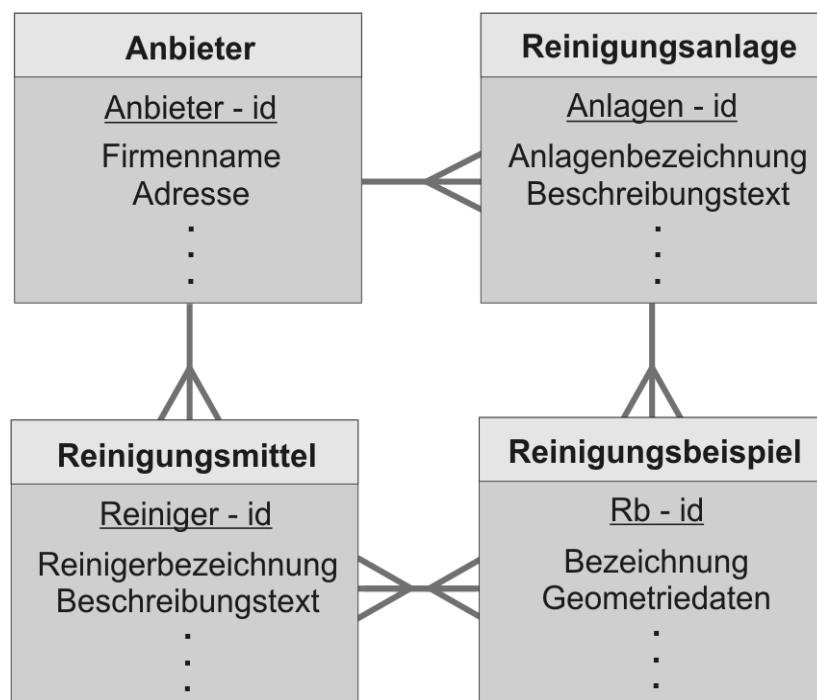


Bild 4.17 Verknüpfung von Anbietern, Reinigungsanlagen, Reinigungsbeispielen und Reinigungsmitteln

Eine solche M-zu-M-Beziehung lässt sich allerdings physikalisch nur schwer realisieren, da hier auf keiner Seite der Verweis auf nur einen Primärschlüssel ausreicht. Die Aufnahme mehrerer Primärschlüssel würde hingegen die Anzahl der verknüpften Elemente limitieren. Um eine solche Beziehung aufzulösen, wird daher eine weitere Entität dazwischengeschaltet, und zwar „verwendetes Reinigungsmittel“. Hier besteht eine 1-zu-M-Beziehung zu den Beispielen gereinigter Teile, da in einem Reinigungsbeispiel mehrere verwendete Reinigungsmittel vorkommen können, ein verwendetes Reinigungsmittel jedoch immer nur zu genau einem Reinigungsbeispiel gehört. Auch zu den Reinigungsmitteln besteht eine 1-zu-M-Beziehung, da ein verwendetes Reinigungsmittel immer nur genau ein Reinigungsmittel sein kann, während ein Reinigungsmittel an mehreren Stellen als verwendetes Reinigungsmittel vorkommen kann. Physikalisch werden in der so genannten „Verbindungs-Entität“ „verwendetes Reinigungsmittel“ zwei Primärschlüssel gespeichert, nämlich der des Reinigungsmittels, auf das sich die Verbindung bezieht, und der des Reinigungsbeispiels, zu dem das Reinigungsmittel gehört.

Bild 4.18 zeigt das endgültige Datenbankdesign. Dabei haben die Entitäten in Wirklichkeit insgesamt mehrere hundert Attribute. Dies sind sämtliche Daten, wie sie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben wurden. Um den Rahmen des Diagramms nicht zu sprengen, wurden davon jedoch nur einige wenige exemplarisch aufgelistet.

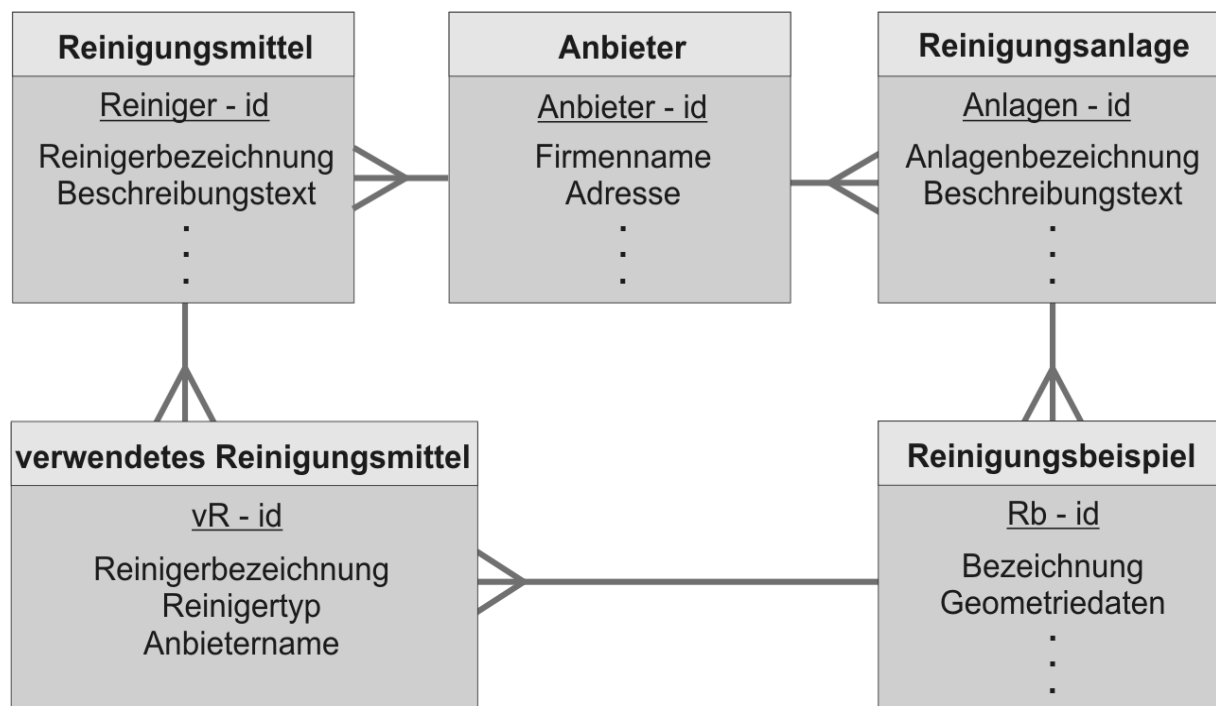


Bild 4.18 Endgültiges Design der Datenbank „bauteilreinigung“

Die Schaffung der Verbindungs-Entität „verwendetes Reinigungsmittel“ hat noch einen weiteren Vorteil: Wenn ein Anlagenanbieter ein Reinigungsbeispiel anlegt und auf das Reinigungsmittel eines Fremdanbieters verweisen möchte, so kann er dies nur, wenn der Fremdanbieter seinen Reiniger bereits in die Datenbank eingepflegt hat. Ist dies nicht der Fall, müsste der Reiniger zunächst angelegt werden, was der Anlagenanbieter jedoch nicht kann, weil dieses einen Zugriff auf den geschützten Datenbereich des Fremdanbieters bedeuten würde. Statt dessen kann der Anlagenanbieter in der Entität „verwendetes Reinigungsmittel“ rudimentäre

Daten zu dem verwendeten Reinigungsmittel (Reinigernamen, -typ und Anbietername) manuell eingeben, wobei dann die Verknüpfung zu der Entität „Reinigungsmittel“ entfällt. Trägt der Reinigeranbieter später das Reinigungsmittel nach, kann die Verknüpfung zu dem detaillierten Datensatz nachträglich durch den Anlagenanbieter hergestellt werden.

Das beschriebene Datenbankdesign muss nun in MySQL in Form der Datenbank „bauteilreinigung“ physikalisch realisiert werden. Dabei werden die Entitäten zu Tabellen und die Attribute zu Spalten der jeweiligen Tabelle. Die Umsetzung kann beispielsweise durch Eintippen der entsprechenden Befehle in die MySQL-Konsole erfolgen. Komfortabler geht dies allerdings mit dem frei verfügbaren Tool *phpMyAdmin* /PMA04/, welches die Administration eines MySQL-Servers über Webformulare ermöglicht. Damit kann später auch leicht eine Sicherung des gesamten Datenbankinhalts erfolgen, was neben dem Sicherheitsaspekt auch einen eventuellen Wechsel des Internetservers erleichtert.

4.4 Internetbasierte Dateneingabe

4.4.1 Anbieter-Login

Ist die Datenbank in MySQL erstellt, kann die Dateneingabe erfolgen. Dies geschieht internetbasiert durch die Anbieter selber. Da jeder Anbieter nur auf seinen eigenen Datenbankbereich zugreifen darf, muss er sich zunächst mit einem Benutzernamen und Passwort autorisieren.

Möchte sich ein neuer Anbieter registrieren, muss er zunächst einen noch nicht vergebenen Benutzernamen auswählen. Daraufhin erhält er ein Formular, in dem er seine Kontaktdaten eintragen kann. Per E-Mail bekommt er dann ein zufällig generiertes Passwort zugeschickt, mit dem er sich in seinen Datenbankbereich einloggen kann.

4.4.2 Anbieter-Hauptmenü

Nach dem Login gelangt der Anbieter in das in **Bild 4.19** dargestellte Hauptmenü. Hier ist bereits erkennbar, dass die Menüstruktur des Anbieter-Bereichs an die in Kapitel 4.2 beschriebene Datenstruktur angelehnt ist. In deren Zusammenfassung in **Bild 4.15** sind die drei Hauptbereiche „Stammdaten“, „Anlagen“ und „Reinigungsmittel“ zu erkennen, welche sich in den drei abgegrenzten Bereichen des Hauptmenüs wieder finden.

Im oberen Teil „Allgemein“ befindet sich neben allgemeinen Informationen über den eingeloggteten Anbieter der Link zum Bearbeiten der Stammdaten. Darunter werden alle bereits eingepflegten Reinigungsanlagen des Anbieters mit Bezeichnung, Vorschau-Bild und Anzahl der dazu gespeicherten Reinigungsbeispiele aufgelistet. Im unteren Bereich befinden sich die Reinigungsmittel mit Bezeichnung und Typ. Über die jeweiligen Bereiche gelangt der Anbieter zu Untermenüs, welche in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben werden.

The screenshot shows a Netscape browser window displaying the 'Hauptmenü' (Main Menu) of a web application. The browser title is 'Home-Seite -Netscape' and the address bar shows 'http://129.217.219.198/anbieter_menu/hersteller-home.php'. The page header includes 'UNIVERSITÄT DORTMUND', 'Fakultät Maschinenbau', and 'Fachgebiet Maschinenelemente'. The main content is titled 'Hauptmenü' and contains three sections: 'Allgemein', 'Anlagen', and 'Reinigungsmittel'.

Allgemein

<ul style="list-style-type: none"> Stammdaten bearbeiten Kurzanleitung Ausloggen 	Universität Dortmund, Fachgebiet Maschinenelemente	Username:	parts2clean
		Letzter Login:	2003-12-11 14:16:26
	Herr Dipl.-Ing. Mathias Wüllstein	Anlagen:	1
		gereinigte Teile:	1
		Reinigungsmittel:	1

Anlagen

Name	Foto	gereinigte Teile	
Anlage zur wässrigen Kleinstteilreinigung		1	Details bearbeiten löschen

neue Anlage [Hilfe](#)

Reinigungsmittel

Name	Typ	
ME 42	Neutralreiniger	Details bearbeiten löschen

neues Reinigungsmittel [Hilfe](#)

Bild 4.19 Anbieter-Hauptmenü

Um die Benutzung des Systems sowohl für Anbieter als auch für Anwender übersichtlicher zu gestalten, wurde ein Farbcode eingeführt, welcher durchgängig in allen Bereichen der Benutzeroberfläche eingehalten wird. Dabei werden Informationen zu Anbietern (Kontaktdaten usw.) grau hinterlegt, Informationen zu Reinigungsanlagen blau, zu Reinigungsbeispielen grün und zu Reinigungsmitteln orange.

Dementsprechend ist in **Bild 4.19** der obere Bereich grau und der untere orange hinterlegt. Der mittlere Bereich ist blau gefärbt mit Ausnahme der Spalte für die Anzahl der zu der Anlage gespeicherten gereinigten Teile, welche wiederum grün hinterlegt ist.

4.4.3 Stammdaten-Menü

Durch Klick auf „Stammdaten bearbeiten“ im oberen Bereich des Hauptmenüs gelangt der Anbieter in das in **Bild 4.20** dargestellte Stammdaten-Menü. Hier kann er seine Kontaktdaten editieren aber auch seine Logindaten bearbeiten, also einen neuen Benutzernamen festlegen oder das Passwort ändern.

Stammdaten einsehen / verändern

Stammdaten von Username: parts2clean

Hinweise:
Hier können Sie ihre allgemeinen Firmendaten verändern. [Hilfe](#)

Firmendaten:

Firmenname:

Straße / Nr:

PLZ / Ort:

Land:

Homepage:

Ansprechpartner:

Telefon:

Fax:

email:

Freitext:
(max. 1024 Zeichen)

Zugangsdaten:

Hinweis: Das Passwort muss mindestens 5 Zeichen lang sein. Wenn Sie beide Felder leer lassen, bleibt das Passwort unverändert.

Neues Passwort:

Neues PW bestätigen:

Fertigstellen

Bild 4.20 Stammdatenmenü

4.4.4 Anlagen-Menü

Im mittleren Bereich des Anbieter-Hauptmenüs (s. **Bild 4.19**) sind die in der Datenbank enthaltenen Reinigungsanlagen des Anbieters aufgelistet. Hinter jeder Anlage erscheinen drei Buttons. „Details“ ruft ein Fenster auf, in dem alle zu der Anlage gehörenden Daten aufgelistet sind, so wie sie später dem Anwender präsentiert werden (s. Kapitel 4.9.1). Der Button „löschen“ entfernt die jeweilige Anlage aus der Datenbank. Durch Klick auf „bearbeiten“ gelangt der Anbieter in das in **Bild 4.21** dargestellte Anlagenmenü.

Damit befindet er sich eine Hierarchieebene tiefer in der in **Bild 4.15** dargestellten Datenstruktur. Dementsprechend ist das Menü zweigeteilt in die Bereiche „Allgemeine Daten der Anlage“ (oben, blau hinterlegt) und „Beispiele für gereinigte Teile“ (unten, grün hinterlegt).

Die „Allgemeinen Daten der Anlage“ sollen die Anlage gemäß Kapitel 4.2.5 beschreiben. Gemäß **Bild 4.15** gliedert sich dieser Teil in eine allgemeine Beschreibung und in die Fähigkeiten der Anlage. Zum Aufrufen der beiden zugehörigen Eingabeformulare sind im oberen Bereich des Anlagenmenüs zwei große Knöpfe vorhanden.

UNIVERSITÄT DORTMUND
Fakultät Maschinenbau
Fachgebiet Maschinenelemente
www.bauteilreinigung.de

Anlage bearbeiten

zurück zum Hauptmenü [Hilfe](#)

Allgemeine Daten der Anlage: Anlage zur wässrigen Kleinstteilreinigung [Bezeichnung ändern](#)

Beschreibung der Anlage ansehen/ändern

Anlagefähigkeiten definieren

Angewendete(s) Verfahren:
Trommelreinigung, Schleudern

Investitionskosten: 16000 bis 16000 Euro
Lohnreinigung: -

Wichtiger Hinweis: Wenn sie die Anlagefähigkeiten nicht definieren, kann die Anlage bei einer Suchanfrage nicht gefunden werden!

Beispiele für gereinigte Teile auf dieser Anlage

Beispielname	Vorher	Nachher	Verschmutzung (Auszug)	
Kleinstkugeln			Läpp- Hon- und Poliermittel, Staub aus der Umwelt, ...	Details bearbeiten löschen Reiniger hinzufügen/bearbeiten
Neues Reinigungsbeispiel				

zurück zum Hauptmenü

Bild 4.21 Anlagenmenü

Anlagenbeschreibung

[Hilfe](#)

Name der Anlage: Anlage zur wässrigen Kleinstteilreinigung

Angewendete Reinigungsverfahren

Naßverfahren	Strahlverfahren	mechanische Verfahren	thermische Verfahren	Sonderverfahren
<input type="checkbox"/> Tauchreinigung <input type="checkbox"/> Spritzreinigung <input type="checkbox"/> Druckumfluten <input type="checkbox"/> Powerwasher <input type="checkbox"/> Abkochen <input type="checkbox"/> Dampfenfetten <input checked="" type="checkbox"/> Trommelreinigung <input type="checkbox"/> Bürstenreinigung <input type="checkbox"/> Wischreinigung <input type="checkbox"/> Ultraschallreinigung	<input type="checkbox"/> Druckluftstrahlen <input type="checkbox"/> Schleuderstrahlen <input type="checkbox"/> Feuchtstrahlen <input type="checkbox"/> Nassdruckluftstrahlen <input type="checkbox"/> Schlammstrahlen <input type="checkbox"/> Druckflüssigkeitsstrahlen <input type="checkbox"/> Dampfreinigungsstrahlen <input type="checkbox"/> CO2-Schnee-Strahlen <input type="checkbox"/> CO2-Pellets-Strahlen	<input type="checkbox"/> Abwischen <input type="checkbox"/> Bürsten/Fegen <input checked="" type="checkbox"/> Schleudern <input type="checkbox"/> Ausdrücken <input type="checkbox"/> Vibrationsreinigung <input type="checkbox"/> Reinigungsschleifen <input type="checkbox"/> Abkratzen/Abschaben <input type="checkbox"/> Gleitschleifen <input type="checkbox"/> Ausklopfen <input type="checkbox"/> Abblasen <input type="checkbox"/> Absaugen <input type="checkbox"/> Stosswellenreinigung	<input type="checkbox"/> Flammstrahlen <input type="checkbox"/> Ofenreinigung <input type="checkbox"/> Laserstrahlreinigung <input type="checkbox"/> Wirbelbettreinigung <input type="checkbox"/> Salzbadreinigung	<input type="checkbox"/> UV-Licht-Reinigung <input type="checkbox"/> Blitzlampenreinigung <input type="checkbox"/> Plasmareinigung <input type="checkbox"/> Biologische Reinigung <input type="checkbox"/> elektrochem. Reinigung <input type="checkbox"/> Reinigen mit flüssig. CO2 <input type="checkbox"/> Reinigen mit überkrit. CO2 <input type="checkbox"/> Vakuumentölen

(Hier können Sie, falls Ihr Verfahren nicht aufgelistet ist, einen neuen Namen eingeben)

Foto der Anlage

Foto beibehalten
 Foto löschen
 neues Foto hochladen: [Durchsuchen...](#)

Hinweis: Es werden nur Fotos im JPEG oder PNG Format unterstützt! Die Größe ist auf 1,5 MB beschränkt! [Tips](#)

Investitionskosten

Wir bieten die Anlage zum Kauf an.
 Die ungefähren Investitionskosten (z.B. je nach Ausstattung):
 Von 16000 bis 16000 Euro

Bild 4.22 Auszug aus dem Eingabeformular zur Beschreibung der Anlage

Der Button „Beschreibung der Anlage ansehen/ändern“ ruft das in **Bild 4.22** auszugsweise dargestellte Eingabeformular für die Anlagenbeschreibung auf.

Anlagenfähigkeiten definieren - Netscape

Angaben zum Bauteil

Längste Abmessung

unter 1 mm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
zwischen 1 mm und 10 mm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
zwischen 10 mm und 100 mm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
zwischen 100 mm und 500 mm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
zwischen 500 mm und 1000 mm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
zwischen 1000 mm und 5000 mm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
über 5000 mm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Coilware	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Zusatzangaben zu Abmessungen:

Bauteilgewicht

unter 1 g	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
zwischen 1 g und 100 g	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
zwischen 100 g und 1 kg	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
zwischen 1 kg und 10 kg	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
über 10 kg	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bauteil wird nicht bewegt	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Zusatzangaben zum Gewicht:

Eignung für...

... schöpfende Bauteile?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
... lokal verschmutzte Bauteile?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
... Bauteile mit engen Spalten (< 1 mm)?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
... gesinterte/pulvergepresste Bauteile?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
... Bauteile als Schüttgut?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
... druckempfindliche (> 50 bar) Bauteile?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
... abrasionsempfindliche Oberflächen?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Zusatzangaben:

Bauteilwerkstoff

Unlegierter Stahl/Baustahl	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rostfreier Stahl	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gehärteter/Angelassener Stahl	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grauguss/Temperguss	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Aluminium(legierung)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Magnesium(legierung)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Messing	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bronze	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kupfer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zink/Cadmium	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zinn/Blei	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Titan/Zirkon	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Glas/Keramik	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kunststoff	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Bild 4.23 Eingabe der Anlagefähigkeiten

Der Button „Anlagefähigkeiten definieren“ führt zu dem in **Bild 4.23** dargestellten Menü. Hier kann der Anbieter zu jeder der in **Bild 4.6** dargestellten Klassen für die verschiedenen Bewertungskategorien die Eignung der Anlage nach dem System „+0/-“ eingeben (s. Kapitel 4.2.2.5). Die jeweilige Eignung kann komfortabel per Radiobutton ausgewählt werden, so dass sich ein übersichtliches Eignungsprofil für die Anlage ergibt. Zu jeder Kategorie können dabei zusätzlich Erläuterungen in Form eines Freitextes eingegeben werden, welche es später dem Anwender ermöglichen, die Hintergründe für die Eignungsangaben nachzuvollziehen.

4.4.5 Reinigungsbeispiel-Menü

Durch die in **Bild 4.22** und **Bild 4.23** dargestellten Menüs wird der gesamte Bereich „Anlagenbeschreibung“ aus **Bild 4.15** abgedeckt. Für den Bereich „Beispiele für gereinigte Teile“ wiederum wird ein weiteres Eingabeformular zur Verfügung gestellt, welches aus dem Anlagenmenü (**Bild 4.21**) aufgerufen wird. Dort sind im unteren Bereich die zur jeweiligen Anlage gehörenden Reinigungsbeispiele aufgelistet. Analog zu der Auflistung der Anlagen im Hauptmenü (**Bild 4.19** in Kapitel 4.4.2) gibt es auch hier drei Buttons „Details“, „bearbeiten“ und „löschen“.

Über den „bearbeiten“-Button gelangt der Anbieter in das in **Bild 4.24** dargestellte Eingabeformular. Hier ist nur ein Teil der zahlreichen Eingabefelder zu sehen. Ein weiterer Teil, nämlich Angaben zu Kosten und Durchsatz, wurde bereits in **Bild 4.10** in Kapitel 4.2.3.2 betrachtet. Es handelt sich um das Formular zur Erfassung der Lebenslaufkosten der Reinigungsanlage in Verbindung mit dem betrachteten Reinigungsbeispiel.

The screenshot shows a Netscape browser window with the title 'Beispiel für gereinigte Teile bearbeiten - Netscape'. The main content is a form titled 'Eingabeformular zur Anpassung des Reinigungsbeispiels'. It includes a 'Hinweise' section, a 'Allgemeine Daten' section with fields for 'Name dieses Reinigungsbeispiels' (Kleinstkugeln) and 'zugehörige Anlage' (Anlage zur wässrigen Kleinstteilreinigung), and a section 'a) Angaben zum Bauteil' with various input fields and radio buttons for part characteristics. At the bottom, there is a section for 'Auswahl des/der Bauteilwerkstoffe(s)' with checkboxes for 'Unbekannt / variiert', 'unlegierter Stahl / Baustahl', and 'rostfreier Stahl'.

Bild 4.24 Angaben zum Reinigungsbeispiel

Die Verwaltung der in einem Reinigungsbeispiel verwendeten Reinigungsmittel erfolgt in einem Extra-Formular, da die Anzahl dieser Mittel aufgrund der Konstruktion mit der Verbindungs-Entität (s. Kapitel 4.3.2) beliebig variieren kann. Dieses Formular wird durch Anklicken des Buttons „Reiniger hinzufügen/bearbeiten“ hinter dem entsprechenden Reinigungsbeispiel im Anlagenmenü (**Bild 4.21**) aufgerufen. Es ist in **Bild 4.25** dargestellt.

Hier sind sämtliche bereits als verwendet eingegebene Reiniger aufgelistet. Der Button „Reinigungsmittel hinzufügen“ führt zu der in **Bild 4.26** dargestellten Suchmaske, mit deren Hilfe die Datenbank nach dem gewünschten Reinigungsmittel durchsucht werden kann.

Ein mögliches Suchergebnis zeigt **Bild 4.27**. Ist der gewünschte Reiniger enthalten, kann er hier angewählt und der Liste der verwendeten Reinigungsmittel hinzugefügt werden. Damit ist die in **Bild 4.14** dargestellte Verknüpfung zwischen Reinigungsbeispielen und Reinigungsmitteln hergestellt.



Bild 4.25 Verwalten der in einem Reinigungsbeispiel verwendeten Reinigungsmittel

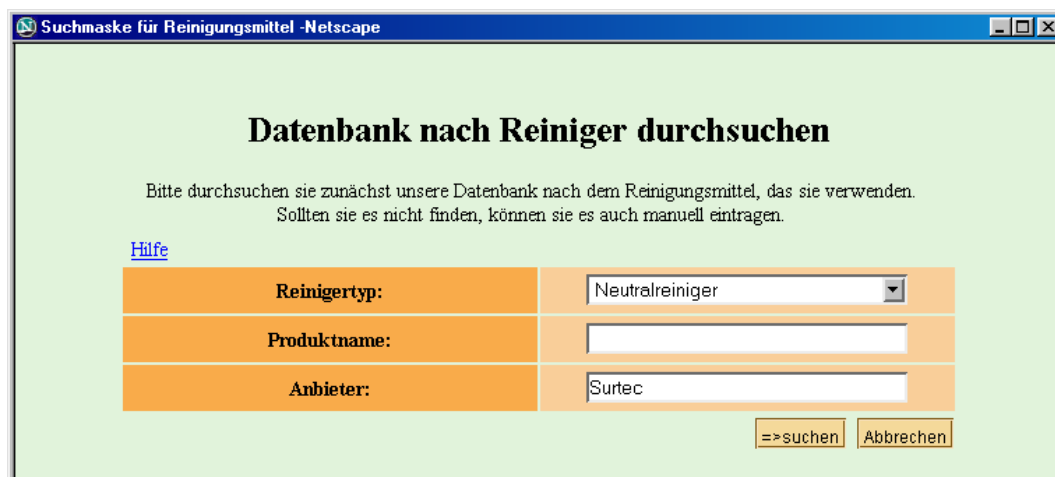


Bild 4.26 Suchmaske für verwendete Reinigungsmittel

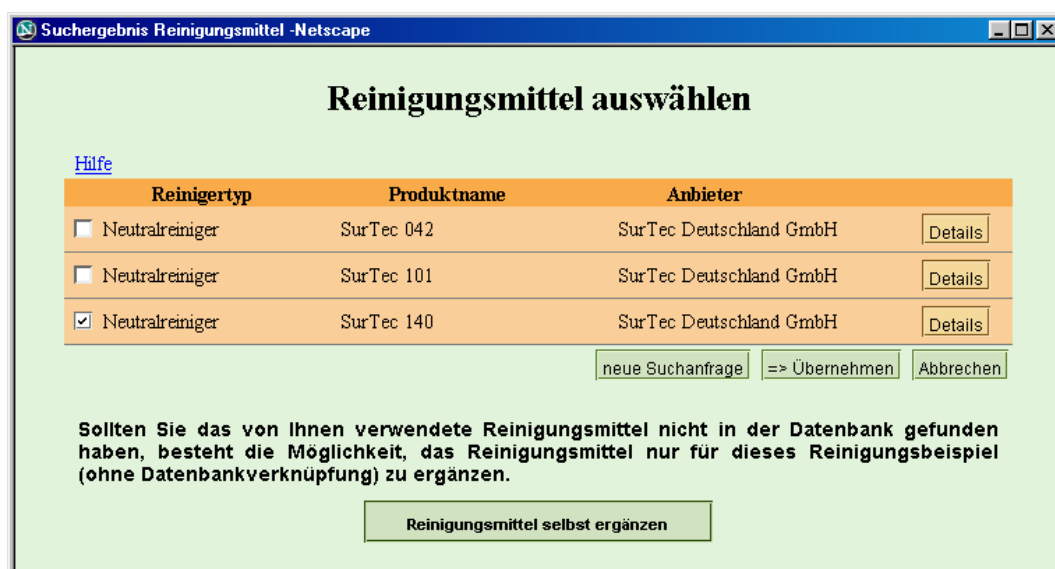


Bild 4.27 Suchergebnis für mögliche verwendete Reinigungsmittel

Ansonsten kann über den Button „Reinigungsmittel selbst ergänzen“ das in **Bild 4.28** dargestellte Formular aufgerufen werden, in welchem eine grobe Beschreibung des Reinigers mit Typ, Produktbezeichnung und dem Namen des Anbieters erfolgen kann.

Bild 4.28 Grobe Angaben zum nicht in der Datenbank enthaltenen Reiniger

4.4.6 Reinigungsmittel-Menü

Die in Kapitel 4.4.4 und 4.4.5 erläuterten Menüs decken den gesamten Bereich der Anlagen- daten ab. Der in **Bild 4.15** rechts dargestellte Bereich „Reinigungsmittel“ ist ähnlich aufgebaut wie der Bereich „Anlagen“, wobei jedoch die Reinigungsbeispiele wegfallen. Dement- sprechend einfacher strukturiert ist auch das Reinigungsmittel-Menü, welches aus dem Hauptme- nü (**Bild 4.19**) erreicht wird, indem im unteren Bereich der hinter einem Reinigungsmittel be- findliche „bearbeiten“-Button angeklickt wird.

Bild 4.29 Reinigungsmittel-Menü

Das sich öffnende Menü ist in **Bild 4.29** dargestellt. Hier gibt es, ähnlich wie im Anlagenme- nü, zwei Buttons, die zu Formularen führen, in denen der Reiniger näher beschrieben wird und die Reinigerfähigkeiten eingegeben werden können. Diese ähneln den in **Bild 4.22** und

Bild 4.23 dargestellten Formularen aus dem Anlagenbereich und sollen daher hier nicht näher beschrieben werden. Zusammen ermöglichen sie die vollständige Eingabe der in Kapitel 4.2.7 beschriebenen Daten zu Reinigungsmitteln.

Mit den in Kapitel 4.4.2 bis 4.4.6 beschriebenen Menüs ist also die gesamte in **Bild 4.15** dargestellte Datenstruktur abgebildet, und der Anbieter kann sein Angebotsspektrum umfassend und detailliert in die Datenbank einpflegen. Durch den internetbasierten Ansatz kann jeder Anbieter kontinuierlich an der Aktualität der Datenbank arbeiten.

4.5 Administration der Datenbank

Es wurden einige Werkzeuge entwickelt, um die Administration der Datenbank zu erleichtern. Diese sind passwortgeschützt und daher nur dem befugten Administrator zugänglich. Die wichtigsten sind die Anbieterverwaltung und die Serienmailfunktion. Sie sollen in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert werden.

4.5.1 Anbieterverwaltung

In der Anbieterverwaltung werden alle in der Datenbank registrierten Anbieter aufgelistet. Einen Ausschnitt aus dieser Liste zeigt **Bild 4.30**. Zu jedem Anbieter gibt es vier Buttons, die im Folgenden kurz erläutert werden sollen.



Bild 4.30 Anbieterverwaltung

Der Button „**mehr Infos**“ ruft ein Fenster auf, in dem alle zu dem Anbieter enthaltenen Daten übersichtlich aufgeführt werden. Diese Ansicht erhält auch der Anwender, wenn er nähere Informationen zu einem Anbieter aufruft (s. Kapitel 4.9.1).

„**Mail senden**“ öffnet ein Formular, in dem eine Nachricht an den Ansprechpartner der entsprechenden Firma gesendet werden kann. Dies ist ein schneller und komfortabler Weg, mit dem Anbieter in Kontakt zu treten.

Mit Klick auf „**Account löschen**“ können alle Daten des betreffenden Anbieters aus der Datenbank gelöscht werden. Da dies ein folgenschwerer Eingriff ist, erscheint zunächst eine Sicherheitsabfrage, in der sich der Administrator nochmals mittels Passwort autorisieren muss.

Mit Hilfe des Buttons „**einloggen**“ kann sich der Administrator in den Datenbankbereich des jeweiligen Anbieters einloggen. Er gelangt in dessen Anbieter-Hauptmenü (**Bild 4.19**). Von dort aus hat er Zugriff auf alle in Kapitel 4.4.2 bis 4.4.6 beschriebenen Formulare und kann damit Daten eingeben, ändern und löschen, als wäre er der Anbieter selbst.

4.5.2 Serienmail

Ein weiteres Administrationswerkzeug ist die Serienmailfunktion. Sie ermöglicht es dem Administrator, an alle oder auch an ausgewählte Anbieter aus der Datenbank eine Mail gleichen Inhalts zu schreiben, wobei für personalisierte Daten (beispielsweise Anrede und Name des Ansprechpartners) Variablen eingesetzt werden können. Ein beispielhaft ausgefülltes Formular ist in **Bild 4.31** dargestellt.

Serienmail erstellen

Betreff: Ihre Registrierung bei www.bauteilreinigung.de

Kopfzeile: Guten Tag !ansprechpartnertyp! !ansprechpartner!

Platzhalter einfügen:
!ansprechpartner!
!ansprechpartnertyp!

Nachricht:

Vielen Dank, dass Sie sich mit Ihrem Unternehmen !firmenname! in der Anbieterdatenbank von www.bauteilreinigung.de registriert haben!

Als nächstes sollten Sie sich nun mit Ihrem Benutzernamen !username! und dem per Mail empfangenen Passwort einloggen, um Daten aus Ihrem Angebotsspektrum in die Datenbak einzupflegen.

Sollten Sie Ihr Passwort verloren haben, können Sie sich auf der Portalseite www.bauteilreinigung.de durch Klick auf "Passwort vergessen" ein neues zusenden lassen.

Platzhalter einfügen:
!username!
!firmenname!
!ansprechpartner!
!ansprechpartnertyp!

Fußzeile: Mit freundlichen Grüßen,
Ihr Bauteilreinigungsportal

Serienmail senden an:

- alle Hersteller
- Hersteller aus Phase 1, die sich noch nicht eingeloggt haben
- Hersteller, die sich registriert haben jedoch noch nicht eingeloggt waren
- Hersteller, die noch Anlagen oder Reinigungsmittel aus Phase 1 haben
- Hersteller, die keine Anlagen und keine Reinigungsmittel eingetragen haben
- Hersteller, die Anlagen oder Reinigungsmittel haben, jedoch keine aus Phase 1

weiter zurück

Bild 4.31 Serienmail an Anbieter, die sich nach der Registrierung nicht eingeloggt haben

Diese ist an Anbieter gerichtet, die sich neu für die Datenbank registriert, danach jedoch nicht mit ihrem per Mail empfangen Passwort in ihren Datenbankbereich eingeloggt haben. Dementsprechend werden sie aufgefordert, sich einzuloggen und Daten aus ihrem Angebotspektrum einzupflegen. Als Platzhalter werden akzeptiert:

- „!username!“ für den Benutzernamen des jeweiligen Anbieters
- „!firmenname!“ für den Namen des Unternehmens
- „!ansprechpartnertyp!“ für die Anrede („Herr“ oder „Frau“)
- „!ansprechpartner!“ für den Namen des Ansprechpartners

Im unteren Bereich „Serienmail senden an:“ wird das Auswahlkriterium für die Adressaten festgelegt. Dabei können unter anderem auch Hersteller aus der so genannten „Phase 1“ angesprochen werden, deren Daten aus der alten Herstellerdatenbank von www.bauteilreinigung.de übernommen wurden. Dieser Sachverhalt wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

4.6 Integration in das Portal www.bauteilreinigung.de

4.6.1 Neue Portalseite

Wie in Kapitel 4.1.2 erläutert, soll die beschriebene neue Datenbank in das bestehende Fachinformationssystem [www.bauteilreinigung.de /NN04/](http://www.bauteilreinigung.de/NN04/) integriert werden und dort die vorhandene rudimentäre Herstellerdatenbank ersetzen. Dabei sollen die Wissensdatenbank sowie das Auswahlsystem für Reinigungsverfahren erhalten bleiben, während die Datenbanksuche erneuert wird und ein neues Auswahlsystem für Reinigungsanlagen und Reinigungsmittel geschaffen werden muss. Zur leichten Zugänglichkeit, sowohl bestehender als auch neuer Funktionen, wurde eine übersichtliche Portalseite für das integrierte System geschaffen, welche in **Bild 4.32** dargestellt ist.

Links oben befindet sich der Login-Bereich, in dem sich die Anbieter, wie in Kapitel 4.4.1 beschrieben, in ihren Datenbankbereich einloggen können. Der Rest der Seite dient als Benutzeroberfläche für die Anwender. Er gliedert sich vorwiegend in die drei Bereiche „Auswahlssystem“, „Datenbanksuche“ und „Wissensbasis“, welche über große Buttons im mittleren Bereich der Seite zugänglich sind und im Folgenden näher beschrieben werden.

Das **Auswahlssystem** ist die Zusammenfassung des bereits bestehenden Auswahlsystems für Reinigungsverfahren und des neu zu erstellenden Auswahlsystems für Reinigungsanlagen und -mittel. Da in beiden Fällen zunächst die Reinigungsaufgabe beschrieben werden muss, basieren beide Auswahlssysteme auf demselben Fragebogen. Näheres dazu findet sich in Kapitel 4.8.

Die **Datenbanksuche** führt zu komfortablen Suchwerkzeugen, mit denen die oben beschriebene Datenbank nach verschiedensten Kriterien durchsucht werden kann. Diese Werkzeuge sind in Kapitel 4.7 beschrieben.

Die **Wissensbasis** ist ein umfangreiches HTML-Lexikon zum Thema industrielle Bauteilreinigung. Bis auf Design-Modifikationen wurden an der in /KLO03/ beschriebenen Wissensbasis keine Änderungen vorgenommen. Sie dient jedoch auch bei der Datenbanksuche und dem neuen Auswahlsystem für Anlagen und Reiniger der Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit, da immer wieder erläuternde Links zur Wissensbasis aufgenommen werden (s. Kapitel 4.9.1).

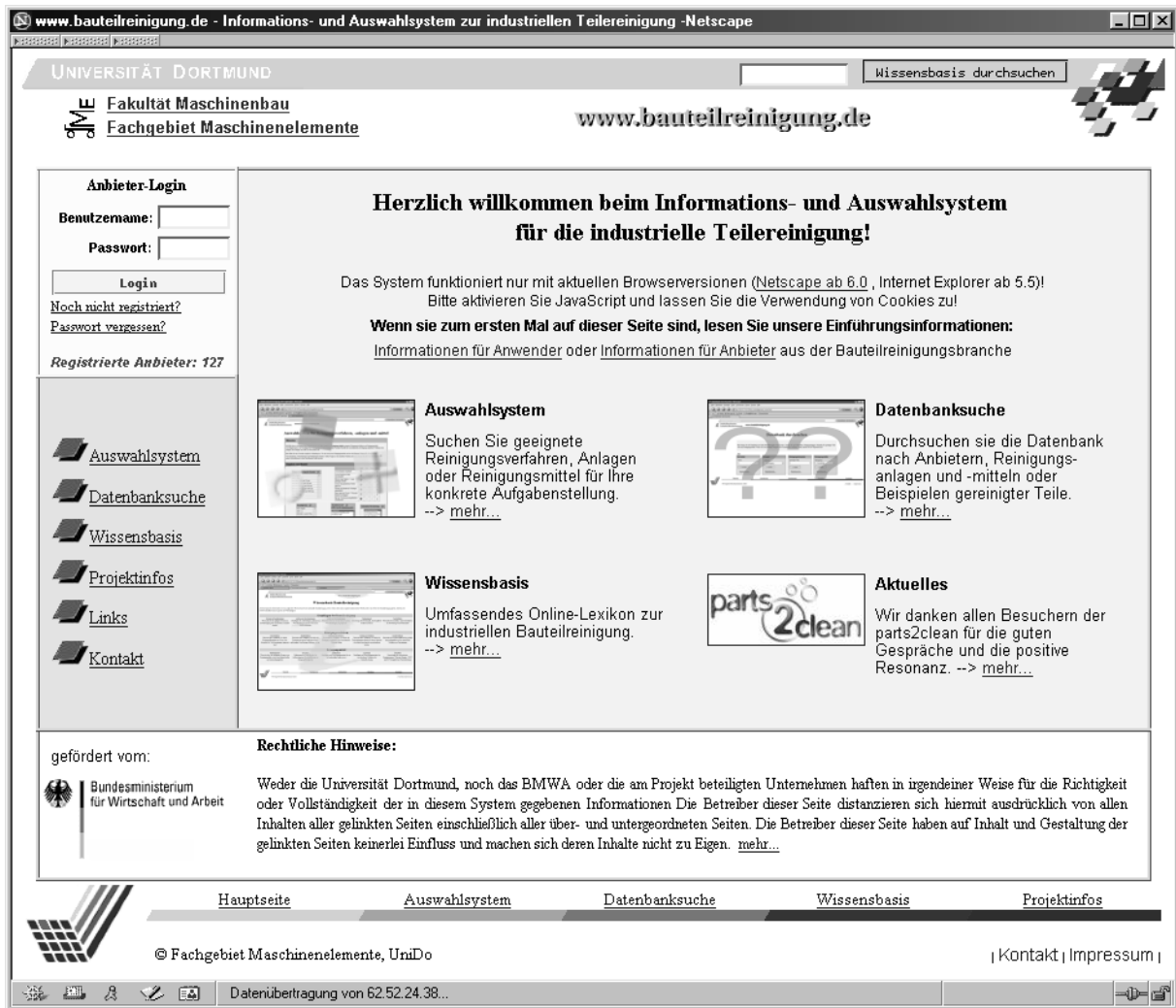


Bild 4.32 Neue Portalseite www.bauteilreinigung.de

Ein Durchsuchen der Wissensbasis nach Stichwörtern ist nun von beinahe jeder Seite des Systems möglich, da eine neue Kopfzeile erstellt wurde, in der sich ein Eingabefeld und der entsprechende „Wissensbasis durchsuchen“-Button befinden (s. Bild 4.32).

Zusammenfassend ist die Struktur des Anwenderbereichs, wie er über die Portalseite zugänglich ist, in Bild 4.33 dargestellt.

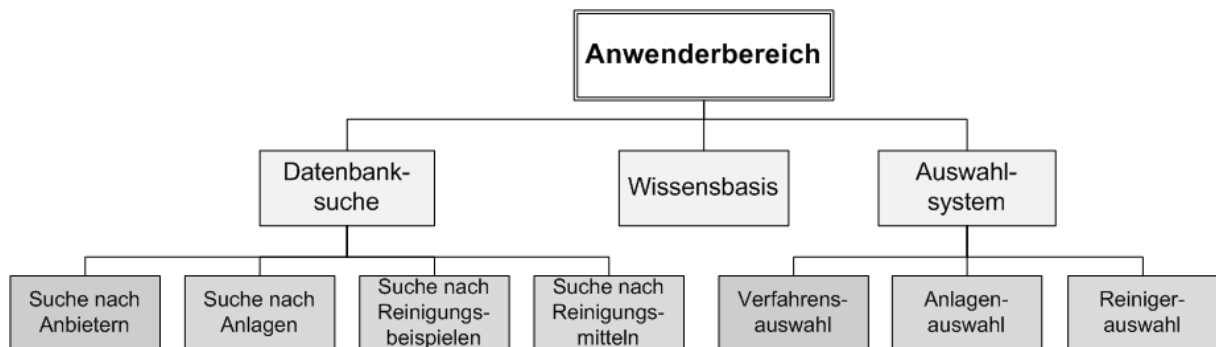


Bild 4.33 Die Struktur des Anwenderbereichs

4.6.2 Datenübernahme aus der alten Herstellerdatenbank

Wie bereits in Kapitel 4.1.2 beschrieben wurde, wird die in dem alten Fachinformationssystem enthaltene Herstellerdatenbank durch die neu erstellte Anbieterdatenbank ersetzt. Dabei sollen allerdings die bereits vorhandenen Daten erhalten bleiben.

Dies ist bei den Kontaktdaten der bereits eingetragenen Anbieter kein Problem, da diese ohne Weiteres in die neue Datenstruktur überführt werden können (s. Kapitel 4.2.8). Daneben enthielt die alte Datenbank jedoch noch die Reinigungsverfahren sowie die Typen von Reinigungsmitteln, welche von der jeweiligen Firma angeboten werden. Diese Angaben lassen sich nicht so leicht übernehmen, da die neue Datenbank auf konkreten Reinigungsanlagen bzw. Reinigungsmitteln basiert.

Zur Lösung dieses Problems werden für jeden in die neue Datenbank überführten Anbieter Dummy-Anlagen und Dummy-Reinigungsmittel erzeugt. Dabei wird für jedes Reinigungsverfahren aus dem Angebotsspektrum des Anbieters eine Anlage angelegt, die nach diesem Verfahren arbeitet. Zur Kennzeichnung wird die Anlage mit dem Namen des Verfahrens und dem Zusatz „aus_Phase1“ benannt. Hat beispielsweise ein Anbieter in der alten Datenbank angegeben, das Tauchreinigungsverfahren zu beherrschen, wird in der neuen Datenbank für ihn eine Anlage mit der Bezeichnung „Tauchreinigung_aus_Phase1“ angelegt. Eine Dummyanlage erhält keine weiteren Beschreibungen, bis auf das Verfahren, nach dem sie arbeitet, im Beispiel „Tauchreinigung“. Mit den Reinigungsmitteln wird analog verfahren, indem für jeden angebotenen Reinigertyp ein Dummy-Reinigungsmittel erzeugt wird, beispielsweise „Neutralreiniger_aus_Phase1“.

Da weder die Dummy-Anlagen noch die Dummy-Reiniger mit Fähigkeiten versehen wurden (jede Eignung hinsichtlich der in **Bild 4.6** bzw. **Bild 4.13** dargestellten Klassen ist mit „-“ angegeben), können sie nicht vom Auswahlsystem berücksichtigt werden (s. Kapitel 4.6). Auch eine Datenbanksuche (s. Kapitel 4.7) nach diesen Anlagen macht kaum Sinn, da keine weiteren Informationen hinterlegt sind.

Jedoch sind die Dummy-Einträge dennoch wichtig, um die in der Wissensbasis enthaltene Funktion der Marktübersichten zu erhalten. Dort sind für jedes Reinigungsverfahren und jeden Reinigertypen Informationsseiten hinterlegt, wobei auch jeweils eine Anbieterübersicht aufgerufen werden kann. Diese basierte auf der nun ersetzten Datenbank, so dass die Funktion neu programmiert werden muss. Dabei muss die Datenbank jeweils nach Herstellern durchsucht werden, die mindestens eine Anlage bzw. einen Reiniger gespeichert haben, die nach dem gewünschten Verfahren arbeitet bzw. der dem gesuchten Reinigertyp entspricht. Ob es sich dabei um Elemente „_aus_Phase1“ handelt oder um neue Einträge, wird nicht unterschieden. Damit handelt es sich um eine spezielle Form der Expertensuche nach Herstellern, wie sie in Kapitel 4.7.2 beschrieben wird. Beispielhaft ist in **Bild 4.34** ein Ausschnitt aus der Marktübersicht zum Verfahren „Gleichschleifen“ dargestellt.

The screenshot shows a Netscape browser window displaying a search results page. The page header includes 'UNIVERSITÄT DORTMUND', 'Fakultät Maschinenbau', 'Fachgebiet Maschinenelemente', and the website 'www.bauteilreinigung.de'. The search results are titled 'Marktübersicht zum Verfahren Gleitschleifen' and indicate that the query returned 6 hits. A 'zurück' button is visible in the top right of the results area.

Anschrift	Beschreibung
MEA Maschinen GmbH Ratinger Landstrasse 80 40629 Düsseldorf Tel.: 49 (0)2104 5577 Fax: 49 (0)2104 5763 Email: info@mea-info.com Webpage: http://www.mea-maschinen.de	"Industrielle Waschanlagen zur Entfettung, Metallteile Reinigung, diversen Teilereinigung. Anlagen zur Oberflächenreinigung / Oberflächenbehandlung in den Bereichen Metalverarbeitung / Metallbearbeitung" Phosphatieren / Konservieren / Passivierung / Entlöten / Entlackung .. Entlötungsanlagen, Phosphatieranlagen, Ultraschallanlage,
MOC Danner GmbH Wiesenstraße 9 72119 Ammerbuch - Altingen Tel.: 07032-72011 Fax: 07032-76350 Email: moc.danner@t-online.de Webpage:	
Rösler Oberflächentechnik GmbH Memmelsdorf, Vorstadt 1 96190 Untermmerzbach Tel.: 09533/924-0 Fax: 09533/924 300 Email: info@rosler.com Webpage: http://www.rosler.com	Die Rösler Oberflächentechnik GmbH ist als Komplettanbieter internationaler Marktführer bei der Herstellung von Gleitschiffanlagen und Strahlanlagen sowie Verfahrenstechnologie für die rationelle Oberflächenbearbeitung von Metallen und anderen Werkstoffen. Zur Rösler - Gruppe gehören neben den deutschen Werken in Memmelsdorf und Hausen
Spaleck Oberflächentechnik Schlavenhorst 117 46395 Bocholt	Maschinen und Anlagen zum Gleitschleifen, Verfahrensmittel, Chips, Compounds, Fliehkraftanlagen, Rundtrogvibratoren, Durchlaufanlagen, Rundtrogtrockner, Heißlufttrockner, Abwasserreinigungsanlagen, Abwasserfließschnecken

Bild 4.34 Ausschnitt aus der Marktübersicht zum Verfahren Gleitschleifen

4.7 Durchsuchen der Datenbank

4.7.1 Standardsuche

Die Datenbanksuche kann gemäß der Datenstruktur (s. **Bild 4.15**) nach Anbietern, nach Reinigungsanlagen, nach Beispielen gereinigter Teile oder nach Reinigungsmitteln erfolgen. Die dazu erstellten Suchwerkzeuge unterteilen sich nach der Komplexität der zu berücksichtigenden Kriterien in eine Standard- und in eine Expertensuche.

Das Formular zur Standardsuche, welches über den Button „Datenbanksuche“ auf der Portal-seite (**Bild 4.32**) erreichbar ist, ist in **Bild 4.35** dargestellt. Hier finden sich für die vier möglichen gesuchten Elemente vier Kästen. Die Anbietersuche erfolgt nach Anbieternamen, die Anlagensuche nach dem verwendeten Verfahren, die Suche nach gereinigten Teilen nach der Bezeichnung der Teile, und die Suche nach Reinigungsmitteln erfolgt nach dem Reinigertyp. Jeder Kasten hat seinen eigenen „suchen“-Button, der die Suche nach dem jeweiligen Kriterium startet.



Bild 4.35 Standardsuche in der Datenbank

4.7.2 Expertensuche

In jedem Kasten befindet sich auch ein Link zur „Expertensuche“. Dieser ruft je nach gesuchtem Element einen der vier Suchdialoge in **Bild 4.36** (Anbieter), **Bild 4.37** (Reinigungsanlagen), **Bild 4.38** (Beispiele gereinigter Teile) oder **Bild 4.39** (Reinigungsmittel) auf. Hier können jeweils zahlreiche Kriterien bei der Suche berücksichtigt werden.

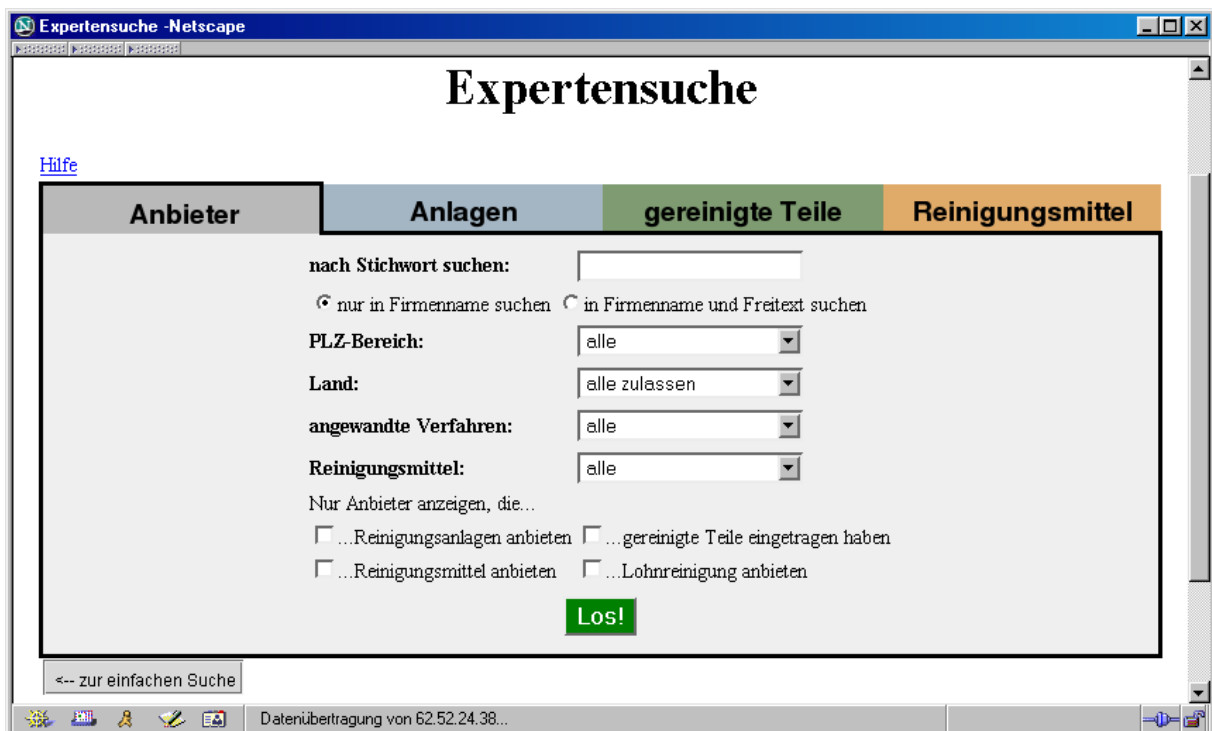


Bild 4.36 Expertensuche nach Anbietern

Die in **Bild 4.34** dargestellte Marktübersicht zum Verfahren „Gleichschleifen“ wird beispielsweise erzeugt, wenn in der Expertensuche nach Anbietern wie in **Bild 4.36** das „angewandte Verfahren“, „Gleichschleifen“ ausgewählt und der „Los!“-Button angeklickt wird.

Bild 4.37 Expertensuche nach Reinigungsanlagen

Bild 4.38 Expertensuche nach Beispielen gereinigter Teile



Bild 4.39 Expertensuche nach Reinigungsmitteln

4.7.3 Darstellung der Suchergebnisse

Unabhängig davon, ob mit der Standard- oder mit der Expertensuche gesucht wurde, werden die Suchergebnisse übersichtlich dargestellt. Dabei werden die Anwender, Anlagen, Reinigungsbeispiele oder Reinigungsmittel aufgelistet, und es werden Buttons zum Zugriff auf weitere zugehörige Daten zur Verfügung gestellt.

Ein Beispiel ist die Auflistung von Anbietern in **Bild 4.34**. Hier werden zu jedem Anbieter die wichtigsten Kontaktdaten mit aufgelistet. Sollen weitere Informationen, beispielsweise die in der Datenbank gespeicherten Reinigungsanlagen, Reinigungsbeispiele oder Reinigungsmittel dieses Anbieters, aufgelistet werden, muss der jeweilige „mehr Infos“-Button angeklickt werden.

Bild 4.40 zeigt eine Auflistung von Reinigungsanlagen. Neben der Anlagenbezeichnung und dem Namen des Anbieters werden die Investitionskosten, die angewendeten Reinigungsverfahren und der beschreibende Freitext angezeigt. Auch ein Vorschaubild ist vorhanden, bei dessen Anklicken ein Photo der Anlage im Großformat erscheint. In einer eigenen Spalte sind die Namen der zu der jeweiligen Anlagen gehörenden Reinigungsbeispiele aufgelistet. Auch hier ist ein „mehr Infos“-Button vorhanden, der zu einer Detailansicht der jeweiligen Anlagendaten führt.

Die Auflistung von Beispielen gereinigter Teile bzw. von Reinigungsmitteln ist ähnlich aufgebaut und soll daher nicht näher beschrieben werden. Auch hier kann zu jedem interessierenden Reinigungsbeispiel bzw. Reiniger eine detaillierte Ansicht aller dazugehörigen Daten abgerufen werden (s. auch Kapitel 4.9.1).

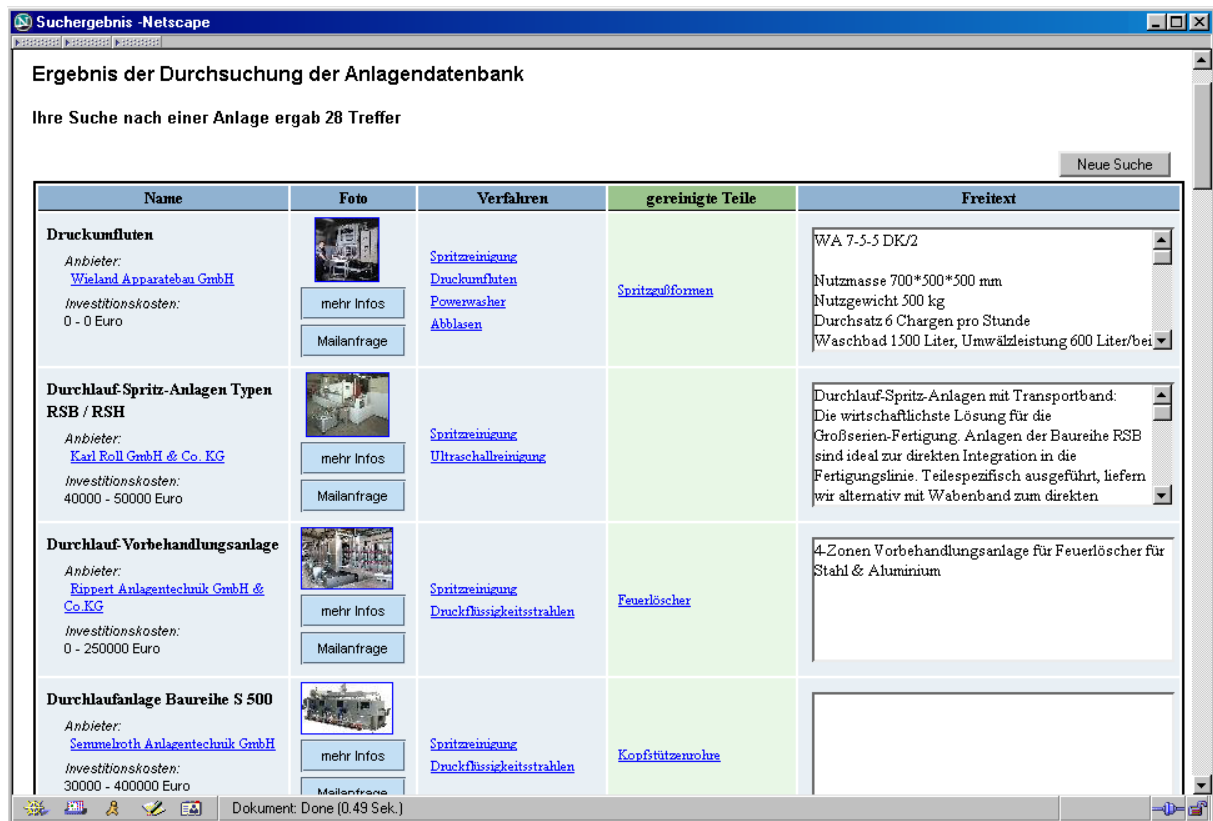


Bild 4.40 Ergebnis einer Suche nach Reinigungsanlagen

4.8 Auswahlssystem für Reinigungsanlagen und -mittel

4.8.1 Integration in den bestehenden Fragebogen

Um das alte und das neue Auswahlssystem reibungslos zusammenzuführen, basieren beide auf demselben Fragebogen, mit dem der Anwender seine Reinigungsaufgabe beschreibt. Dieser wird von der Portalseite (Bild 4.32) über den Button „Auswahlssystem“ aufgerufen. Einen Ausschnitt des Fragebogens zeigt Bild 4.41.

Hier kann der Anwender in jeder der in Bild 4.6 aufgeführten Kategorien Angaben machen, um sein Problem zu beschreiben. Zusätzlich können maximal zulässige Investitionskosten für den Anlagenkauf angegeben werden. Dabei werden nach /KLO03/ die Klassen „bis 500 €“, „bis 5.000 €“, „bis 25.000 €“, „bis 50.000 €“, „bis 250.000 €“ und „über 250.000 €“ unterschieden. Der Anwender hat auch in jeder Kategorie die Möglichkeit, keine Angabe zu machen, wobei der jeweilige Aspekt dann nicht bei der Auswahl berücksichtigt wird.

Am Ende des Fragebogens befinden sich die vier in Bild 4.42 dargestellten Buttons. Die oberen beiden starten die alten in /KLO03/ beschriebenen Auswahlssysteme, welche geeignete Reinigungsverfahren bzw. Reinigungsmitteltypen für die jeweilige Reinigungsaufgabe vorschlagen. Der linke untere Button „Anlagenauswahl“ sendet die Fragebogenangaben des Anwenders an das neue Auswahlssystem für Reinigungsanlagen, welches in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben wird. „ReinigerAuswahl“ schließlich startet das Auswahlssystem für Reinigungsmittel aus der Anbieterdatenbank, welches in Kapitel 4.8.4 erläutert wird.

Angaben zum Bauteil

Längste Abmessung des Bauteils

keine Angabe	<input type="radio"/>
unter 1 mm	<input type="radio"/>
zwischen 1 mm und 10 mm	<input type="radio"/>
zwischen 10 mm und 100 mm	<input type="radio"/>
zwischen 100 mm und 500 mm	<input type="radio"/>
zwischen 500 mm und 1000 mm	<input type="radio"/>
zwischen 1000 mm und 5000 mm	<input type="radio"/>
über 5000 mm	<input type="radio"/>
Coilware	<input type="radio"/>

	Info	Ja	Nein	k. A.
Ist das Bauteil schöpfend?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ist das Bauteil nur lokal verschmutzt?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Müssen enge Spalte (< 1 mm) gereinigt werden?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ist das Teil gesintert/aus Pulver gepresst?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Werden die Bauteile als Schüttgut gehandhabt?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kann statischer Druck > 50 bar ihr Bauteil beschädigen?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Hat das Teil abrasionsempfindliche Oberflächen?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Bauteilgewicht

keine Angabe	<input type="radio"/>
unter 1 g	<input type="radio"/>
zwischen 1 g und 100 g	<input type="radio"/>
zwischen 100 g und 1 kg	<input type="radio"/>
zwischen 1 kg und 10 kg	<input type="radio"/>
über 10 kg	<input type="radio"/>
Bauteil wird nicht bewegt	<input type="radio"/>

Bauteilwerkstoff
(STRG-Taste für Mehrfachauswahl)

- Unbekannt
- Unlegierter Stahl/Baustahl
- Rostfreier Stahl
- Gehärteter/Angelassener Stahl
- Grauguss/Temperguss
- Aluminium(legierung)
- Magnesium(legierung)
- Messing

Vorhandene Beschichtung

- Keine Beschichtung
- Anstrich/Lackierung
- Kunststoffbeschichtung
- Pulverbeschichtung
- Galvanischer Überzug
- Andere Beschichtung

Beschichtung entfernen

Angaben zum Verschmutzungszustand

Vorliegende Verschmutzung
(STRG-Taste für Mehrfachauswahl)

- Unbekannt
- Verseifbare Öle und Fette
- Nicht verseifbare Öle und Fette
- Wassermischbare KSS
- Nicht wassermischbare KSS
- Korrosionsschutzöle und Fette

Beurteilung der Schmutzmenge

keine Angabe	<input type="radio"/>
Bauteile stehen in Öl/Schmutz	<input type="radio"/>
Bauteile sind stark verschmutzt	<input type="radio"/>
Bauteile sind leicht verschmutzt	<input type="radio"/>
Bauteile sind nach Augenschein sauber	<input type="radio"/>

Reinheitsanforderungen

Bild 4.41 Ausschnitt aus dem Fragebogen zur Erfassung von Reinigungsaufgaben nach /KLO03/

Suche starten

Sie haben nun die Möglichkeit, sich für Ihr Reinigungsproblem geeignete Reinigungsverfahren, Reingertypen, Reinigungsanlagen oder Reinigungsmittel vorschlagen zu lassen. Benutzen Sie dazu einen der folgenden vier Buttons.

Verfahrensauswahl Reingertypauswahl

Infotexte mit Erläuterung zu den Einzelkriterien aktivieren?
(Nur für schnelle Internetanbindung empfohlen)

Anlagenauswahl Reinigerwahl

Bild 4.42 Starten eines der Auswahlssysteme

4.8.2 Anlagenauswahl

Das Anlagenauswahlssystem basiert auf dem in Kapitel 4.2.2 vorgeschlagenen Bewertungsverfahren für Bauteilreinigungsanlagen. Dementsprechend muss das PHP-Programm zunächst für jede in der Datenbank enthaltene Anlage in jeder Kategorie des Fragebogens die Eignung nach dem System „+0/-“ ermitteln.

In den Kategorien „Längste Abmessung“, „Bauteilgewicht“, „Beschichtung“, „Schmutzmenge“, „Angestrebter Reinheitsgrad“ und „Teiledurchsatz“ können diese Eignungen für jede Anlage direkt aus der Datenbank ausgelesen werden. Das gleiche gilt für jeden Aspekt unter „Besonderheiten des Bauteils“. In den Kategorien „Werkstoff“, „Verschmutzung“ und „maximal zulässige Investitionskosten“ ergeben sich Besonderheiten, die im Folgenden erläutert werden.

In der Kategorie „**Werkstoff**“ befinden sich 14 verschiedene Werkstoffe (s. **Bild 4.6**), von denen der Anwender einen oder auch mehrere auswählen kann. Die Anbieter haben für jede Anlage zu jedem einzelnen Werkstoff eine Eignung festgelegt. Daher müssen diese Angaben nun für alle vom Anwender ausgewählten Werkstoffe zusammengefasst werden. Dazu wird für jeden gewählten Werkstoff die Eignung aus der Datenbank ausgelesen und die Anzahl der „0“ und „-“ gezählt. Bei mindestens einem „-“ ist die Anlage für den betreffenden Werkstoff nicht geeignet, und daher ist in der gesamten Kategorie „Werkstoff“ ein „-“ für die Anlage zu vergeben. Tritt kein „-“ auf, aber mindestens ein „0“, so ist die Anlage in der Kategorie „Werkstoff“ als bedingt geeignet einzustufen („0“). Ist die Anlage für jeden ausgewählten Werkstoff gut geeignet (kein „0“ und kein „-“), so ist sie insgesamt in der Kategorie „Werkstoff“ als gut geeignet einzustufen („+“).

In der Kategorie „**Verschmutzung**“ sind 22 Verschmutzungsarten unterschieden (s. **Bild 4.6**), zu denen die Anbieter ebenfalls für jede Anlage jeweils einzelne Eignungen in die Datenbank eingetragen haben. Daher muss hier, ähnlich wie in der Kategorie „Werkstoff“, eine zusammengefasste Eignung für jede Anlage in der Kategorie „Verschmutzung“ ermittelt werden. Auch hier wird für jede ausgewählte Verschmutzung geprüft, ob die Anlage für deren Entfernung geeignet ist. Bei mindestens einem „0“ wird die Anlage als bedingt geeignet, bei mindestens einem „-“ als ungeeignet eingestuft. Nur wenn für alle vorliegenden Verschmutzungen eine uneingeschränkte Eignung vorliegt, wird insgesamt in der Kategorie „Verschmutzung“ ein „+“ vergeben.

In der Kategorie „**maximal zulässige Investitionskosten**“ (s. Kapitel 4.8.1) vergeben die Anbieter keine Eignungen für ihre Anlagen. Statt dessen vergeben sie für jede Anlage eine Spanne für die Investitionskosten, die je nach Ausstattung einer Anlage variieren können. Diese Spanne wird durch einen Wert für die minimalen und einen für die maximalen Investitionskosten angegeben. Der Anwender wiederum gibt im Fragebogen die maximal zulässigen Investitionskosten an, die er zu zahlen bereit ist. Je nach Lage dieser Maximalkosten bezogen auf die Investitionskostenpanne einer Anlage ergibt sich die Eignung der Anlage (s. **Bild 4.43**):

- Liegen die maximal zulässigen Investitionskosten oberhalb der Investitionskostenpanne einer Anlage, so ist diese Anlage in der Kategorie „maximal zulässige Investitionskosten“ uneingeschränkt geeignet („+“).
- Liegen die maximal zulässigen Investitionskosten innerhalb der Investitionskostenpanne einer Anlage, so ergibt sich für diese Anlage eine eingeschränkte Eignung in der Kategorie „maximal zulässige Investitionskosten“ („0“). Die Einschränkung bedeutet, dass die Anlagenausstattung so gewählt werden muss, dass die maximal zulässigen Kosten nicht überschritten werden.
- Liegen die maximal zulässigen Investitionskosten unterhalb der Investitionskostenpanne einer Anlage, so ist diese Anlage in der Kategorie „maximal zulässige Investitionskosten“ ungeeignet („-“).

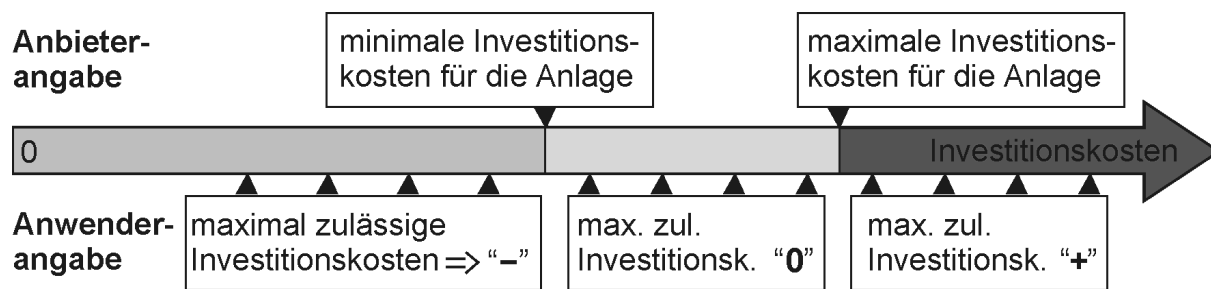


Bild 4.43 Eignung einer Anlage in der Kategorie „maximal zulässige Investitionskosten“

Somit wurde nun für jede Anlage in insgesamt 16 Kategorien jeweils eine Eignung hinsichtlich der vom Anwender im Fragebogen spezifizierten Reinigungsaufgabe nach dem System „+/0/-“ ermittelt. Wenn zu Fragebogenkategorien keine Angaben gemacht wurden, reduziert sich diese Anzahl. Mit den ermittelten Eignungen lassen sich die Anlagen insgesamt einteilen in die Gruppen „gut geeignete Anlagen“ (alle Eignungen „+“), „bedingt geeignete Anlagen“ (mindestens ein „0“) und „ungeeignete Anlagen“ (mindestens ein „-“).

Diese drei Gruppen von Anlagen werden nun aufgelistet, wobei in den Gruppe der bedingt geeigneten und der ungeeigneten Anlagen eine weitere Sortierung nach der Anzahl der vergebenen „0“ und „-“ erfolgt. Je mehr „-“ Eignungen eine Anlage aufweist, desto weiter unten wird sie aufgelistet. Bei gleich vielen „-“ entscheidet die Anzahl der bedingten Eignungen („0“). Damit sind die Anlagen in der Reihenfolge ihrer technischen Wertigkeit sortiert (s. Kapitel 4.2.2.5).

Einen Ausschnitt aus der Auflistung dieser Anlagen als Ausgabe des Anlagenauswahlsystems zeigt beispielhaft **Bild 4.44**. Die Auflistung ähnelt der Ausgabe der Datenbanksuche nach Reinigungsanlagen (s. **Bild 4.40**), jedoch werden hier die Freitexte zur Anlagenbeschreibung weggelassen, um Platz für die Anlagenbewertung zu erhalten. Hier werden alle vom Anwender im Fragebogen ausgefüllten Kategorien aufgelistet, und zu jeder Kategorie wird die Eignung der jeweiligen Anlage in Form des Kurzzeichens „+“, „0“ oder „-“ angegeben.

Bei Überfahren eines Eignungssymbols mit dem Mauszeiger wird ein Erläuterungstext eingeblendet, in dem die jeweilige Eignung näher erklärt wird. In **Bild 4.45** erhält der Anwender beispielsweise eine Erläuterung für die bedingte Eignung der dargestellten Anlage im Hinblick auf die Entfernung der im Fragebogen ausgewählten Schmutzarten. Dazu werden zunächst die einzelnen Schmutzarten aufgelistet, und die Eignung der Anlage für jede einzelne mit dem entsprechenden Kurzzeichen („+/0/-“) angegeben. Hier lautet das zusammenfassende Urteil „bedingt geeignet“, da sich eine bedingte Eignung für die Schmutzart „Verseifbare Öle und Fette“ ergibt. Darunter erscheint zur Begründung der Freitext, den der Anbieter der Anlage bei der beschreibung der Anlagefähigkeiten eingegeben hat (s. **Bild 4.23**).

Somit kann sich der Anwender in dieser Darstellung einen detaillierten Überblick über die technische Bewertung der Reinigungsanlagen aus der Datenbank hinsichtlich der Lösung seiner konkreten Reinigungsaufgabe verschaffen.



Bild 4.44 Ausschnitt einer beispielhaften Ausgabe des Anlagenauswahlsystems

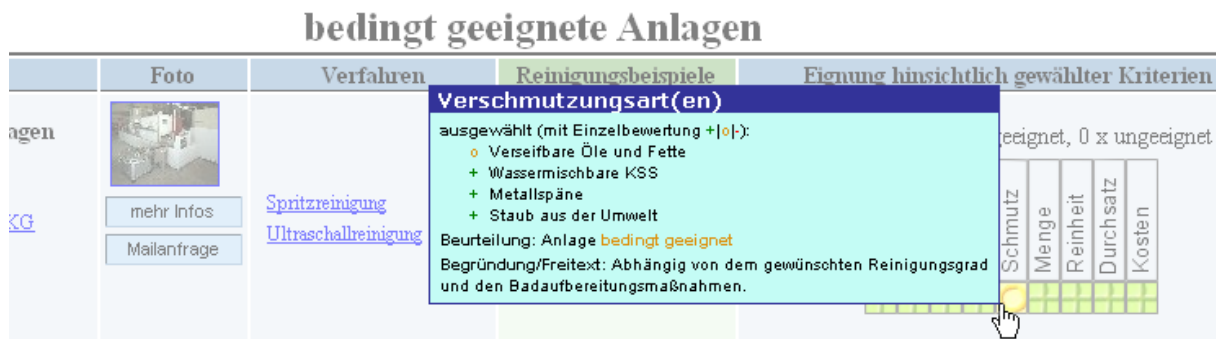


Bild 4.45 Erläuterungstext zur bedingten Eignung für die Verschmutzungsarten

4.8.3 Sortierung technisch gleichwertiger Anlagen

Anlagen, die mit gleich vielen „+“, „0“-, und „-“-Eignungen bewertet wurden, werden als technisch auf einer Stufe stehend behandelt und müssen nun hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit weiter sortiert werden.

Dabei soll die in Kapitel 4.2.3.2 entwickelte wirtschaftliche Bewertung von Bauteilreinigungsanlagen zum Einsatz kommen, welche auf den detaillierten Kostenbetrachtungen zu den Reinigungsbeispielen basiert. Nach Gleichung (4.15) lässt sich für jede Anlage der Datenbank eine wirtschaftliche Wertigkeit errechnen. Nach dieser Kennzahl können dann die technisch gleichwertigen Anlagen sortiert werden.

Zu Beginn der Nutzung einer Datenbank, wie der hier vorgestellten, ergibt sich das Problem, dass die Anbieter sich nur allmählich auf die Komplexität des Systems einlassen. Bei einer typischen Anbieterregistrierung werden zunächst nur die Kontaktdaten eingegeben. Später werden auch erste Anlagen eingepflegt. Diese werden jedoch zunächst nur beschrieben. Erst im nächsten Schritt werden die Eignungen festgelegt. Auch Reinigungsbeispiele werden zwar eingegeben, jedoch nicht im vollen Detaillierungsgrad. Gerade die komplizierten Lebenslaufkostenbetrachtungen werden zu Beginn oft weggelassen.

Daher ist es in diesem frühen Stadium der Datenbank für die meisten Anlagen nicht möglich, die gemittelten Lebenslaufkosten nach Gleichung (4.14) zu ermitteln. Somit ist auch eine Sortierung nach diesem Kriterium nicht sinnvoll.

Statt dessen wird zunächst eine einfachere Sortiermethode implementiert, welche auf den Anlageninvestitionskosten basiert, da letztere in den meisten Fällen angegeben werden. Dazu wird für jede Anlage der Mittelwert aus den minimalen und den maximalen Investitionskosten gebildet. Nach diesen mittleren Investitionskosten werden die technisch gleichwertigen Anlagen sortiert. Für den Fall, dass ein Anbieter keine Investitionskosten spezifiziert hat, werden die mittleren Investitionskosten für diese Anlage auf einen sehr hohen Wert gesetzt (quasi die numerische Umsetzung von „unendlich“), so dass solche Anlagen in der Sortierung am Ende auftauchen.

Darüber hinaus kann der Anwender jederzeit eine Feinbewertung der Anlagen durchführen, indem er sich detailliert die Daten der jeweiligen Anlage anzeigen lässt und die zugehörigen Beispiele gereinigter Teile betrachtet. Je mehr Anlagen und Reinigungsbeispiele die Datenbank enthält, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass er zu seinem Reinigungsproblem passende Lösungen findet. Der nächste Schritt ist dann der Kontaktaufbau zum betreffenden Anbieter, welcher in Kapitel 4.9 beschrieben wird.

Für die Zukunft ist zu erwarten, dass die Anbieter auch umfangreiche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zu ihren Anlagen und Reinigungsbeispielen in die Datenbank einpflegen. Dabei tritt ein „Schneeballeffekt“ auf: Wenn ein Unternehmen solche Angaben macht, hinterlässt dies einen positiven Eindruck beim potentiellen Kunden, nämlich dem Anwender. Die Wettbewerber dieses Unternehmens werden sich dann gezwungen sehen, ebenfalls detailliertere Angaben zu machen usw. Mit den dann vorhandenen Daten kann die oben beschriebene Sortierung technisch gleichwertiger Anlagen nach ihrer wirtschaftlichen Wertigkeit gemäß Gleichung (4.15) erfolgen.

4.8.4 Reinigungsmittelauswahl

Wie bereits in Kapitel 4.2.7 beschrieben, sind auch für die in der Datenbank vorhandenen Reinigungsmittel Fähigkeiten nach dem System „+/-“ hinterlegt. Darauf basiert das Reinigungsmittelauswahlssystem, welches mit dem Button „Reinigerauswahl“ am Ende des Fragebogens zur Spezifizierung von Reinigungsproblemen aufgerufen wird (s. **Bild 4.42**).

Bezeichnung	Typ	Anbieter	Eignung hinsichtlich gewählter Kriterien																
CO2 Details Mailanfrage	CO2 flüssig	acp - advanced clean production GmbH	3 x geeignet, 1 x bedingt geeignet, 0 x ungeeignet <table border="1"> <tr><td>Werkstoff</td><td>Schmutz</td><td>Menge</td><td>Reinheit</td></tr> <tr><td>■</td><td>■</td><td>■</td><td>■</td></tr> <tr><td>■</td><td>■</td><td>■</td><td>■</td></tr> <tr><td>■</td><td>■</td><td>■</td><td>■</td></tr> </table>	Werkstoff	Schmutz	Menge	Reinheit	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Werkstoff	Schmutz	Menge	Reinheit																
■	■	■	■																
■	■	■	■																
■	■	■	■																
HAKUPUR 324 Details Mailanfrage	Neutralreiniger	Chemische Werke Kluthe GmbH	3 x geeignet, 1 x bedingt geeignet, 0 x ungeeignet <table border="1"> <tr><td>Werkstoff</td><td>Schmutz</td><td>Menge</td><td>Reinheit</td></tr> <tr><td>■</td><td>■</td><td>■</td><td>■</td></tr> <tr><td>■</td><td>■</td><td>■</td><td>■</td></tr> <tr><td>■</td><td>■</td><td>■</td><td>■</td></tr> </table>	Werkstoff	Schmutz	Menge	Reinheit	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Werkstoff	Schmutz	Menge	Reinheit																
■	■	■	■																
■	■	■	■																
■	■	■	■																
Typ: Alfideox + Alfisid oder Ferrosid Details Mailanfrage	Saurer Reiniger	Alufinish GmbH & Co.KG	3 x geeignet, 1 x bedingt geeignet, 0 x ungeeignet <table border="1"> <tr><td>Werkstoff</td><td>Schmutz</td><td>Menge</td><td>Reinheit</td></tr> <tr><td>■</td><td>■</td><td>■</td><td>■</td></tr> <tr><td>■</td><td>■</td><td>■</td><td>■</td></tr> <tr><td>■</td><td>■</td><td>■</td><td>■</td></tr> </table>	Werkstoff	Schmutz	Menge	Reinheit	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Werkstoff	Schmutz	Menge	Reinheit																
■	■	■	■																
■	■	■	■																
■	■	■	■																
Reinstwasser Details Mailanfrage	Reinstwasser	PMT Partikel-Messtechnik AG	2 x geeignet, 2 x bedingt geeignet, 0 x ungeeignet <table border="1"> <tr><td>Werkstoff</td><td>Schmutz</td><td>Menge</td><td>Reinheit</td></tr> <tr><td>■</td><td>■</td><td>■</td><td>■</td></tr> <tr><td>■</td><td>■</td><td>■</td><td>■</td></tr> <tr><td>■</td><td>■</td><td>■</td><td>■</td></tr> </table>	Werkstoff	Schmutz	Menge	Reinheit	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Werkstoff	Schmutz	Menge	Reinheit																
■	■	■	■																
■	■	■	■																
■	■	■	■																

Bild 4.46 Ausschnitt einer beispielhaften Ausgabe des Reinigungsmittelauswahlsystems

Bei der Reinigerauswahl werden lediglich die in **Bild 4.13** aufgeführten Kriterien „Werkstoff“, „Beschichtung“, „Verschmutzung“, „Schmutzmenge“ und „Angestrebter Reinheitsgrad“ berücksichtigt (s. Kapitel 4.2.7). Ansonsten ist das Reinigungsmittelauswahlssystem ähnlich aufgebaut wie das in Kapitel 4.8.2 beschriebene Anlagenauswahlssystem. Eine beispielhafte Ergebnisdarstellung zeigt **Bild 4.46**.

Da eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Reinigungsmitteln nur im Zusammenhang mit Einsatzbeispielen möglich ist, wurde zur wirtschaftlichen Bewertung die Verknüpfung zwischen Reinigungsbeispielen und darin eingesetzten Reinigungsmitteln geschaffen (s. Kapitel 4.2.6). Somit kann der Anwender nun in der in **Bild 4.47** beispielhaft dargestellten Detailansicht ausgehend den Button „Beispiele anzeigen...“ anklicken, woraufhin eine Liste mit Reinigungsbeispielen angezeigt wird, in welchen dieser Reiniger verwendet wird. Eine solche Auflistung zeigt beispielhaft **Bild 4.48**.

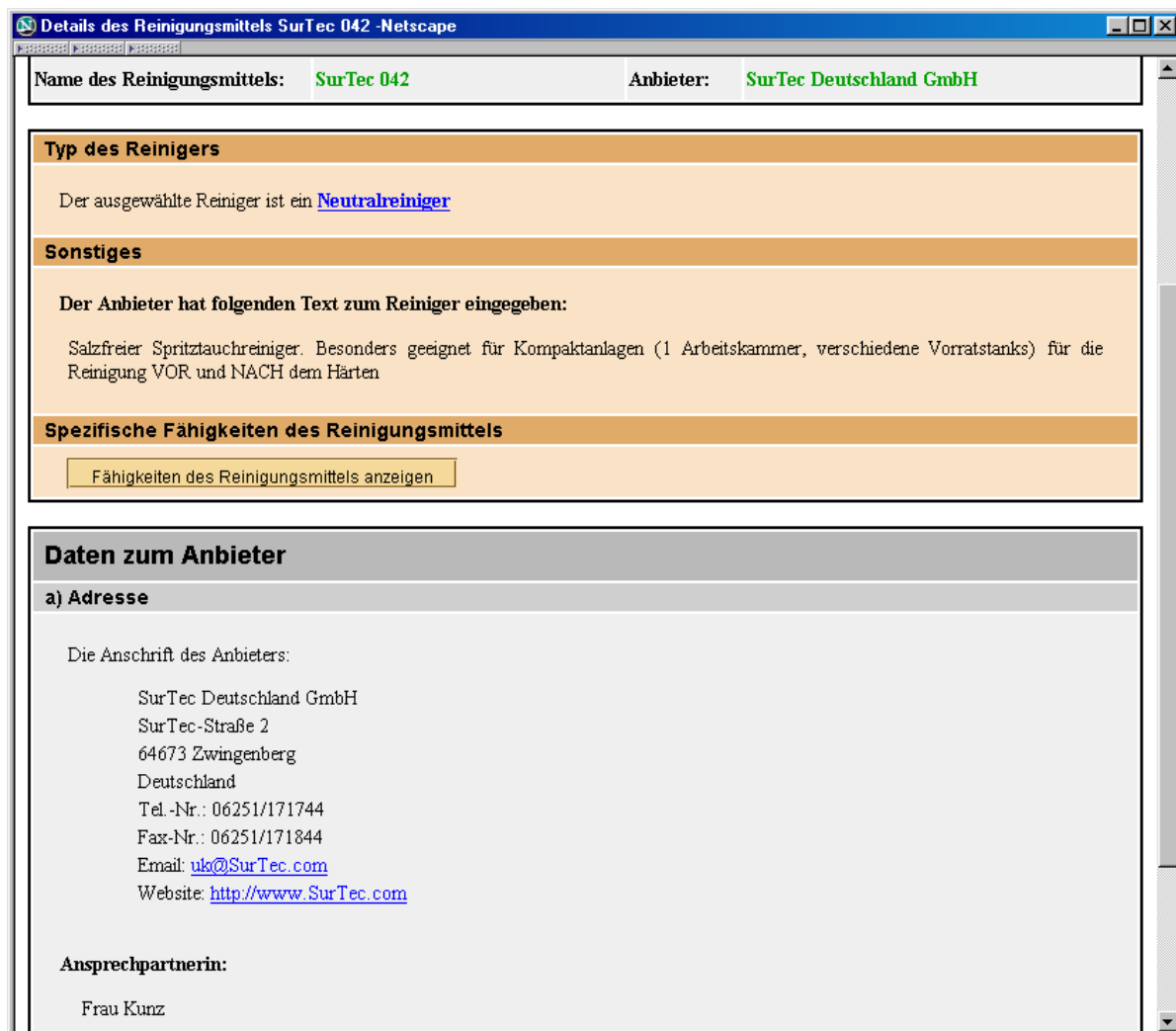


Bild 4.47 Detaillierte Daten eines Reinigungsmittels

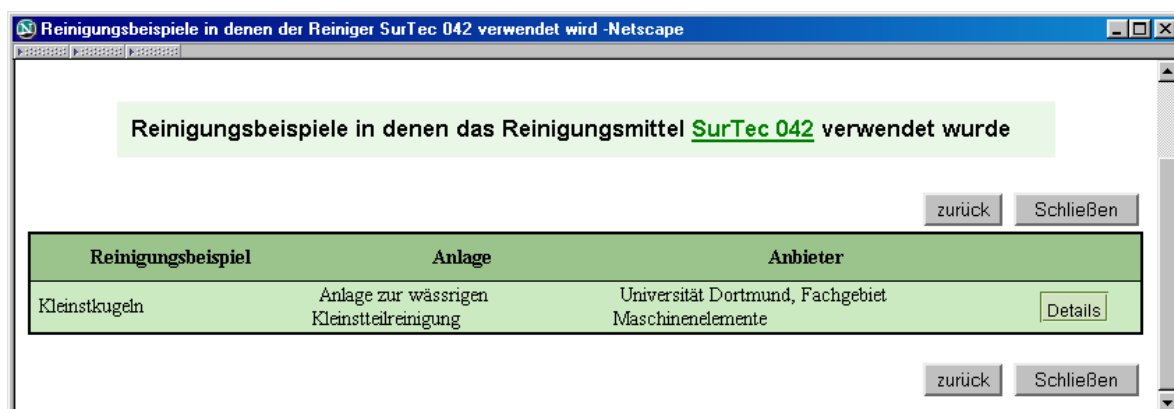


Bild 4.48 Reinigungsbeispiele, in denen der Reiniger „Surtec 042“ verwendet wird

Hinter jedem Reinigungsbeispiel befindet sich ein Button „Details“, welcher zu genauen Informationen inklusive der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des betreffenden Reinigungsbeispiels führt. Mit all diesen Informationen kann der Anwender für ihn geeignete Reinigungsmittel auswählen. Als nächster Schritt folgt dann der Kontaktaufbau zum betreffenden Anbieter, welcher im folgenden Unterkapitel beschrieben wird.

4.9 Kontaktvermittlung zum Anbieter

4.9.1 Vernetzte Darstellung der Daten

Sowohl bei der Suche in der Datenbank (s. Kapitel 4.7) als auch bei der Arbeit mit den Auswahlssystemen (s. Kapitel 4.8) erhält der Anwender als Ergebnis Auflistungen von Anbietern, Anlagen, Reinigungsbeispielen oder Reinigungsmitteln. Diese sind der Übersichtlichkeit halber immer gleich strukturiert. Von jeder Auflistung können detaillierte Daten zu den einzelnen Elementen aufgerufen werden. Demnach gibt es auch Detailübersichten zu Anbietern, Anlagen, Reinigungsbeispielen und Reinigungsmitteln. Ein Ausschnitt aus der Detailseite für Reinigungsmittel ist in **Bild 4.47** dargestellt.

Auf diesen Detailseiten können wiederum Auflistungen vorkommen. Beispielsweise sind auf der Detailseite zu einem Anbieter alle von diesem angebotenen Reinigungsanlagen sowie alle Reinigungsmittel aufgelistet. Die Anlagendetailseite listet alle zugehörigen Reinigungsbeispiele auf usw.

Außerdem befinden sich auf den Detailseiten immer die detaillierten Angaben zum jeweiligen Anbieter, bei den Reinigungsbeispielen auch zur zugehörigen Anlage. Insgesamt ist diese vernetzte Art der Datenausgabe in **Bild 4.49** schematisch dargestellt.

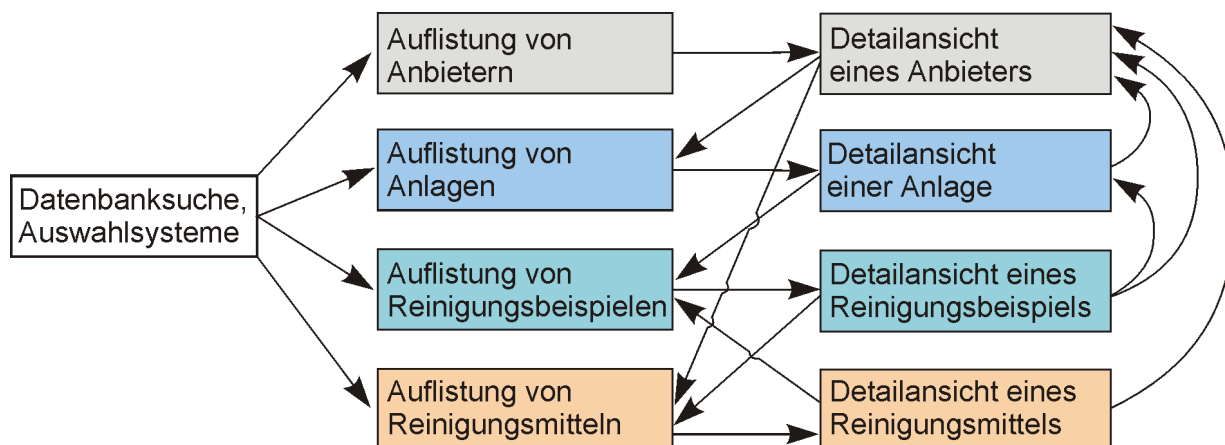


Bild 4.49 vernetzte Datenausgabe

Um die Übersichtlichkeit für den Anbieter zu erhöhen, wurde die bereits in Kapitel 4.4.2 beschriebene Farbgebung durchgängig eingehalten. Demnach werden Informationen zu Anbietern grau hinterlegt, zu Anlagen blau, zu Reinigungsbeispielen grün und zu Reinigungsmitteln orange.

Auch werden an verschiedenen Stellen Verlinkungen zur Wissensbasis (s. Kapitel 4.1.2) angeboten, in der sich der auf dem Gebiet der Bauteilreinigung weniger erfahrene Anwender weiter informieren kann. Als eines von vielen Beispielen sei hier auf **Bild 4.46** verwiesen, in dem als Reinigertyp für „HAKUPUR 324“ „Neutralreiniger“ angegeben ist. Diese Angabe ist zugleich ein Link zu der in **Bild 4.50** dargestellten Seite der Wissensbasis.

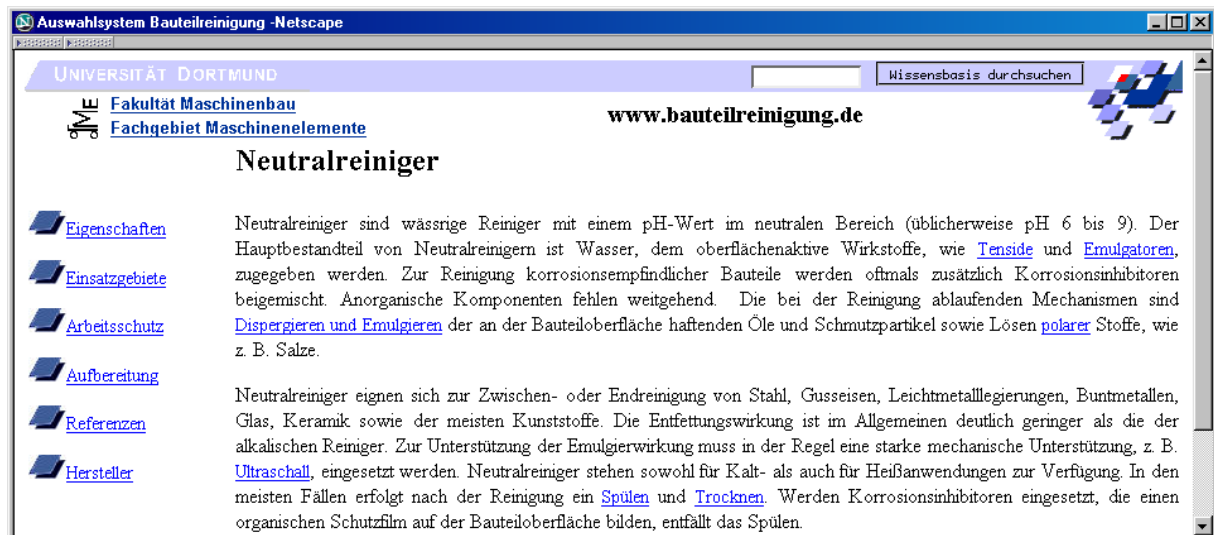


Bild 4.50 Erklärung zum Reinigertyp „Neutralreiniger“ in der Wissensbasis nach /KLO03/

4.9.2 Automatisierte Mailanfrage beim Anbieter

Durch die durchgängig vernetzte Darstellung findet der Anwender zu jeder Lösung nicht nur alle relevanten damit verknüpften Daten, sondern er wird auch immer wieder zu dem entsprechenden Anbieter geführt. Um mit diesem im nächsten Schritt möglichst leicht in Kontakt treten zu können, ist zusätzlich zu den Kontaktdaten auch an vielen Stellen ein Button vorhanden, der zu einem Kontaktformular führt. Dieses ermöglicht eine direkte Mailanfrage beim Anbieter.

Kontaktformular zum Anbieter: MetaClean GmbH

Betreff: Anfrage zur Anlage MC-1000

***Firma:**

Ansprechpartner:

Strasse:

Ort:

***Email:** Die Emailadresse muß der Form "name@provider.xy" entsprechen!

Telefon:

Fax:

Nachricht:

Folgende Daten aus dem Fragebogen werden an den Anbieter übermittelt:

***** Automatisch erstellter Text *****

zu reinigendes Teil ist schöpfend: nein

zu reinigendes Teil ist lokal verschmutzt: nein

zu reinigendes Teil hat enge Spalten: nein

zu reinigendes Teil ist gesintert/aus Pulver gepresst: nein

Alle mit * gekennzeichneten Felder müssen ausgefllt werden.

Bild 4.51 Kontaktformular mit Fragebogenangaben

Als Beispiel sei auf die in **Bild 4.46** dargestellte Ausgabe des Auswahlsystems für Reinigungsanlagen verwiesen. Interessiert sich ein Anwender beispielsweise für die Anlage „MC-1000“ der Firma „MetaClean GmbH“, so kann er direkt daneben auf den Button „Mailanfrage“ klicken. Es erscheint das in **Bild 4.51** dargestellte Kontaktformular.

Hier kann der Anwender seine Kontaktdaten sowie eine Nachricht an den Anbieter eingeben und mit „Anfrage abschicken“ direkt an den Anbieter senden. Zusätzlich ist hier zu erkennen, dass die im Fragebogen gemachten Angaben in automatisch erstellten Text umformuliert werden, welcher dem Anbieter ebenfalls übermittelt wird. Damit kann sich der Anbieter gezielt auf die Kontaktaufnahme mit diesem Kunden vorbereiten.

Ab diesem Punkt ist der Anbieter als Experte dafür zuständig, für das konkrete Reinigungsproblem des Anwenders eine möglichst wirtschaftliche Lösung zu finden. Durch die in diesem Kapitel beschriebene Lösungsdatenbank und das Auswahlsystem ist bereits eine Anlage gefunden, die offensichtlich relativ gut für das gegebene Reinigungsproblem geeignet ist. Der in der Anlage ablaufende Prozess mit seinen meist zahlreichen Parametern kann allerdings nur vom erfahrenen Anbieter wirtschaftlich ausgelegt werden. Diesem soll als Hilfsmittel für die Optimierung der Anlage das im folgenden Kapitel beschriebene Simulationssystem zur Verfügung gestellt werden.

5 Simulationssystem für industrielle Bauteilreinigungsanlagen

5.1 Konzeptentwicklung

5.1.1 Vorüberlegungen

Das zu entwickelnde Simulationssystem soll den Benutzer bei der Gestaltung von Bauteilreinigungsanlagen unterstützen. Dieser Benutzer des Systems sollte ein Experte der Reinigungstechnik sein, wie zum Beispiel ein Anlagenhersteller. Es handelt sich beispielsweise um einen der „Anbieter“, welche, wie in Kapitel 4 beschrieben, ihre Produkte in die internetbasierte Lösungsdatenbank für Bauteilreinigungsanlagen eingetragen haben. Über das dort entwickelte System könnte beispielsweise ein Kontakt zu einem potentiellen Kunden („Anwender“) entstanden sein, welcher die Lösung für ein spezielles Reinigungsproblem sucht. Dabei hat das Auswahlssystem (s. Kapitel 4.7) bereits eine Reinigungsanlage des Anbieters gefunden, welche gut zu dem beschriebenen Reinigungsproblem passt. Diese gilt es nun für den Anwendungsfall zu optimieren.

Dazu sind heutzutage neben dem hohen Erfahrungswissen des Anbieters zahlreiche aufwändige Vorversuche erforderlich, um die verschiedenen Parameter optimal einzustellen. Ein Simulationssystem, welches die Auswirkungen von Parameteränderungen theoretisch berechenbar macht, kann hier Abhilfe schaffen. Außerdem bildet es die Grundlage für eine automatische Optimierung mit Hilfe Evolutionärer Algorithmen (s. Kapitel 6).

Analog zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung von Bauteilreinigungsanlagen (s. Kapitel 4.2.2 und 4.2.3) sind auch bei der Simulation und Optimierung technische und wirtschaftliche Aspekte von Bedeutung. Der technische Aspekt ist die erreichte Bauteilreinheit, der wirtschaftliche Aspekt die Reinigungskosten pro Bauteilcharge unter Berücksichtigung der Lebenslaufkosten der Reinigungsanlage (s. Kapitel 4.2.3.2). Beides soll vom Simulationssystem für beliebige Parametereinstellungen der Reinigungsanlage errechnet werden.

Bei der Optimierung soll eine geforderte Mindestreinheit zu möglichst geringen Kosten erreicht werden. Schon in Kapitel 3.1.1.3 wird auf die Problematik der quantitativen Festlegung der zu fordernden Bauteilreinheit hingewiesen. Dieses Problem kann jedoch hier gelöst werden, indem die zu fordernde Reinheit durch einen Simulationslauf mit der ursprünglich vom Auswahlssystem vorgeschlagenen Reinigungsanlage festgelegt wird. Die bei diesem Lauf ermittelte Restschmutzmenge kann als ausreichend angesehen werden, weil das Auswahlssystem die Anlage als grundsätzlich technisch für das Reinigungsproblem geeignet qualifiziert hat. Durch Variation der Parameter sollen dann Prozesse gefunden werden, die mindestens das gleiche oder ein besseres Reinigungsergebnis zu geringeren Kosten erzielen.

5.1.2 Zu modellierender Anlagentyp

Aufgrund des großen Umfangs der Thematik sowie der Verschiedenheit der zu berücksichtigenden Aspekte (beispielsweise verschiedenartige Parameter bei verschiedenen Reinigungsverfahren) ist zunächst eine Beschränkung auf einen gängigen Anlagentyp erforderlich. An dieser Stelle werden für die weitere Betrachtung Tauchreinigungsanlagen ausgewählt, da sie

gemäß /GRU99/ zusammen mit Spritzreinigungsanlagen nach Schätzungen der Deutschen Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik einen Marktanteil von ca. 95% besitzen (s. auch Kapitel 3.1.1.1). Es soll jedoch auf eine gute Erweiterbarkeit des Simulators im Hinblick auf eine Betrachtung anderer Reinigungsverfahren geachtet werden.

In Tauchreinigungsanlagen laufen in der Regel mehrstufige Prozesse ab, bei denen die zu reinigenden Teile nacheinander mehrere Reinigungsstufen, Spülstufen und Trocknungsstufen durchlaufen. In den einzelnen Stufen können unterschiedliche Reinigungsverfahren, z. B. Tauchbecken, Ultraschallstufen, Flutbecken usw., eingesetzt werden. Der Reiniger wird bei derartigen Prozessen zumeist über eine Aufbereitungsstation in einem geschlossenen Kreislauf geführt. Dabei wird oft eine Reinigungskaskade realisiert, bei welcher der aus einer Stufe abfließende Reiniger der vorhergehenden Stufe zufließt, um so den Reiniger- bzw. Frischwasserverbrauch zu reduzieren. **Bild 5.1** zeigt einen beispielhaften Reinigungsprozess, bei dem die Bauteile zunächst eine zweistufige Tauchreinigung durchlaufen, wobei die zweite Stufe mit Ultraschallunterstützung ausgeführt ist. Der Reiniger wird aus einer Aufbereitungsstation in dieses zweite Becken (Feinreinigung) gepumpt und läuft per Überlauf in das erste Becken (Vorreinigung). Von dort wird er wieder der Aufbereitung zugeführt. Es schließt sich ein zweistufiger Spülprozess an, in dem das Frischwasser ebenfalls als Kaskade geführt ist. Zum Schluss werden die Bauteile durch Warmluft getrocknet.

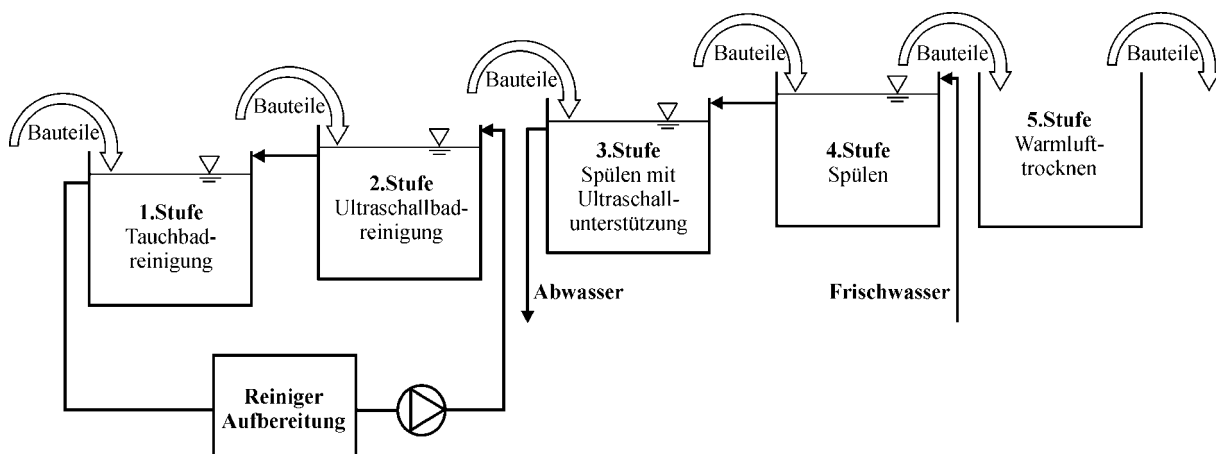


Bild 5.1 Mehrstufiger Reinigungsprozess mit Kaskade und Reinigeraufbereitung

Ein solcher Prozess weist zahlreiche verschiedene Parameter auf, die festgelegt werden müssen. Dabei sollen strukturelle und deskriptive Parameter unterschieden werden. Strukturelle Parameter beschreiben die Prozessstruktur. Dazu gehören die Art und Anzahl der Stufen sowie die Versorgung mit Reinigungs- und Spülflüssigkeiten (Wegführung und ggf. Aufbereitung). Deskriptive Parameter beschreiben die einzelnen Stufen, Quellen und Aufbereitungen. Dies können für die Tauchbäder beispielsweise Badvolumina, Solltemperaturen, Heiz- oder Ultraschalleistungen sein. Für die Reinigerquellen bzw. Aufbereitungen sind dies z. B. Reinigerzusammensetzungen und Volumenströme.

Die Bauteile werden in Chargen durch die Reinigungsanlage geführt, wobei eine feste Taktzeit eingehalten wird. Die Ausgangverschmutzung ist bekannt. Das Simulationssystem soll nun unter Berücksichtigung der oben genannten Parameter berechnen, wieviel Restschmutz nach der Reinigung noch auf den Bauteilen vorhanden ist. Weiterhin sollen die Kosten der Reinigung pro Bauteilcharge ermittelt werden.

5.1.3 Anforderungen an das Simulationssystem

5.1.3.1 Graphische Prozessmodellierung

Das Simulationssystem soll Bauteilreinigungsanlagen bzw. die darin ablaufenden Tauchreinigungsprozesse simulieren. Dazu soll zunächst in einer benutzerfreundlichen graphischen Oberfläche ein beliebiger Prozess modelliert werden können: Reinigungs-, Spül- und Trocknungsstufen sowie Quell-, Entsorgungs- und Aufbereitungsmodule sollen durch Sinnbilder repräsentiert werden und nach Belieben hintereinander platziert werden können. Der Weg der Bauteilchargen führt dann in dieser Reihenfolge durch alle dargestellten Stufen. Reinigerströme zwischen den Modulen sollen durch Verbinder repräsentiert werden. So ist der Weg aller beteiligten Reinigungs- und Spülflüssigkeiten mit eventuellen Zusatzstoffen modellierbar. Damit können auch komplexe Reinigungs- und Spülkaskaden geschaltet werden. Weiterhin müssen in geeigneten Eingabemasken zusätzliche Angaben gemacht werden können, beispielsweise bezüglich Bauteilart und -verschmutzung, Chargengrößen, Taktzeiten usw.

5.1.3.2 Auswertung des Simulationslaufes

Sobald der vollständige Prozess abgebildet ist, kann der eigentliche Simulationslauf beginnen. Dazu wird der Reinigungsprozess in sinnvollen Zeitschritten durchlaufen und jeweils das Modulverhalten ausgewertet. Die Länge eines Zeitschrittes soll dabei zunächst variabel gehalten und später sinnvoll, d. h. als guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und beanspruchter Rechenzeit, festgelegt werden. Von Startwerten ausgehend (z. B. könnten zu Beginn der Simulation alle Becken frei von Verschmutzung sein) wird sich nach einiger simulierter Zeit ein stationärer Zustand einstellen, an dem die Ergebnisse des Simulationslaufes ermittelt werden können. Dazu gehört die erreichbare Reinheit der Bauteile, Kosten für Energie und die verschiedenen Reinigungs- und Spülflüssigkeiten sowie Entsorgungskosten usw. Diese Ergebnisse sollen möglichst übersichtlich dargestellt werden können. Damit hat der Anwender die Möglichkeit, jeden gewünschten Nassreinigungsprozess zu modellieren, die Parameter zu variieren und durch die Simulation die Reinigungsleistung und -kosten abzuschätzen.

5.1.3.3 Gute Erweiterbarkeit und Flexibilität

Die Forderung nach einer guten Erweiterbarkeit und Flexibilität basiert auf drei Gründen, welche im Folgenden erläutert werden:

Verschiedene Aspekte der Tauchreinigung und weitere Reinigungsverfahren

Gemäß Kapitel 5.1.2 soll das zu erstellende System zunächst die Simulation von Tauchreinigungsprozessen ermöglichen. Dabei müssen zahlreiche Reinigungsmittel und Verschmutzungsarten berücksichtigt werden. Eine Erweiterbarkeit in dieser Hinsicht ist sehr wichtig. Darüber hinaus soll auch eine Erweiterbarkeit im Hinblick auf die Berücksichtigung weiterer Reinigungsverfahren möglich sein. Dies soll durch einen modularen Aufbau gewährleistet werden.

Parametereinflüsse auf die Schmutzablösung

Gerade bei der theoretischen Annäherung an das Thema Bauteilreinigung ist auf einen möglichst flexiblen und gut erweiterbaren Ansatz zu achten. Messdaten aus konkreten Versuchen

zu den Einflüssen signifikanter Parameter auf die Reinigungsleistung lassen sich in der Literatur kaum finden (s. Kapitel 5.1.4). Deshalb sollte es möglich sein, die Ergebnisse eventuell später durchgeführter Versuche möglichst gut in das Simulationssystem übernehmen zu können.

Kopplung mit Optimierverfahren

Erweiterbarkeit ist aber auch notwendig, wenn im nächsten Schritt die automatische Optimierung der Bauteilreinigungsprozesse ermöglicht werden soll. Dazu muss das Simulationssystem definierte Schnittstellen für einen Optimieralgorithmus bereitstellen, oder das Optimierverfahren muss direkt in das Simulationssystem integriert werden können.

5.1.3.4 Verbreitung über das Internet

Der Kreis potentieller Interessenten an dem Simulationssystem für Bauteilreinigungsanlagen ist sehr groß und über die ganze Welt verteilt, da Bauteilreinigung überall in der Industrie Anwendung findet. Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, ist es bis dato für die Anwender sehr schwierig, Informationen bezüglich geeigneter Reinigungsverfahren und –prozesse für ihren speziellen Anwendungsfall zu erhalten. Schon die in Kapitel 4 beschriebene internetbasierte Lösungsdatenbank für industrielle Bauteilreinigungsanlagen verfolgt den Ansatz, eine möglichst gute Erreichbarkeit über das Internet zu gewährleisten. Dementsprechend soll auch das zu erstellende Simulationssystem über das weltweite Datennetz verbreitet werden können. Damit einher geht vor allem die Forderung nach weitestmöglicher Plattformunabhängigkeit, da im Internet die verschiedensten Computersysteme miteinander vernetzt sind.

5.1.4 Theoretische Betrachtung einer Reinigungsstufe

Um das Verhalten eines komplexen Reinigungsprozesses theoretisch zu beschreiben, bietet es sich an, die jeweiligen Stufen zunächst einzeln zu betrachten. Jede Einzelstufe soll als ein austauschbares Modul modelliert werden. Beliebige mehrstufige Prozesse können dann durch Hintereinanderschaltung der Module abgebildet werden. Dabei müssen die Eingangs- und Ausgangsgrößen der einzelnen Stufen entsprechend ihrer tatsächlichen Verschaltung berücksichtigt werden. Dies ist in **Bild 5.2** beispielhaft für eine Tauchreinigungsstufe dargestellt.

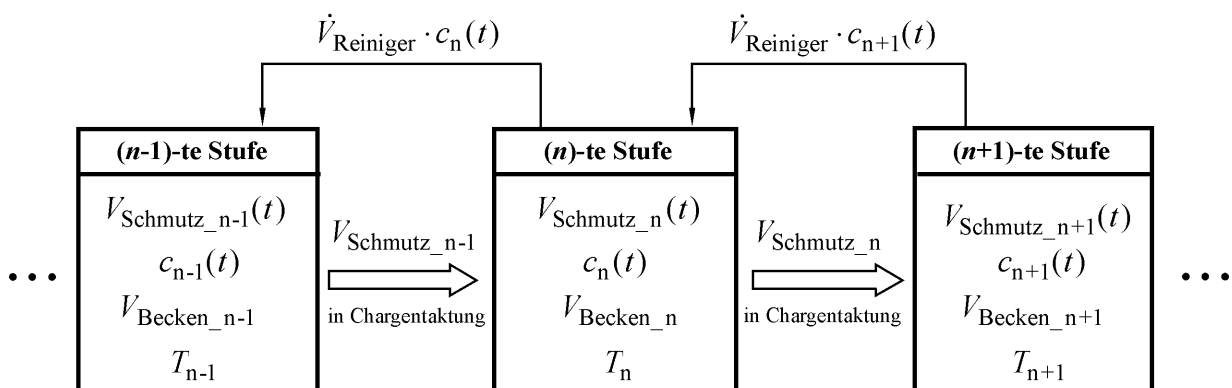


Bild 5.2 Tauchreinigungsstufe in einer Reinigungskaskade mit Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen

Es handelt sich um die n -te Stufe einer Reinigungskaskade, welche von der nachfolgenden Stufe einen Reinigervolumenstrom $\dot{V}_{\text{Reiniger}}$ mit einer Schmutzkonzentration von $c_{n+1}(t)$ er-

hält. An die vorhergehende $(n-1)$ -te Stufe wird ein Reinigervolumenstrom $\dot{V}_{\text{Reiniger}}$ mit einer Schmutzkonzentration von $c_n(t)$ weitergeleitet. Jede Stufe zeichnet sich durch ein Reinigungsbeckenvolumen V_{Becken_n} und eine Badtemperatur T_n aus. Nach jedem Chargentakt werden die Bauteile jeweils eine Stufe weiter befördert, und die erste Stufe wird mit einer neuen verschmutzten Bauteilcharge beschickt. Aus der letzten Stufe kann eine Charge gereinigter Bauteile entnommen werden.

Neben den Reinigungsstufen werden zur Modellierung eines Reinigungsprozesses noch verschiedene Quell-, Entsorgungs- und/oder Aufbereitungsmodule benötigt, welche als Grundlage für die Berechnung der Betriebskosten dienen. Beispielsweise muss ein Tauchreinigungsprozess von mindestens einer Reinigerquelle versorgt werden, welche einen bestimmten Reinigervolumenstrom liefert. Auch eine anschließende Trocknungsstufe ist zu modellieren. Für die Kostenberechnung sind geeignete Kostensätze zu hinterlegen.

Der wichtigste Aspekt bei der theoretischen Betrachtung der Tauchbadreinigung ist die Berechnung der eigentlichen Schmutzablösung. Hierzu muss eine Schmutzablösefunktion hinterlegt werden, die angibt, wieviel Schmutz pro Zeiteinheit von den Bauteilen gelöst wird. Diese Schmutzablösefunktion hängt von vielen Parametern ab, wie z. B. der Schmutzmenge auf dem Bauteil, dem Verschmutzungsgrad des Reinigers, der Reinigerart, der Badtemperatur, mechanischer Unterstützung der Reinigung durch Ultraschall usw.

Allerdings ist die Formulierung einer problemspezifischen Schmutzablösefunktion äußerst schwierig, da die bei der Schmutzablösung zum Tragen kommenden Mechanismen sehr kompliziert sind und der Einfluss der einzelnen Parameter sowie deren eventuelle Wechselwirkung schwer zu quantifizieren ist.

In der Literatur finden sich nur wenige Angaben zu Parametereinflüssen in der Tauchreinigung. Die meisten davon sind qualitativer Natur. Die wichtigsten Einflussgrößen sind der gewählte Reiniger, die Badbelastung (Konzentration des bereits im Becken befindlichen Schmutzes), die Badtemperatur sowie eine mechanische Unterstützung der Reinigung, meist durch Ultraschall. Im Folgenden werden die Einflüsse kurz dargestellt:

Reinigerwahl:

Wie bereits in Kapitel 3.1.1.1 beschrieben, stehen in der Praxis zahlreiche verschiedene Reinigungsmittel zur Verfügung. Die Auswahl muss auf der jeweiligen Reinigungsaufgabe basieren. Dabei sind neben der Menge und Zusammensetzung der Verschmutzung auch der Bauteilwerkstoff, der gewünschte Reinheitsgrad und weitere Aspekte zu berücksichtigen. Eine Auswahl von geeigneten Reinigungsmitteln für konkrete Reinigungsprobleme kann beispielsweise mit Hilfe des in Kapitel 4.8 vorgestellten Auswahlsystems erfolgen. Allerdings bedeutet das Ergebnis lediglich, dass ein als gut geeignet eingestufte Reiniger prinzipiell die Reinigungsaufgabe lösen kann. Quantitative Aussagen bezüglich der mit diesem Reiniger erzielbaren Reinigungsgeschwindigkeit lassen sich darauf basierend nicht treffen.

Badbelastung:

In /QUK95/ wird die „Konzentrationsdifferenz zwischen Öl gelöst in der Reinigungslösung und Öl als Verunreinigung an der Stahlware als treibende Kraft der Fettablösung“ bezeichnet. Je stärker ein Tauchbad mit Schmutz belastet ist, desto schwächer wird also seine Reinigungswirkung. Außerdem steigt die Gefahr der Rückverschmutzung beim Herausheben der Teile, weil vor allem ölhaltige Verschmutzungen an der Beckenoberfläche aufschwimmen. Für jeden Rei-

niger ergibt sich eine Sättigungskonzentration an Schmutz, ab der keine weitere Reinigung mehr stattfindet. Daher muss kontinuierlich Schmutz aus dem Becken ausgetragen werden. Dies geschieht durch Zufuhr von Frischreiniger, wobei der verschmutzte Reiniger über einen Überlauf austritt. Gegebenenfalls werden Aufbereitungssysteme für den verschmutzten Reiniger eingesetzt. Auch der Einfluss der Badbelastung ist damit qualitativ bekannt, lässt sich jedoch für konkrete Anwendungsfälle schwer quantifizieren (beispielsweise durch Angabe der genauen Sättigungskonzentration eines bestimmten Schmutzes in einem bestimmten Reiniger unter bestimmten Bedingungen).

Badtemperatur:

Bei einer Erhöhung der Temperatur im Becken wird dem Reinigungsprozess thermische Energie zugeführt, was fast immer eine Verbesserung der Reinigungswirkung zur Folge hat. Gemäß einer Faustformel aus der Chemie hat eine Temperaturerhöhung um 10 °C eine Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit zufolge. Laut /LAK94/ wird vielfach angenommen, dass sich diese Faustformel sinngemäß auf die Tauchreinigung übertragen lässt. Dies ist eine grundsätzliche Quantifizierung des Temperatureinflusses, wobei allerdings eine Normierung fehlt (Reinigungswirkung bei einer bestimmten Temperatur, von der aus die Berechnung nach der Faustformel erfolgen könnte).

Ultraschallunterstützung:

Eine Beaufschlagung des Reinigungsbeckens mit Ultraschall erzeugt in der Reinigungsflüssigkeit longitudinale Schallwellen. In den Schwingungsphasen geringeren Drucks wird kurzzeitig lokal der Dampfdruck der Flüssigkeit unterschritten, so dass dampfgefüllte Kavitationsbläschen entstehen, welche kurz darauf bei Fortschreiten der Schallschwingung wieder implodieren. Dabei entstehen Drücke in der Größenordnung von 1000 bar /NN04/, welche eine mechanische Unterstützung der Schmutzablösung bewirken. Gemäß /KOC99/ liegen gängige eingesetzte Ultraschalleistungen zwischen 7 und 30 Watt pro Liter Badvolumen. Die Ultraschallfrequenzen liegen meist zwischen 20 und 40 kHz für metallische Werkstoffe, für empfindliche Bauteile auch darüber. Für das Reinigungsergebnis ist allerdings vorwiegend die Leistung maßgeblich, wobei ab einer gewissen Leistung keine weitere Verbesserung mehr auftritt. Eine Quantifizierung des Parametereinflusses ist also auch hier nur durch Erfahrungswerte möglich, welche in der Praxis zu guten Ergebnissen führen.

Für eine realitätsnahe Modellierung von Tauchreinigungsstufen sind die oben beschriebenen Einflüsse der Parameter recht unbefriedigend, da nicht ausreichend quantifiziert. Offensichtlich fehlen experimentelle Daten, anhand derer genauere Aussagen getroffen werden können. Dies liegt sicherlich vor allem an der immens hohen Anzahl verschiedener Möglichkeiten der Kombination dieser Parameter, aber auch an der Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsfall (Bauteilgeometrie und -werkstoff, Verschmutzungsart und -menge usw.), so dass Aussagen über Parametereinflüsse niemals allgemeingültig sein können.

Als Lösungsansatz für dieses Problem findet sich in einigen Literaturstellen die statistische Versuchsmethodik (s. auch Kapitel 3.1.2). Zumindest für konkrete Anwendungsfälle lässt sich durch geschickte Versuchsführung der Einfluss und die Wechselwirkungen der Parameter ermitteln, so dass die Formulierung einer Schmutzablösefunktion für diese Fälle ermöglicht wird. Das konkreteste Ergebnis findet sich in /LAK95/. Hier wird für die Berechnung des Reinigungsergebnisses eines Tauchreinigungsprozesses an mit Kühlschmierstoff verunreinigten Bauteilen folgende Gleichung formuliert:

$$y_{\text{KS}} = b + e^{a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + a_6 x_6 + a_7 x_7 + a_8 x_8} \quad (5.1)$$

- y_{KS} = Restkühlschmierstoff (mg/Teil)
 x_1 = Reinigungszeit
 x_2 = Anzahl der Spülstufen
 x_3 = Badbelastung (KSS) 1. Spülbecken
 x_4 = mechanische Reinigungsunterstützung
 x_5 = Reinigersystem
 x_6 = Reinigerkonzentration
 x_7 = Badbelastung (KSS) Reinigungsbad
 x_8 = Badtemperatur
 $b; a_i$ = anwendungsfallspezifische Berechnungsparameter

Quantitative Angaben zu den anwendungsfallspezifischen Berechnungsparametern werden allerdings nicht gemacht.

Für die weitere theoretische Betrachtung der in **Bild 5.2** dargestellten Tauchreinigungsstufe soll daher zunächst eine möglichst einfache Reinigungsfunktion aufgestellt werden, die die wichtigsten Einflussparameter berücksichtigt. Somit wird die Schmutzablösefunktion für das n -te Reinigungsbad der Kaskade an dieser Stelle folgendermaßen formuliert:

$$\dot{V}_{\text{Schmutz}_n}(t) = V_{\text{Schmutz}_n}(t) \cdot (c_{\text{max}} - c_n(t)) \cdot K_{\text{Temperatur}} \cdot T_n \cdot K_{\text{Reiniger}} \quad (5.2)$$

- $\dot{V}_{\text{Schmutz}_n}(t)$ = Volumenstrom des vom Bauteil in Bad n abgelösten Schmutzes
 $V_{\text{Schmutz}_n}(t)$ = Volumen des noch auf dem Bauteil befindlichen Schmutzes
 $c_n(t)$ = Schmutzkonzentration des Reinigers im Bad n
 c_{max} = Sättigungskonzentration des Reinigers
 $K_{\text{Temperatur}}$ = Temperaturkonstante
 T_n = Temperatur im n -ten Bad
 K_{Reiniger} = Reinigerkonstante

Der Zeitverlauf der Schmutzkonzentration des Reinigers im n -ten Bad spiegelt sich in folgender Bilanzgleichung über den Schmutz im Becken wieder:

$$\dot{c}_n(t) \cdot V_{\text{Becken}_n} = c_{n+1}(t) \cdot \dot{V}_{\text{Reiniger}} - c_n(t) \cdot \dot{V}_{\text{Reiniger}} + \dot{V}_{\text{Schmutz}_n}(t) \quad (5.3)$$

- $\dot{c}_n(t)$ = zeitliche Änderung der Schmutzkonzentration des Reinigers im n -ten Bad
 V_{Becken_n} = Volumen des n -ten Reinigungsbeckens
 $c_{n+1}(t)$ = Schmutzkonzentration des Reinigers aus dem Bad der nächsten Kaskadenstufe
 $\dot{V}_{\text{Reiniger}}$ = Volumenstrom des Reinigers, der durch die Kaskade strömt

Für jede Stufe der Reinigungskaskade ergibt sich also aus den Gleichungen (5.2) und (5.3) folgendes Differentialgleichungssystem:

$$\dot{V}_{\text{Schmutz}_n}(t) = V_{\text{Schmutz}_n}(t) \cdot c_{\text{max}} \cdot K_{\text{ges}_n} - V_{\text{Schmutz}_n}(t) \cdot c_n(t) \cdot K_{\text{ges}_n} \quad (5.4)$$

$$\dot{c}_n(t) = c_{n+1}(t) \cdot \frac{\dot{V}_{\text{Reiniger}}}{V_{\text{Becken}_n}} - c_n(t) \cdot \frac{\dot{V}_{\text{Reiniger}}}{V_{\text{Becken}_n}} + V_{\text{Schmutz}_n}(t) \cdot \frac{c_{\text{max}} \cdot K_{\text{ges}_n}}{V_{\text{Becken}_n}} - V_{\text{Schmutz}_n}(t) \cdot c_n(t) \cdot \frac{K_{\text{ges}_n}}{V_{\text{Becken}_n}} \quad (5.5)$$

$K_{\text{ges}_n} = K_{\text{Temperatur}} \cdot T_n \cdot K_{\text{Reiniger}} = \text{Zusammenfassung von Konstanten}$

Dabei wird die letzte Stufe der Kaskade mit frischem Reiniger versorgt, so dass für diese gilt:

$$c_{n+1}(t) = 0 \quad (5.6)$$

Das dargestellte nichtlineare Differentialgleichungssystem ist mit analytischen Mitteln nicht lösbar, obwohl die Schmutzablösefunktion in Gleichung (5.2) möglichst einfach angesetzt wurde. Daher soll die Lösung numerisch durch Simulation in geeigneten Zeitschritten erfolgen. Es sollen also für verschiedene Nassreinigungs-, Spül- und Trocknungsprozesse Module erstellt werden, deren Zustandsänderungen im Zeitverlauf gemäß der oben formulierten Gleichungen vonstatten gehen. Aus diesen Modulen soll der Gesamtprozess zusammengesetzt werden.

5.1.5 Simulationsansatz

Wie bereits in Kap. 3.2.1 dargelegt, unterscheidet Bossel in /BOS94/ vier Gruppen von Simulationsansätzen. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben.

1. Eigenentwicklung

Die gesamte Simulationssoftware wird in einer gängigen Programmiersprache, wie Pascal, C oder Java geschrieben. Dem hohen Aufwand steht dabei der Vorteil der größtmöglichen Flexibilität gegenüber.

2. Simulationsverfahren mit einer gängigen Programmiersprache als Modellsprache

Hier wird lediglich die Modellierung in einer gängigen Programmiersprache vorgenommen. Für die Simulationsumgebung wird eine Bibliothek verwendet, welche Funktionen für verschiedene, immer wiederkehrende Aufgaben in der Simulation bereitstellt. Dadurch reduziert sich der Aufwand gegenüber Ansatz 1, jedoch reduziert die begrenzte Anzahl angebotener Funktionen wiederum die Flexibilität des Simulationssystems.

3. Simulationsverfahren in einer speziellen Programmiersprache als Modellsprache

Hier wird eine spezielle Simulationssprache zur Modellierung eingesetzt, wovon mittlerweile einige erhältlich sind. Auch Funktionen für die Simulationsumgebung werden bereitgestellt. Einem gegenüber Ansatz 2 nochmals reduzierten Aufwand steht wiederum eine Verringerung der Flexibilität bei der Modellierung gegenüber.

4. Interaktive Modellerstellung ohne Programmieraufwand

Bei diesem Ansatz wird eine vorgefertigte Simulationssoftware verwendet, die der Anwender nur noch bedient. Es ist keine Programmierung mehr erforderlich. Die Modellierung erfolgt meist graphisch mit der Maus. Dadurch ist der Aufwand hier am geringsten. Allerdings ist der Anwender auf die Funktionalität des Programms beschränkt, so dass auch die Flexibilität am niedrigsten ist.

Die Auswahl eines für das zu erstellende Simulationssystem geeigneten Simulationsansatzes beschränkt sich von vornherein auf einen der beiden ersten Ansätze, da gemäß Kapitel 5.1.3.4 eine Verbreitung über das Internet und damit einhergehend eine Plattformunabhängigkeit gefordert ist. Jedoch gibt es bis dato weder eine spezielle Simulationssprache (Ansatz 3), noch eine vorgefertigte Simulationssoftware (Ansatz 4), welche nicht an eine oder wenige verschiedene Computerplattformen gebunden ist. Auch wird die gegenüber den ersten beiden Ansätzen geringere Flexibilität meist nicht ausreichen, um später ein Optimierverfahren in Form eines Evolutionären Algorithmus mit dem Simulationssystem zu koppeln.

Demnach muss zunächst eine gängige, plattformunabhängige Programmiersprache ausgewählt werden, mit der dann einer der ersten beiden Ansätze verfolgt wird. Hier eignet sich hervorragend die objektorientierte Programmiersprache Java, welche gemäß /KRU02/ von den Designern der Firma SUN Microsystems folgendermaßen konzipiert wurde: „Java soll eine einfache, objektorientierte, verteilte, interpretierte, robuste, sichere, architekturneutrale, portable, performante, nebenläufige, dynamische Programmiersprache sein.“

Die Architekturneutralität und Portabilität führt dazu, dass Java mitunter als „Internet-Programmiersprache“ bezeichnet wird. Erreicht wird die Plattformunabhängigkeit durch den Ansatz, Java-Programme zunächst in einen so genannten „Bytecode“ zu compilieren, welcher zur Ausführung von einer virtuellen Maschine interpretiert wird. Der Bytecode kann nun über das Internet verteilt und auf verschiedensten Endgeräten ausgeführt werden, da solche virtuellen Java-Maschinen für zahlreiche verschiedene Plattformen zur Verfügung stehen. Sogar einige gängige Internet-Browser haben eingebaute virtuelle Maschinen, welche so genannte „Java Applets“ direkt im Browserfenster ausführen können. Sie stehen allerdings technisch bzw. hinsichtlich der Version hinter den aktuellen virtuellen Maschinen der Betriebssysteme zurück, so dass „Java Applications“, wie die normalen, nicht browsertauglichen Applikationen genannt werden, auf neuere und weiter entwickelte Funktionen zurückgreifen können. Ein Ableiten eines Applets aus einer bestehenden Application ist ansonsten problemlos möglich. Nähere Informationen hierzu befinden sich beispielsweise in /KRU02/ und /ULL03/.

Ein weiterer großer Vorteil der Programmiersprache Java ist ihre Objektorientiertheit. Der in Kapitel 5.1.3.3 im Hinblick auf eine gute Erweiterbarkeit geforderte modulare Aufbau des Simulationssystems lässt sich so sehr komfortabel realisieren, indem die einzelnen Module als Objekte programmiert werden, welche neben der Datenstruktur auch gleich die erforderlichen Methoden mit der gewünschten Funktionalität zur Verfügung stellen.

Die Forderungen aus Kapitel 5.1.3 nach einer benutzerfreundlichen graphischen Prozessmodellierung und einer möglichst flexiblen Auswertung der Simulationsläufe können am besten erfüllt werden, wenn die gesamte Simulationsumgebung im Hinblick auf die Aufgabenstellung frei programmiert wird. Eine geeignete, frei verfügbare Funktionsbibliothek zur Unterstützung dieser Programmierätigkeit ist dabei nicht zu finden. Somit wird an dieser Stelle der Simulationsansatz 1 gewählt, also die Programmierung des gesamten Simulationssystems in der Programmiersprache Java.

5.2 Modellierung von Reinigungsprozessen

5.2.1 Prozess

Für eine Simulation von Bauteilreinigungsanlagen müssen die darin ablaufenden Reinigungsprozesse modelliert werden. Gemäß Kapitel 5.1.2 sind hier zunächst Tauchreinigungsprozesse zu betrachten. **Bild 5.1** zeigt ein Beispiel eines solchen Prozesses. Für eine möglichst große Flexibilität und Erweiterbarkeit soll ein modularer Aufbau realisiert werden, bei dem der Prozess aus einzelnen Modulen zusammengesetzt wird.

Da die Programmierung in der objektorientierten Programmiersprache Java erfolgen soll, bietet es sich an, jedes Modul als eigene Objektklasse zu programmieren. So können dann für die verschiedenen Reinigungs-, Spül- und Trocknungsstufen jeweils Instanzen dieser Klassen erzeugt und die gewünschten Parameter eingestellt werden. Für den Weg der Reinigungs- und Spülflüssigkeiten werden weiterhin Module für Quellen, Senken sowie Aufbereitungseinrichtungen benötigt. Außerdem muss die Möglichkeit geschaffen werden, letztere mit den Reinigungs- und Spülmodulen zu verbinden sowie Überläufe zwischen den Becken zu verschalten.

Die Reinigung in einem mehrstufigen Tauchreinigungsprozess erfolgt getaktet in Chargen. Auch für diese zu reinigenden Bauteilchargen muss eine Objektklasse erstellt werden. Ebenso werden Klassen für die am Prozess beteiligten Stoffe (Flüssigkeiten mit ggf. Zusatzstoffen und Verschmutzungen) benötigt.

Die verschiedenen Objektklassen für die Module des Simulators sollen im Folgenden näher beschrieben werden. Wo dies erforderlich ist, werden dabei zur graphischen Verdeutlichung Klassendiagramme verwendet, welche nach der gängigen Objektbeschreibungssprache UML (Unified Modeling Language) aufgebaut sind. Eine Beschreibung dieser Diagramme findet sich beispielsweise in /KRU02/ und /ULL03/. Eine Objektklasse wird dabei als Rechteck dargestellt, welches in drei Bereiche eingeteilt ist (s. beispielsweise **Bild 5.3**):

- Im oberen Bereich ist der Klassenname dargestellt.
- Im mittleren Bereich werden die Eigenschaften (properties) des Objektes in Form der definierten Variablen aufgelistet.
- Im unteren Bereich sind die für das Objekt definierten Methoden (methods) aufgeführt. Dabei werden in Klammern die Variablentypen der zu übergebenden Parameter und hinter einem Doppelpunkt der Typ des Rückgabewertes angegeben.

Den Variablen- und Methodennamen wird noch ein Kurzzeichen vorangestellt, welches die programmtechnische Zugänglichkeit bzw. Sichtbarkeit aus anderen Klassen heraus kennzeichnet:

- Öffentlich zugängliche Bezeichner (public) werden mit einem „+“ versehen
- Für die Klasse und ihre Erben geschützte Bezeichner (protected) werden mit einem „#“ gekennzeichnet.
- Nur privat für die Klasse zugängliche (private) Bezeichner werden mit einem „-“ versehen.

Diese Zeichen sind zwar für die Programmierung, jedoch nicht für das grundsätzliche Verständnis der einzelnen Klassen von Bedeutung.

5.2.2 Stoffe

Die Klasse „Stoffe“ ist eine sogenannte abstrakte Klasse, da von ihr in keinem Fall Objekte abgeleitet werden. Statt dessen enthält sie Informationen über die verschiedenen in dem Simulationsprogramm vorkommenden Stoffe, also Flüssigkeiten, Zusatzstoffe und Verschmutzungen. Zu jeder dieser Stoffgruppen wird die Anzahl der bekannten Stoffe gespeichert und für jeden Stoff eine Bezeichnung. Zu jedem Stoff werden weitere Eigenschaften (Beispielsweise die Dichte, die spezifische Wärmekapazität usw.) hinterlegt. Der Vorteil, all diese Daten in einer abstrakten Klasse zusammenzufassen, liegt in der guten Erweiterbarkeit des Systems um neue Stoffe. Beispielsweise können neue Reinigungsmittel durch Eintragen in die Klasse „Stoffe“ in das Simulationssystem integriert werden. Weitere Änderungen sind dabei nicht erforderlich.

5.2.3 Flüssigkeit

Die Objektklasse „Fluessigkeit“ beschreibt Flüssigkeiten als ein Gemisch aus den in der Klasse „Stoffe“ definierten Flüssigkeitsarten mit Zusätzen und enthaltenen Verunreinigungen.

Dementsprechend gibt es drei Arrays „Fluessigkeitsmenge[]“, „Zusatzmenge[]“ und „Schmutzmenge[]“, in der die jeweiligen Mengen mit der Volumeneinheit Liter geführt werden. Zur Reduzierung des Rechenaufwandes wird jeweils noch die Gesamtsumme der Flüssigkeiten, der Zusätze und der Verschmutzungen mitgeführt, obwohl diese durch Aufaddieren in den Arrays jederzeit berechenbar sind.

Weiterhin besitzt jede Flüssigkeit eine Temperatur, und die Höchstmenge des jemals in dieser Flüssigkeit vorhandenen Gesamtschmutzes wird festgehalten.

Flüssigkeiten treten an unterschiedlichen Stellen in der simulierten Bauteilreinigungsanlage auf: Sie befinden sich in den Tauch- und Spülbädern, werden von Quellen abgegeben und von Senken aufgenommen, haften als verschleppte Flüssigkeit an Bauteilchargen usw.

Dementsprechend werden zahlreiche Methoden zur Manipulation von Flüssigkeiten zur Verfügung gestellt. Flüssigkeiten können in beliebiger Menge und Zusammensetzung erzeugt werden. Verschiedene Flüssigkeitsgemische können zu einer neuen Flüssigkeit vermischt werden, wobei die Temperatur des Gemisches unter Berücksichtigung der in der Klasse „Stoffe“ hinterlegten spezifischen Wärmekapazitäten neu berechnet wird. Ein Abschöpfen einer bestimmten Flüssigkeitsmenge ist ebenso möglich wie das Hinzugeben bestimmter Mengen einzelner Bestandteile. Einen guten Überblick über alle zur Verfügung stehenden Methoden gibt das UML-Klassendiagramm, welches in **Bild 5.3** dargestellt ist.

Sind beispielsweise in einem Liter Reinigungslösung aus Wasser und 5% Tensiden 100 ml Öl enthalten, könnte das entsprechende Flüssigkeitsobjekt folgendermaßen erzeugt werden:

```
Fluessigkeit BeispielFl = new Fluessigkeit();
BeispielFl.setFluessigkeitsmenge(Stoffe.Wasser, 0.95);
BeispielFl.setZusatzmenge(Stoffe.Tensid, 0.05);
BeispielFl.setSchmutzmenge(Stoffe.Oel, 0.1);
```

Fluessigkeit
<pre>#Fluessigkeitsmenge: double[] #Fluessigkeitssumme: double #maxSchmutz: double #Schmutzmenge: double[] #Schmutzsumme: double #temp: double #Zusatzmenge: double[] #Zusatzsumme: double</pre>
<pre>+aehnlich(Fluessigkeit, double): boolean +Fluessigkeit() +Fluessigkeit_raus(int, double): boolean +Fluessigkeit_rein(int, double) +Fluessigkeitskonzentration(int): double +Gemisch_abschoepfen(double): Fluessigkeit +Gemisch_dazu(Fluessigkeit) +getFluessigkeitsmenge(int): double +getFluessigkeitssumme(): double +getGesamtvolumen(): double +getmaxSchmutz(): double +getSchmutzmenge(int): double +getSchmutzsumme(): double +getTemp(): double +getWaermeCp(): double +getWaermeEnergie(): double +getZusatzmenge(int): double +getZusatzsumme(): double +gibStatus(BufferedWriter) +kopieren(): Fluessigkeit +Schmutz_raus(int, double): boolean +Schmutz_rein(int, double) +Schmutzkonzentration(int): double +setFluessigkeitsmenge(int, double) +setmaxSchmutz(double) +setSchmutzmenge(int, double) +setTemp(double) +setZusatzmenge(int, double) +volumen_veraendern(double) +Zusatz_raus(int, double): boolean +Zusatz_rein(int, double) +Zusatzkonzentration(int): double</pre>

Bild 5.3 Klassendiagramm zu der Objektklasse „Fluessigkeit“

5.2.4 Bauteilcharge

Die zu reinigenden Bauteile durchlaufen den Prozess getaktet in Chargen. Sobald die Taktzeit um ist, werden die Chargen eine Stufe weitergesetzt. In die erste Stufe wird eine neue verschmutzte Charge gegeben, und aus der letzten Stufe wird eine gereinigte Charge entnommen.

Eine solche Charge besteht aus einer festen Anzahl an Bauteilen mit einem bestimmten Gesamtvolumen. Je nach Geometrie können die Bauteile auch als Schüttgut gehandhabt werden, was durch ein Setzen der Bauteilanzahl auf Null repräsentiert wird. In jedem Fall ist das Volumen entscheidend, da dieses in den Becken Flüssigkeit verdrängt. Die veränderliche Bauteiltemperatur wird in einer Variablen geführt. Werkstoffeigenschaften, beispielsweise die Dichte, die spezifische Wärmekapazität usw. wird ebenfalls mit der Charge gespeichert.

Weiterhin wird mit jeder Charge Flüssigkeit verschleppt, entweder durch Adhäsion an den Bauteiloberflächen oder durch eine schöpfende Geometrie der Bauteile. Dementsprechend kann das Verschleppungsvolumen pro Charge sehr unterschiedlich sein.

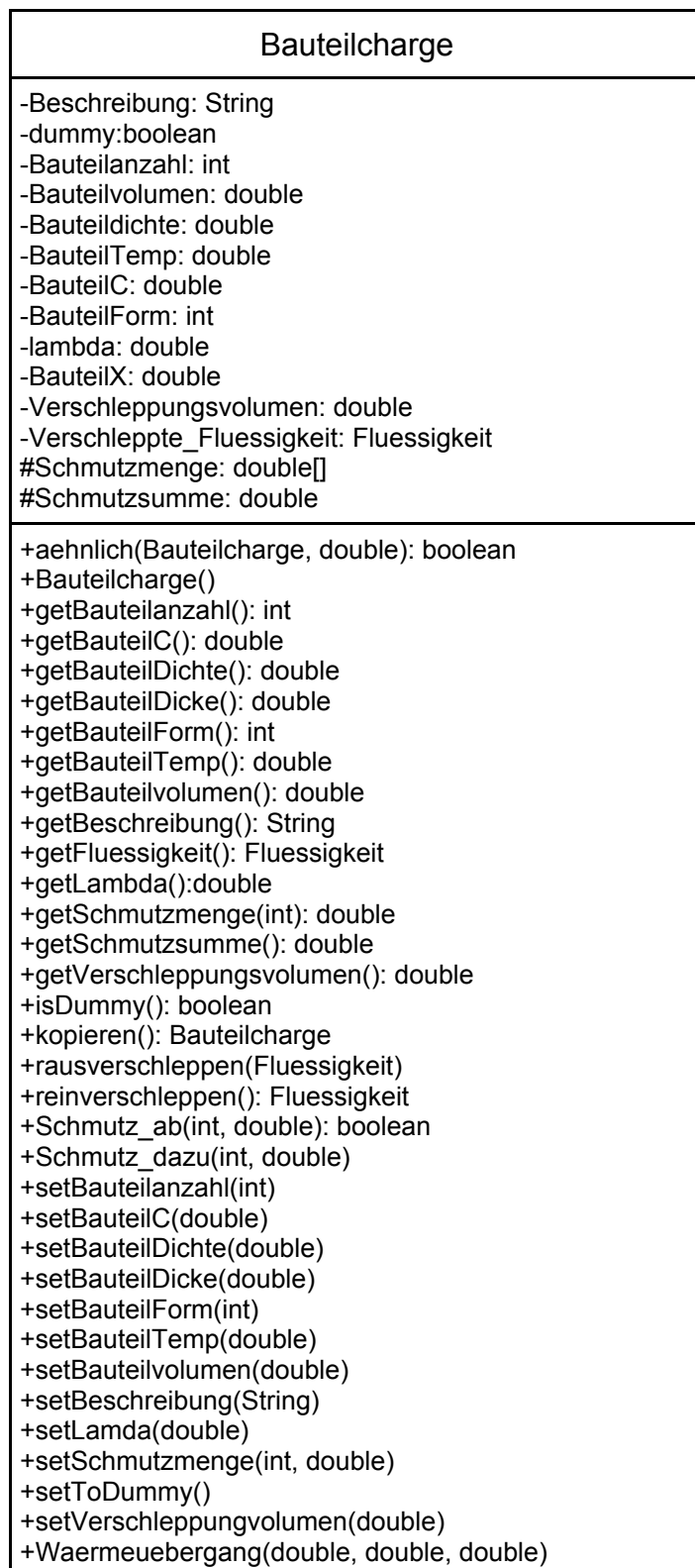


Bild 5.4 Klassendiagramm zu der Objektklasse „Bauteilcharge“

Für die verschleppte Flüssigkeit beinhaltet die Klasse „Bauteilcharge“ eine Variable „Verschleppte_Fluessigkeit“ vom Typ „Fluessigkeit“. Weiterhin haftet an dem Bauteil Schmutz an, der sich aus den verschiedenen in „Stoffe“ definierten Verschmutzungsarten zusammensetzen kann. Dafür gibt es ein Array „Schmutzmenge[]“.

Die zur Verfügung gestellten Methoden sind in dem Klassendiagramm in **Bild 5.4** übersichtlich dargestellt.

Bei der Reinigung wird normalerweise Schmutz von den Bauteilen entfernt. Dazu gibt es die Funktion „Schmutz_ab“. Es kann jedoch auch zu einer Rückverschmutzung kommen, beispielsweise bei der Trocknung. Dies ermöglicht die Funktion „Schmutz_dazu“.

Wenn zwischen den Bauteilen und der Flüssigkeit im Becken ein Temperaturunterschied herrscht, findet ein Wärmeübergang statt. Dies führt die Funktion „Waermeuebergang“ durch. Sie erhält als Parameter einen betrachteten Zeitraum, die Temperatur der umgebenden Flüssigkeit sowie den Wärmeübergangskoeffizienten Alpha. Der Rückgabewert ist dann die Wärmemenge in Joule, welche die Bauteile an die Flüssigkeit abgeben. Werden die Bauteile von der Flüssigkeit aufgeheizt, ist der Wert negativ. Über die Wärmekapazität der Bauteile wird außerdem eine neue Bauteiltemperatur berechnet.

Bei der Entnahme einer Charge aus einem Becken muss die Verschleppung berücksichtigt werden: Die Funktion „rausverschleppen“ erhält als Parameter eine Flüssigkeit, nämlich den Inhalt des Beckens, aus dem die Charge entnommen wird. Dort schöpft die Bauteilcharge nun eine Flüssigkeit mit dem Volumen „Verschleppungsvolumen“ ab und speichert diese in der Variablen „Verschleppte_Fluessigkeit“. Die Funktion „reinverschleppen“ gibt die verschleppte Flüssigkeit wieder ab. Der Rückgabewert ist eine Flüssigkeit, welche dem Becken hinzugefügt werden muss, in das die Charge eingesetzt wird.

5.2.5 Station

In der Bauteilreinigungsanlage durchlaufen die Bauteilchargen verschiedene Stationen. Dies können Reinigungs-, Spül- oder Trocknungsstufen sein. Die Basisfunktionalität einer solchen Station ist allerdings immer die gleiche, so dass zunächst eine Basisklasse „Station“ definiert wird, von der dann die speziellen Stufen abgeleitet werden.

Eine Station hat eine Bezeichnung, kann eine Bauteilcharge aufnehmen und nach einer gewissen Verweildauer wieder abgeben. Weiterhin verbraucht sie Energie. Die Grundfunktionalität ist dem Klassendiagramm in **Bild 5.5** zu entnehmen.

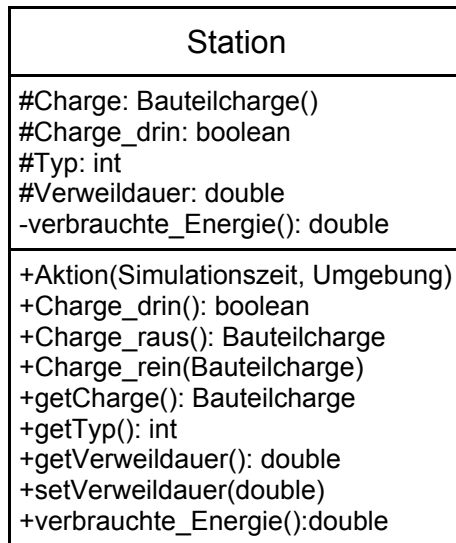


Bild 5.5 Klassendiagramm zu der Objektklasse „Station“

5.2.6 Tauchreinigungsstufe

Die Tauchreinigungsstufe bildet die Hauptkomponente, aus welcher der zu simulierende Reinigungsprozess zusammengesetzt wird. Es handelt sich um ein Reinigungsbecken mit einem vorgegebenen Volumen, in dem sich eine Flüssigkeit „Inhalt“ befindet. Dies ist die zunächst saubere Reinigungslösung, in die mit der Zeit die von den Bauteilen abgelösten Verunreinigungen eingetragen werden. Daher ist ein kontinuierlicher Schmutzaustrag erforderlich, welcher durch einen kontinuierlichen Zufluss an frischem Reiniger aus einer Quelle, aus einer Aufbereitungsstufe oder aus einem nachfolgenden Tauchbecken (Kaskadenschaltung) realisiert wird. Der verunreinigte Beckeninhalte fließt dabei über einen Überlauf ab. Eine schematische Darstellung einer solchen Tauchreinigungsstufe zeigt bereits **Bild 5.2** in Kapitel 5.1.4. Das Klassendiagramm der aus der Klasse „Station“ (s. **Bild 5.5**) abgeleiteten Klasse „Tauchbecken“ ist in **Bild 5.6** dargestellt.

Jedes Tauchbecken hat eine Solltemperatur und eine installierte Heizleistung, mit der diese Temperatur erreicht bzw. gehalten werden soll. Zur Unterstützung der Reinigungswirkung können außerdem Ultraschallschwinger installiert werden, welche durch ihre Ultraschallleistung in Watt pro Liter Beckenvolumen charakterisiert werden.

In der Tauchreinigungsstufe werden nun alle Stoffe (Flüssigkeiten und Verschmutzungen) bilanziert. Neben dem Flüssigkeitsobjekt für den Beckeninhalte ist durch die Ableitung von der Klasse „Station“ auch ein Bauteilchargeobjekt für die im Becken befindliche Charge verfügbar. Eine Kaskadenschaltung mit anderen Becken ist über die Variable „Ueberlauf_von“ möglich, in welcher dasjenige Becken gespeichert werden kann, dessen Überlauf in das aktuelle Becken mündet.

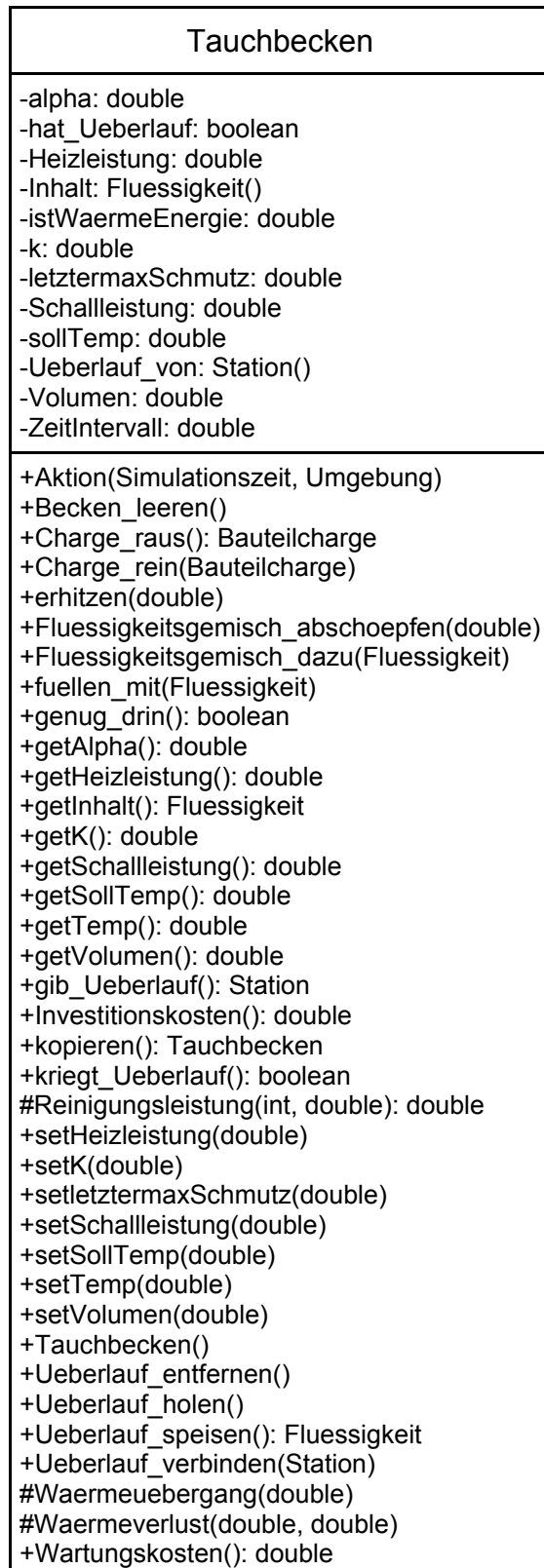


Bild 5.6 Klassendiagramm zu der Objektklasse „Tauchbecken“

Neben der Stoffbilanzierung erfolgt auch eine Wärmebilanzierung, welche für die Ermittlung des Energieverbrauchs der Heizung erforderlich ist. Dies erfolgt über die Funktionen „Waermeverlust“, „Waermeuebergang“ und „erhitzen“.

„Waermeverlust“ wird mit jedem Zeitschritt der Simulation aufgerufen. Hier wird die von dem Beckeninhalte an die Umgebung abgegebene Wärme durch die Beckenwände und vor allem von der Badoberfläche (Verdunstungswärme) abgeschätzt. Diese Wärmemenge reduziert die Temperatur im Becken.

„Waermeuebergang“ ruft die bereits in Kapitel 5.2.4 beschriebene gleichnamige Funktion der im Becken befindlichen Bauteilcharge auf. Diese liefert als Rückgabewert die Wärmemenge, welche von der Bauteilcharge an die Flüssigkeit im Becken abgegeben wird. Je nach Vorzeichen wird der Beckeninhalte dadurch aufgeheizt oder abgekühlt.

Liegt die Beckentemperatur unter der definierten Solltemperatur, wird die Funktion „erhitzen“ aufgerufen. Diese berechnet die erforderliche Wärmemenge, mit der die Solltemperatur wieder erreicht wird. Reicht die installierte Heizleistung nicht aus, wird der Beckeninhalte lediglich mit der maximalen von der Heizung im betrachteten Zeitschritt lieferbaren Wärmemenge erhitzt. Die dabei verbrauchte Energie wird über die schon von der Elternklasse „Station“ gelieferte Funktion „Energie_verbrauchen“ registriert.

Die wichtigste Funktion der Klasse „Tauchbecken“ ist die Reinigung selber. Die Funktion „Aktion“ wird in jedem Zeitschritt aufgerufen. Sie steuert nicht nur die oben beschriebenen Funktionen zur Wärmebilanzierung, sondern auch die eigentliche Reinigung, also das Ablösen von Schmutz von der Bauteilcharge und das Einfügen dieses Schmutzes in die Flüssigkeit im Becken.

Dazu ist wiederum eine Funktion „Reinigungsleistung“ definiert. Diese gibt für jede vorhandene Schmutzart den Anteil der an den Bauteilen befindlichen Schmutzmenge zurück, der in dem betrachteten Zeitintervall abgelöst wird. Wie bereits in Kapitel 5.1.4 dargelegt, hängt dieser Wert von zahlreichen Faktoren ab. Dazu gehören die Zusammensetzung der Reinigungsflüssigkeit im Becken, die Badbelastung mit Verunreinigungen, die Temperatur im Becken und die eventuell vorhandene Ultraschallunterstützung.

Der Einfluss dieser Faktoren kann mit Hilfe der statistischen Versuchsmethodik ermittelt werden, was jedoch bei der Vielzahl der möglichen Kombinationen an Verschmutzungen und Reinigungsmittel relativ aufwändig ist. An dieser Stelle wird daher der Einfluss der verschiedenen Parameter lediglich abgeschätzt, um ein funktionsfähiges Simulationssystem zu programmieren und um auf Grundlage der Annahmen eine spätere Optimierung mit Hilfe evolutionärer Algorithmen zu implementieren. Gleichzeitig ermöglicht der offene, modulare Aufbau des Simulators ein späteres Übernehmen von für den konkreten Einzelfall gewonnenen Versuchsergebnissen, indem lediglich die Funktion „Reinigungsleistung“ verändert wird.

Die Formel für die Reinigungsleistung wird folgendermaßen definiert:

$$P_R = t[s] \cdot \lambda_T \cdot \lambda_B \cdot \lambda_{US} \cdot \lambda_R \quad (5.7)$$

P_R = Reinigungsleistung (Anteil am gesamten an den Bauteilen anhaftenden Schmutz der betrachteten Art)

t = betrachteter Zeitschritt

λ_T = Temperaturfaktor

λ_B = Badbelastungsfaktor

λ_{US} = Ultraschallfaktor

λ_R = Reinigerfaktor

Der Temperatureinfluss soll dabei den in Kapitel 5.1.4 beschriebenen Zusammenhang der Verdoppelung der Reinigungsleistung bei einer Temperaturerhöhung um 10 °C berücksichtigen. Dementsprechend lautet die Formel für den Temperaturfaktor:

$$I_T = 2^{\frac{T[\text{°C}]}{10}} \quad (5.8)$$

I_T = Temperaturfaktor

T = Badtemperatur

Der Zusammenhang zwischen Reinigungsleistung und Temperatur ist in **Bild 5.7** exemplarisch für eine konstante Einstellung der anderen Faktoren dargestellt.

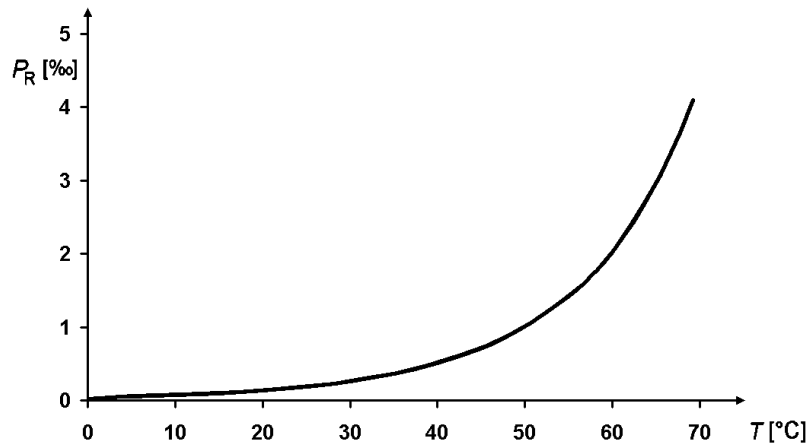


Bild 5.7 Temperatureinfluss auf die Reinigungsleistung

Der Badbelastungsfaktor berücksichtigt die Konzentration des bereits im Becken enthaltenen Schmutzes. Erreicht diese einen reinigerabhängigen Sättigungswert, findet keine weitere Reinigung statt. Für geringere Schmutzkonzentrationen wird ein linearer Einfluss auf die Reinigungswirkung angenommen (s. **Bild 5.8**):

$$I_B = \max[0; (K_{SR} - c_n)] \quad (5.9)$$

I_B = Badbelastungsfaktor

K_{SR} = Sättigungskonstante des Reinigers (Annahme: $K_{SR} = 0.1$)

c_n = Schmutzkonzentration im Becken

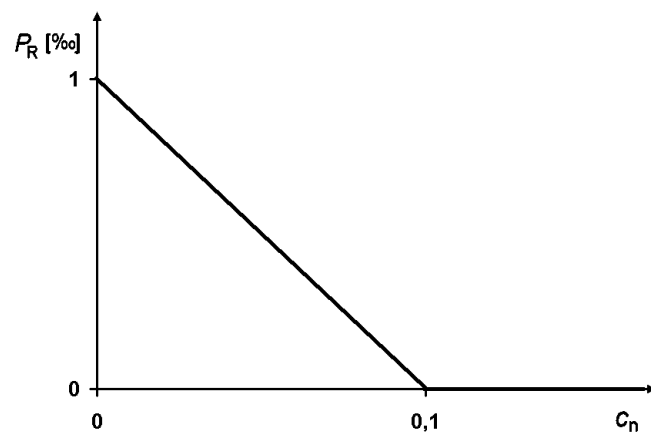


Bild 5.8 Einfluss der Badbelastung auf die Reinigungsleistung

Eine Ultraschallunterstützung wirkt sich nur in einem bestimmten Leistungsbereich aus. Hier wird angenommen, dass dieser Bereich zwischen 8 und 20 Watt pro Liter Beckenvolumen liegt (vgl. Kap. 5.1.4). Unterhalb von 8 W/l besteht kein Einfluss auf die Reinigungsleistung, so dass der Ultraschallfaktor hier gleich 1 gesetzt wird. Oberhalb von 20 W/l bleibt der Faktor auch bei einer weiteren Leistungssteigerung konstant. Dazwischen wird ein linearer Einfluss angenommen (s. **Bild 5.9**):

$$I_{\text{US}} = 1 + \frac{\min\left[20; \max\left(P_{\text{US}}\left[\frac{\text{W}}{\text{l}}\right]; 8\right)\right] - 8}{10} \quad (5.10)$$

I_{US} = Ultraschallfaktor

P_{US} = Ultraschalleistung

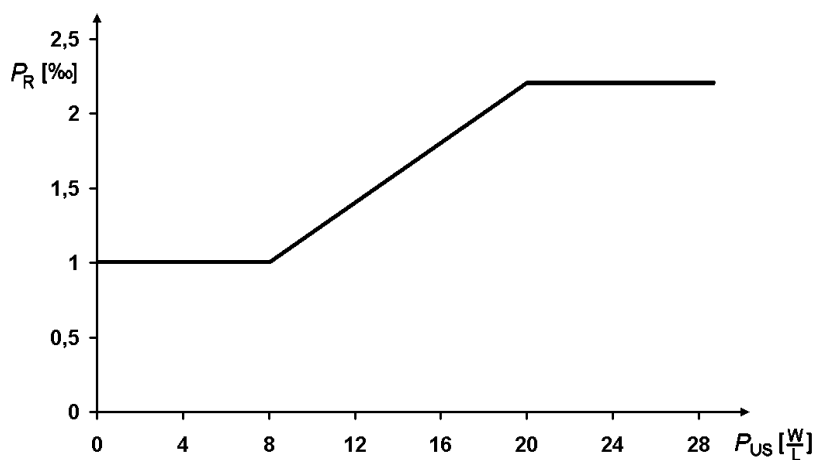


Bild 5.9 Ultraschalleinfluss auf die Reinigungsleistung

Der Reinigerfaktor wird zunächst mit $I_{\text{R}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ angenommen. Damit ergeben sich bei der Simulation von der Größenordnung her realistische Restschmutzwerte. Eine Zusammenfassung der Gleichungen (5.7) bis (5.10) ergibt dann folgende Gleichung für die Reinigungsleistung, welche in der Methode „Reinigungsleistung“ der Objektklasse „Tauchreinigung“ implementiert ist:

$$P_{\text{R}} = t[\text{s}] \cdot 2 \frac{T[^\circ\text{C}]}{10} \cdot \max[0; (0,1 - c_{\text{n}})] \cdot \left(1 + \frac{\min\left[20; \max\left(P_{\text{US}}\left[\frac{\text{W}}{\text{l}}\right], 8\right)\right] - 8}{10} \right) \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \quad (5.11)$$

P_{R} = Reinigungsleistung (Anteil am gesamten an den Bauteilen anhaftenden Schmutz der betrachteten Art)

t = betrachteter Zeitschritt

T = Badtemperatur

c_{n} = Schmutzkonzentration im Becken

P_{US} = Ultraschalleistung

5.2.7 Spülstufe

Eine Spülstufe ist genauso aufgebaut, wie eine Tauchreinigungsstufe. Der Unterschied besteht lediglich in der Funktion: Beim Spülen wird die mit den Bauteilen verschleppte Reinigungs-

flüssigkeit, welche ja auch noch gelöste Verunreinigungen enthält, abgespült. Dies erfolgt meist mit klarem, ggf. auch vollentsalztem Wasser. Eine weitere Schmutzablösung von den Bauteilen findet dabei jedoch nicht statt.

Die Klasse „Spuelbecken“ ist daher von der Klasse „Tauchbecken“ abgeleitet und stellt exakt die gleiche Funktionalität zur Verfügung, bis auf die Funktion „Aktion“, welche hier überschrieben wird: Diese sorgt lediglich für die Wärmebilanzierung, ruft jedoch nicht die Reinigungsfunktion auf. Alternativ könnte auch direkt die Klasse „Tauchbecken“ verwendet werden, wobei die Funktion „Reinigungsleistung“ für reines Wasser den Wert 0 zurückgeben müsste. Im Hinblick auf die klare Trennung der Funktionen und zur Reduzierung des Rechenaufwandes wurde hier jedoch die abgeleitete Klasse „Spuelbecken“ eingeführt.

5.2.8 Quelle

Eine Quelle versorgt ein Tauch- oder Spülbecken mit einem kontinuierlichen Volumenstrom einer fest vorgegebenen Flüssigkeit mit einer bestimmten Temperatur. Die Flüssigkeits- und Zusatzanteile dieses Flüssigkeitsobjektes „Speisewasser“ sowie der Volumenstrom können über Methoden eingestellt werden. Für die spätere Kostenbetrachtung kann auch ein Kostensatz in Euro pro Liter dieser Flüssigkeit hinterlegt werden.

Das von der Quelle gespeiste Tauch- oder Spülbecken wird in der Stationsvariablen „Anschluss“ gespeichert. Einen Überblick über die Objektklasse „Quelle“ gibt **Bild 5.10**.

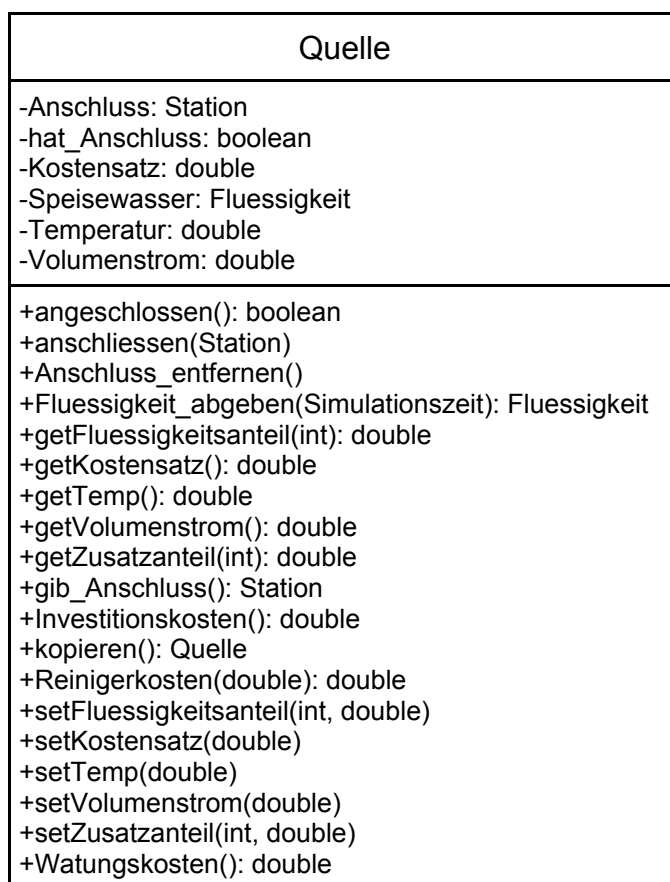


Bild 5.10 Klassendiagramm zu der Objektklasse „Quelle“

5.2.9 Senke

In einer Senke wird die Flüssigkeit gesammelt, die aus dem angeschlossenen Tauch- oder Spülbecken abfließt. Sie gelangt in ein Flüssigkeitsobjekt „Inhalt“. Für die Entsorgung kann ein Kostensatz hinterlegt werden, welcher bei der Berechnung der Betriebskosten der Anlage benötigt wird. Wie bei der Quelle wird das angeschlossene Becken in einer Variable „Anschluss“ gespeichert. Das Klassendiagramm der Objektklasse „Senke“ findet sich in **Bild 5.11**.

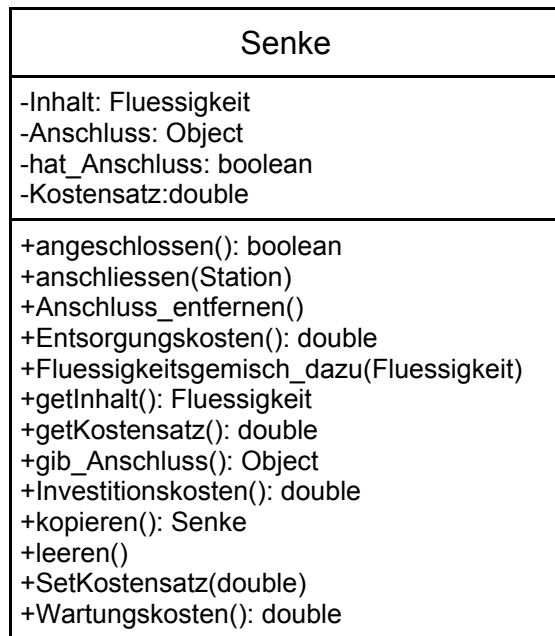


Bild 5.11 Klassendiagramm zu der Objektklasse „Senke“

5.2.10 Aufbereitung

Eine Reinigeraufbereitungseinrichtung beinhaltet prinzipiell eine Quelle und eine Senke gleichzeitig. Das verunreinigte Reinigungsmittel gelangt in die Senke, wird aber nicht sofort entsorgt, sondern in einem Tank gesammelt. Aus diesem Tank speist die Quelle wiederum ihr angeschlossenes Becken. Um die Verschmutzung in diesem Kreislauf gering zu halten, ist ein kontinuierlicher Schmutzaustrag erforderlich. Dies geschieht beispielsweise durch Filterung des Tankinhaltes, oder auch durch Einsatz eines Ölabscheiders. Der dabei anfallende Abfall wird entsorgt. Der Verlust an Volumen wird durch Nachfüllen von Frischreiniger in den Tank ausgeglichen. Der prinzipielle Aufbau einer Aufbereitungseinrichtung ist in **Bild 5.12** schematisch dargestellt.

Die programmtechnische Realisierung der Klasse „Aufbereitung“ wird aus dem Klassendiagramm in **Bild 5.13** ersichtlich. Wie eine Quelle besitzt eine Aufbereitung eine Flüssigkeit „Speisewasser“, mit der zunächst der Tank gefüllt wird und die auch beim Nachfüllen zum Einsatz kommt.

Das Reinigungs- oder Spülbecken, welches von der Aufbereitungseinrichtung gespeist wird, wird in „Ausgang“ gespeichert, das Becken, dessen Überlauf in den Reinigertank der Aufbereitung führt, in „Eingang“.

Der „Inhalt“, der bei einer Senke direkt der Entsorgung zugeführt wird, verkörpert hier nun den Tankinhalt mit einem festen Volumen, welches beispielsweise 1000 Liter beträgt. Es wird

deshalb relativ groß gewählt, weil dadurch Strömungen im Tank durch Zu- und Abflüsse relativ geringe Badbewegungen erzeugen, so dass sich ölhaltige Verunreinigungen an der Tankoberfläche absetzen können.

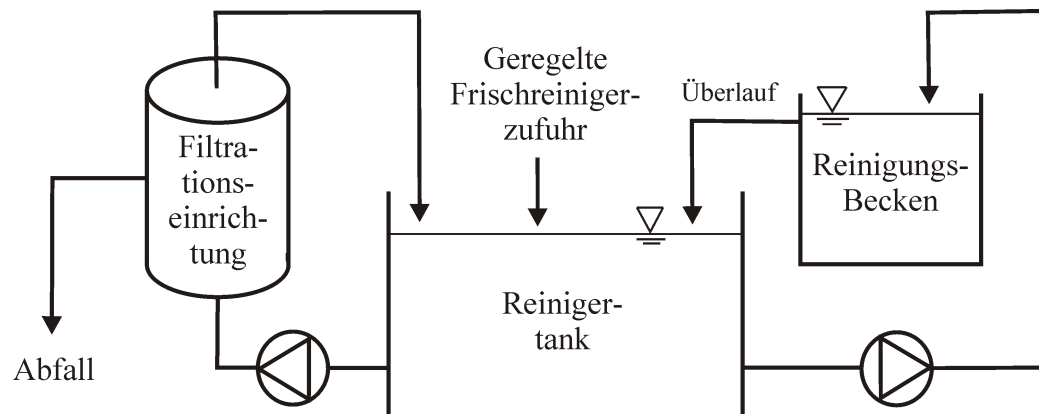


Bild 5.12 Schema einer Reinigeraufbereitungseinrichtung

Die eigentliche Aufbereitung des Tankinhaltes wird von der Funktion „Aktion“ ausgeführt, welche analog zur gleichnamigen Funktion bei den Tauchbecken (s. Kapitel 5.2.6) in jedem Zeitschritt ausgeführt wird. Dabei wird eine bestimmte Menge von jeder Verschmutzungsart aus dem Tankinhalt ausgetragen. Die Menge wird von der Funktion „Reinigungsleistung“ ermittelt. Da hier kein bestimmtes Aufbereitungsverfahren, sondern nur der Schmutzaustrag modelliert werden soll, wird an dieser Stelle eine abstrakte „Kläerleistung“ in Watt definiert, welche sich linear auf den Anteil des aus dem Tank ausgetragenen Schmutzes auswirkt und welche zu einem Energieverbrauch der Aufbereitungsstufe führt:

$$W_{\text{Kl}} = t[\text{s}] \cdot P_{\text{Kl}}[\text{W}] \cdot 10^{-5} \quad (5.12)$$

W_{Kl} = Klärwirkung (Anteil am gesamten im Tank vorhandenen Schmutz der betrachteten Art)

t = betrachteter Zeitschritt

P_{Kl} = Klärleistung

Damit wird bei 1000 Watt Klärleistung in jeder Sekunde ein Prozent des Schmutzes aus dem Tank ausgetragen. Dieser Schmutz wird direkt der Variablen „Abfall“ zugeführt, welcher später mit einem „Abfallkostensatz“ entsorgt werden muss.

Weiterhin erfolgt auch, wie bereits für die Tauchbecken beschrieben (s. Kapitel 5.2.6), eine Wärmebilanzierung: Wenn der Tank aus einem beheizten Becken befüllt wird, ist die Temperatur des Tankinhaltes höher als die Umgebungstemperatur. In diesem Fall wird über die Funktion „Waermeverlust“ mit jedem Aufruf von „Aktion“ Wärme durch die Tankwände an die Umgebung abgegeben. Ein Nachheizen auf eine Solltemperatur erfolgt allerdings nicht. Ebenso wenig werden Bauteile in den Tank gegeben, so dass auch kein Wärmeübergang stattfinden kann.

Die Funktion „Aktion“ ruft als Letztes die Funktion „nachfuellen“ auf, welche dafür sorgt, dass der Reinigertank wieder auf sein volles Volumen aufgefüllt wird. Der dabei verbrauchte Frischreiniger wird in der Variablen „Frischreinigerverbrauch“ gesammelt, so dass über den Verbrauch und einen Kostensatz („Frischkostensatz“) die Reinigerkosten für den Prozess ermittelt werden können.

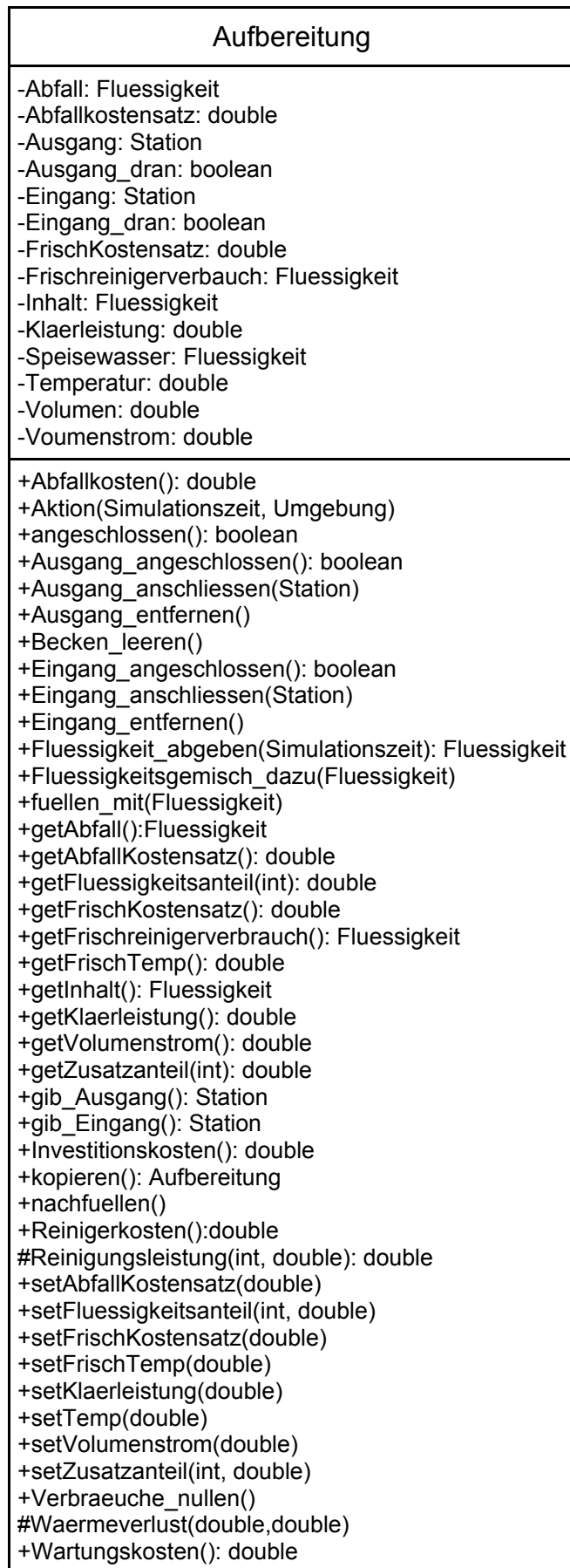


Bild 5.13 Klassendiagramm zu der Objektklasse „Aufbereitung“

5.2.11 Warmlufttrocknen

Beim Warmlufttrocknen handelt es sich um eine Station des Reinigungsprozesses. Es ist meist die letzte Station, in welche die Bauteilcharge gelangt. Daher ist die Klasse „Warmlufttrocknen“ (s. **Bild 5.14**) programmtechnisch von der Klasse „Station“ abgeleitet (s. Kapitel 5.2.5), welche die Funktionalität für das Ein- und Ausbringen der jeweiligen Bauteilcharge zur Verfügung stellt.

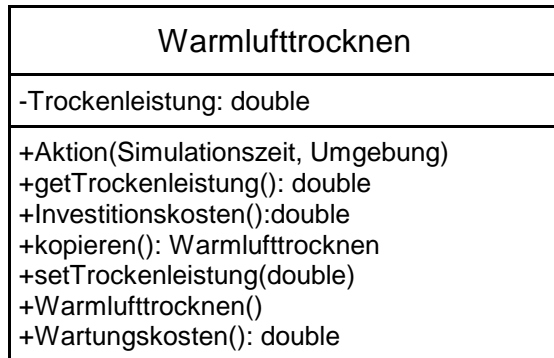


Bild 5.14 Klassendiagramm zu der Objektklasse „Warmlufttrocknen“

Bei der Warmlufttrocknung soll die an der Bauteilcharge anhaftende verschleppte Flüssigkeit möglichst vollständig verdunsten. Der darin gelöste oder dispergierte Schmutz bleibt dabei allerdings auf den Bauteilen zurück. Um dies zu simulieren, muss die Funktion „Aktion“ der Klasse „Warmlufttrocknen“ in jedem Zeitschritt einen Teil der verschleppten Flüssigkeit entfernen und den darin enthaltenen Schmutz wieder dem Bauteilschmutz zufügen (s. Beschreibung der Klasse „Bauteilcharge“ in Kapitel 5.2.4).

Wie groß diese Flüssigkeitsmenge pro Zeitschritt ist, hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab, allen voran von der eingesetzten Energiemenge. Einige andere Faktoren, wie beispielsweise die Geometrie der Bauteile und damit die Verteilung der verschleppten Flüssigkeit in der Charge, sind bis hierhin jedoch noch nicht bekannt. Da die Warmlufttrocknung nur eine Hilfsfunktion erfüllt und die Simulation der eigentlichen Bauteilreinigung im Vordergrund steht, soll an dieser Stelle auch keine detailliertere Modellierung erfolgen, sondern lediglich eine Abschätzung auf energetischer Ebene.

Dazu wird die Annahme getroffen, dass eine Warmlufttrockeneinrichtung bei Auslegung nach dem Stand der Technik weniger Energie verbraucht als ein Trockenofen, in dem die verschleppte Flüssigkeit zum Sieden gebracht und verdampft wird. Hierzu ist folgende Energiemenge erforderlich:

$$W_{\text{Fl}} = \left[(T_{\text{s_Fl}} - T_{\text{0_Fl}}) \cdot c_{\text{p_Fl}} + h_{\text{v_Fl}} \right] \cdot V_{\text{0_Fl}} \cdot \rho_{\text{Fl}} \quad (5.13)$$

W_{Fl} = Energiemenge für die Erhitzung und Verdampfung der Flüssigkeit [kJ]

$T_{\text{s_Fl}}$ = Siedetemperatur der Flüssigkeit [°C]

$T_{\text{0_Fl}}$ = Ausgangstemperatur der Flüssigkeit [°C]

$h_{\text{v_Fl}}$ = Verdampfungsenthalpie der Flüssigkeit [kJ/kg]

$c_{\text{p_Fl}}$ = spez. Wärmekapazität der Flüssigkeit [kJ/kg K]

$V_{\text{0_Fl}}$ = Ausgangsvolumen der Flüssigkeit [l]

ρ_{Fl} = Dichte der Flüssigkeit [kg/l]

Es ist nicht zu vermeiden, dass hierbei auch die Bauteile erwärmt werden. Allerdings ist im Normalfall die Masse der Bauteile sehr groß gegenüber der Masse der verschleppten Flüssigkeit, welche die Bauteile oft nur benetzt. Daher werden die Bauteile in der meist kurzen Taktzeit nicht bis auf die Siedetemperatur der Flüssigkeit erwärmt, sondern bleiben vor Allem im Inneren kühler. Die nach der Trocknung erreichte Bauteiltemperatur hängt von vielen Faktoren beim Wärmeübergang ab, welche hier nicht bekannt sind. Daher soll der Wärmeübergang derart abgeschätzt werden, dass sich die Bauteilcharge in zehn Sekunden um 1 K erwärmt. Die Endtemperatur liegt damit in Kelvin um ein Zehntel der Taktzeit in Sekunden höher als die Anfangstemperatur, jedoch niemals über der Siedetemperatur der Flüssigkeit. Für die Erwärmung ist dann folgende Energiemenge erforderlich:

$$W_{\text{Baut}} = \min \left[(T_{\text{s_Fl}} - T_{0_\text{Baut}}); \frac{t_{\text{T}}}{10 \text{ s}} \text{ K} \right] \cdot c_{\text{p_Baut}} \cdot V_{\text{Baut}} \cdot \rho_{\text{Baut}} \quad (5.14)$$

W_{Baut} = Energiemenge für die Erwärmung der Bauteile [kJ]

$T_{\text{s_Fl}}$ = Siedetemperatur der Flüssigkeit [°C]

T_{0_Baut} = Ausgangstemperatur der Bauteile [°C]

t_{T} = Chargentaktzeit [s]

$c_{\text{p_Baut}}$ = spez. Wärmekapazität der Bauteile [kJ/kg K]

V_{Baut} = Volumen der Bauteile [l]

ρ_{Baut} = Dichte der Bauteile [kg/l]

Die Ausgangstemperatur der Bauteile und der verschleppten Flüssigkeit hängt von der Temperatur im letzten Becken ab und wird jeweils als Eigenschaft der Klassen „Bauteilcharge“ (s. Kapitel 5.2.4) bzw. „Flüssigkeit“ (s. Kapitel 5.2.3) mitgeführt.

Die gesamte für die Trocknung benötigte Energie ist die Summe der beiden Energiemengen für die Erhitzung und Verdampfung der Flüssigkeit und für die Erwärmung der Bauteile. Die benötigte Trockenleistung, um die Bauteile innerhalb einer Taktzeit vollständig zu trocknen, ergibt sich durch Teilen dieser gesamten benötigten Energiemenge durch die Taktzeit:

$$P_{\text{Tr_soll}} = \frac{W_{\text{Fl}} + W_{\text{Baut}}}{t_{\text{T}}} \quad (5.15)$$

$P_{\text{Tr_soll}}$ = Solltrockenleistung für vollständige Trocknung [kW]

W_{Fl} = Energiemenge für die Erhitzung und Verdampfung der Flüssigkeit gemäß Gleichung (5.13) [kJ]

W_{Baut} = Energiemenge für die Erwärmung der Bauteile gemäß Gleichung (5.14) [kJ]

t_{T} = Chargentaktzeit [s]

Eine Möglichkeit ist es nun, während der Simulation diese Solltrockenleistung zu ermitteln und damit die Trocknungseinrichtung zu dimensionieren. Dann muss die Methode „Aktion“ in jedem Zeitschritt genau den Anteil der verschleppten Flüssigkeit entfernen, den der Zeitschritt an der Chargentaktzeit hat. Wird jedoch eine andere Trockenleistung modelliert, soll deren Verhältnis zur Solltrockenleistung noch als Faktor hinzukommen:

$$V_{\text{Tr}} = \frac{P_{\text{Tr}}}{P_{\text{Tr_soll}}} \cdot \frac{t_{\text{S}}}{t_{\text{T}}} \cdot V_{0_\text{Fl}} \quad (5.16)$$

V_{Tr} = Volumen der pro Zeitschritt getrockneten Flüssigkeit [l]

P_{Tr} = installierte Trockenleistung der Trocknungsstufe [kW]

$P_{\text{Tr_soll}}$ = Solltrockenleistung für vollständige Trocknung [kW]

t_{S} = Zeitschritt der Simulation [s]

t_{T} = Chargentaktzeit [s]

V_{0_Fl} = Ausgangsvolumen der Flüssigkeit [l]

Dieses Volumen wird von der verschleppten Flüssigkeit abgeschöpft, und der darin enthaltene Schmutz wird wieder dem Bauteilschmutz hinzugefügt.

5.2.12 Zusammenschaltung zum Prozess

Aus den in den vorigen Unterkapiteln beschriebenen Modulen kann nun der zu simulierende Reinigungsprozess zusammenschaltet werden. Dazu werden von den Objektklassen Objekte abgeleitet und in so genannten Vektoren gespeichert. Vektoren sind Java-Konstrukte, in denen Objekte flexibel zusammengefasst werden können, ähnlich einem dynamischen Array für normale Variablen. Die Objekte haben dabei eine feste Reihenfolge in dem Vektor, jedoch können an beliebigen Stellen Objekte entfernt oder weitere Objekte eingefügt werden.

Der Hauptvektor zur Speicherung eines Prozesses ist der „ProzessV“. In ihm werden alle Stationen des Prozesses abgelegt, und zwar in der Reihenfolge, in der sie von den Bauteilchargen durchlaufen werden. Von den beschriebenen Modulen können hier also Tauchbecken, Spülbecken und Warmlufttrockenstationen aufgenommen werden.

Der Weg der Reinigungs- und Spülflüssigkeiten wird zum einen über die Verschaltung der Becken untereinander mit Überläufen (s. Kapitel 5.2.6) und zum anderen über das Hinzufügen von Quellen, Senken und Aufbereitungseinrichtungen realisiert. Dies sind Module, die nicht von Bauteilchargen durchlaufen werden, weshalb sie nicht in dem Hauptvektor „ProzessV“ gespeichert werden. Statt dessen werden drei weitere Vektoren eingeführt: „QuellenV“, „SenkenV“ und „AufbereitungsV“. In ihnen werden alle Quellen, Senken bzw. Aufbereitungen gespeichert, wobei die Reihenfolge keine Rolle spielt. Die Verschaltung mit den angeschlossenen Tauch- und Spülbecken geschieht über die in Kapitel 5.2.8, 5.2.9 und 5.2.10 beschriebenen Methoden, indem die jeweilige Station im Versorgungsmodul als angeschlossen gespeichert wird.

Zur Verdeutlichung der beschriebenen Datenstruktur für Reinigungsprozesse ist in **Bild 5.15** die Repräsentation eines beispielhaften Prozesses dargestellt.

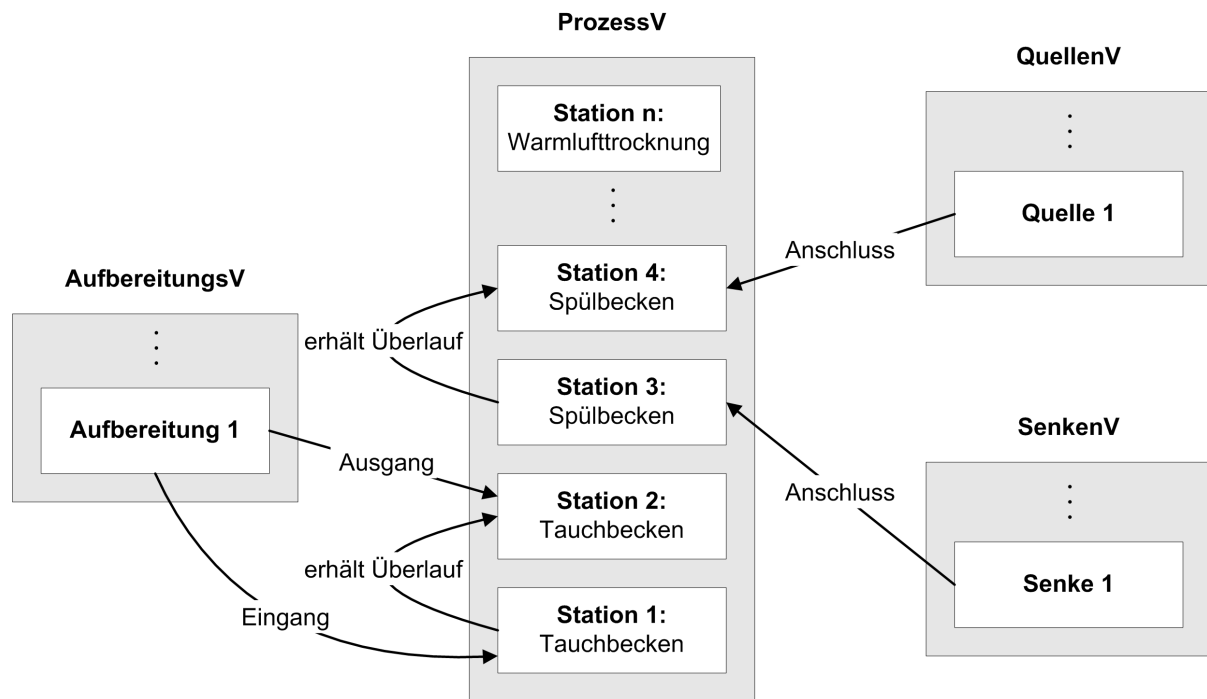


Bild 5.15 Beispiel eines Reinigungsprozesses als Datenstruktur

5.2.13 Ausblick auf weitere Module

Durch den modularen Aufbau ist eine Erweiterung des Simulationssystems problemlos möglich. So könnten beispielsweise weitere Objektklassen für Reinigungsstationen von der Klasse „Station“ abgeleitet werden, welche andere Reinigungsverfahren simulieren. Die Funktion „Aktion“ müsste dann die bei dem spezifischen Verfahren zu modellierende Funktionalität zur Verfügung stellen.

Auch bei den in den vorigen Unterkapiteln beschriebenen Modulen, vor allem bei den „Tauchbecken“, lassen sich durch Umprogrammieren der Funktion „Aktion“ leicht Änderungen vornehmen, um neue Erkenntnisse, beispielsweise bezüglich der Schmutzablösung, zu berücksichtigen.

5.3 Implementierung des Simulationssystems

5.3.1 Simulatorobjekt

Die eigentliche Simulation erfolgt in einem Objekt der Klasse „Berechnung“, dessen Konstruktor das in Kapitel 5.2 beschriebene Modell des zu simulierenden Prozesses in Form von Übergabeparametern erhält. Mit diesem Modell wird der Simulationsalgorithmus gestartet, welcher in dem zweiteiligen Flussdiagramm in **Bild 5.16** und **Bild 5.17** dargestellt ist.

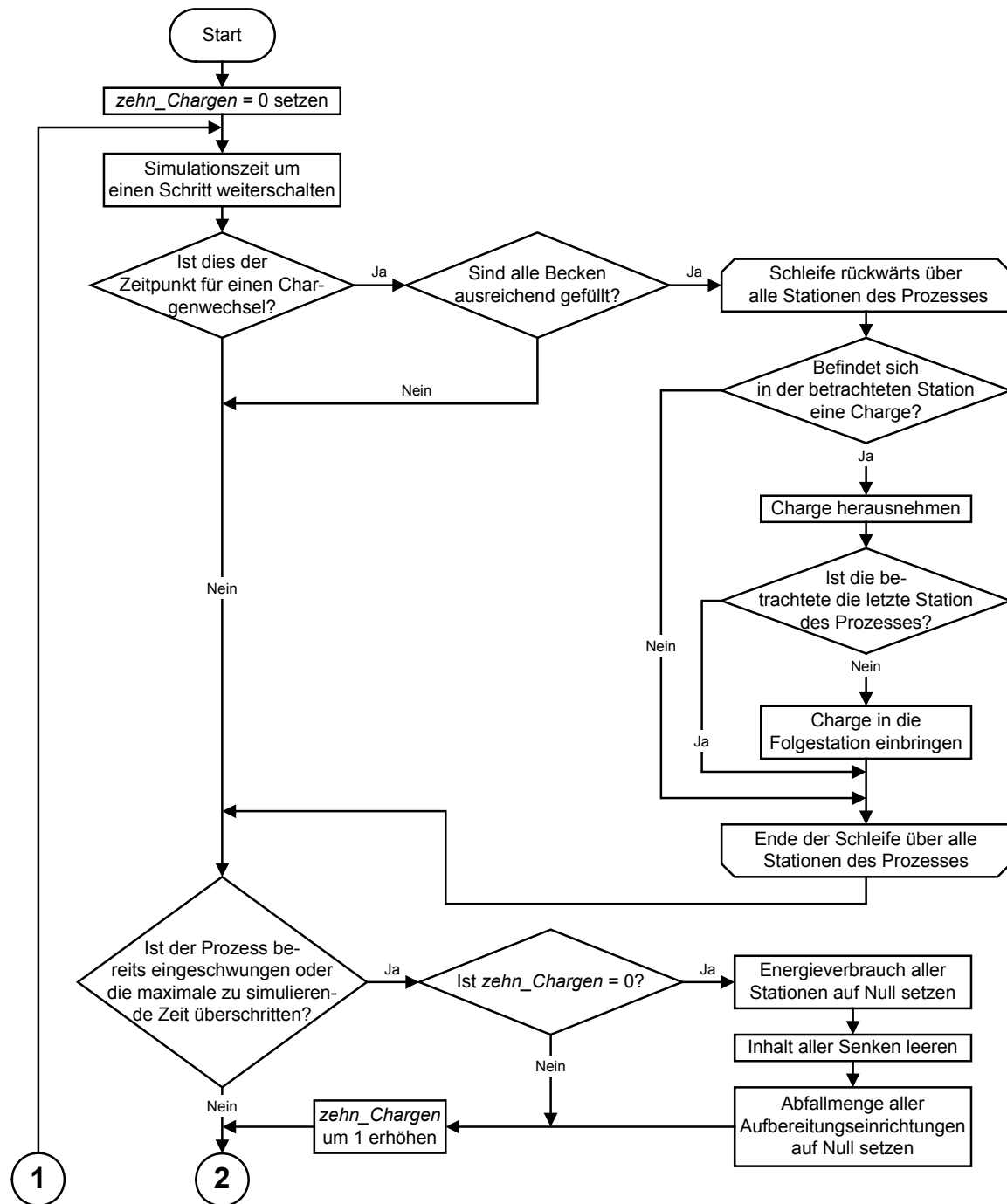


Bild 5.16 Flussdiagramm des Simulators, Teil 1

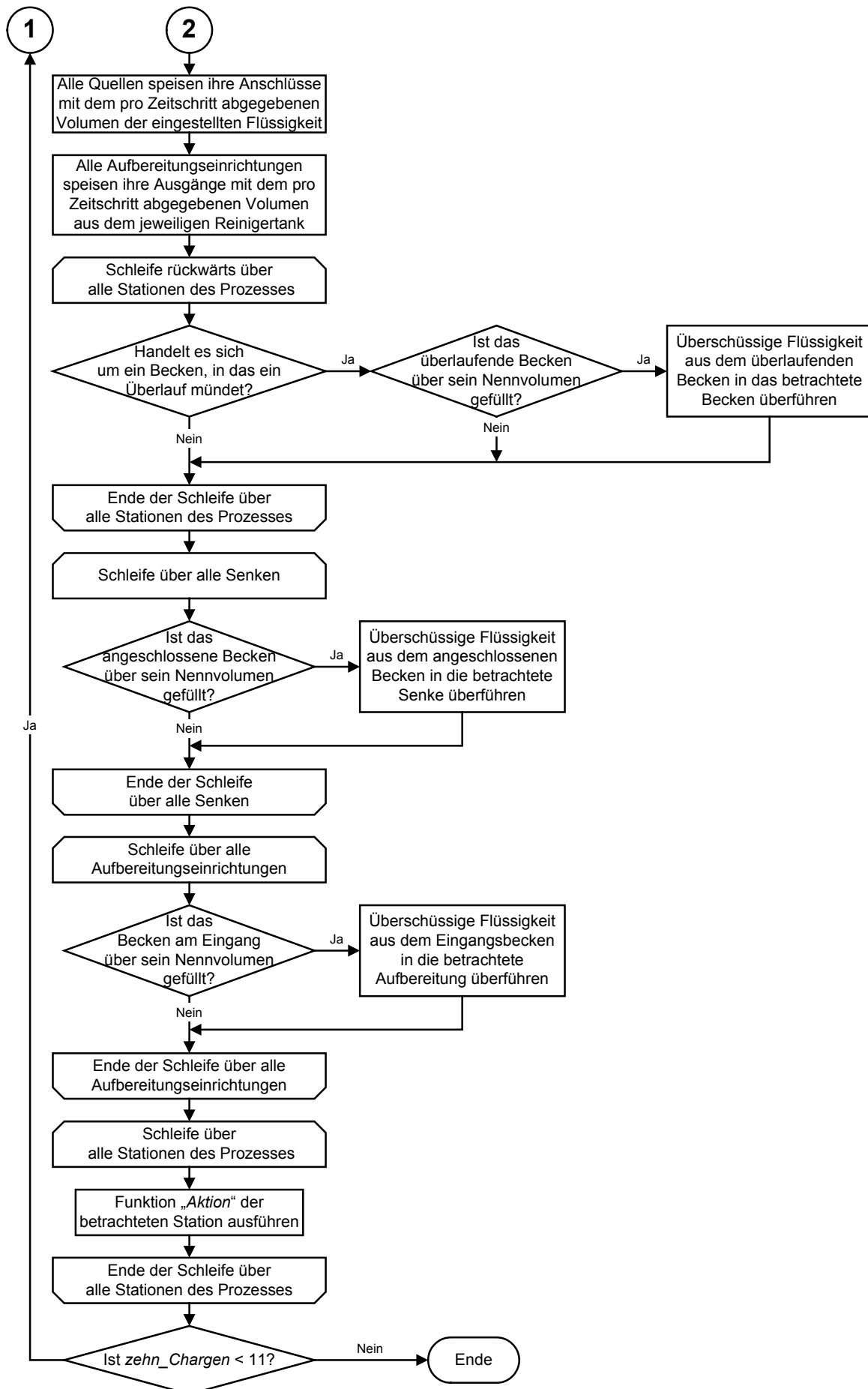


Bild 5.17 Flussdiagramm des Simulators, Teil 2

Es handelt sich um eine große Simulationsschleife, in der bei jedem Durchlauf die Simulationszeit um einen vorgegebenen Zeitschritt weitergeschaltet wird. Innerhalb dieses Zeitschrittes wird nun die Funktionalität des Prozesses simuliert. Dies geschieht im unteren Teil der Schleife, welcher in **Bild 5.17** dargestellt ist.

Dabei werden zunächst alle Quellen aus dem „QuellenV“ betrachtet. Jede dieser Quellen ist an ein Becken angeschlossen. An dieses Becken gibt sie nun eine definierte Menge der voreingestellten Flüssigkeit ab. Diese bestimmt sich aus dem eingestellten Volumenstrom, multipliziert mit der Länge des Zeitschrittes der Simulation.

Desgleichen wird mit allen Aufbereitungseinrichtungen aus dem „AufbereitungsV“ verfahren. Hier werden die an den Ausgängen der Aufbereitungen angeschlossenen Becken mit Flüssigkeit aus den Reinigertanks aufgefüllt.

Nun sind die aufgefüllten Becken möglicherweise voller, als es ihr Nennvolumen erlaubt. Daher werden nun alle Stationen des Prozesses zur Berücksichtigung der Überläufe durchlaufen. Dies geschieht rückwärts, da in einer Kaskade immer das hintere Becken mit einer Quelle oder Aufbereitungseinrichtung versorgt wird und dann per Überlauf die vorderen Becken weiterversorgt. Jedes Becken, in welches ein Überlauf aus einem nachgeschalteten Becken mündet, schöpft nun soviel Flüssigkeit aus dem überlaufenden Becken ab, bis dessen Inhalt wieder auf das Nennvolumen gesunken ist. Durch den objektorientierten Ansatz mit der Klasse „Fluessigkeit“ (s. Kapitel 5.2.3) werden dabei alle Flüssigkeits- und Zusatzarten sowie gelöste oder dispergierte Verunreinigungen korrekt bilanziert.

Zum Schluss befindet sich der „Flüssigkeitsüberschuss“ im ersten Becken jeder Kaskade, da dieses keinen weiteren Überlauf in ein anderes Becken besitzt. Statt dessen ist hier eine Senke oder der Eingang einer Aufbereitungseinrichtung angeschlossen. Daher werden nun zunächst alle Senken aus dem „SenkenV“ durchlaufen. Sind die angeschlossenen Becken über ihr Nennvolumen hinaus gefüllt, wird die überschüssige Flüssigkeit abgeschöpft und dem Senkeninhalt zugefügt. Danach wird mit den Aufbereitungen und den an deren Eingängen angeschlossenen Becken ebenso verfahren, wobei die überschüssige Flüssigkeit in den Aufbereitungstank gefüllt wird.

Damit ist der Weg der Reinigungs- und Spülflüssigkeiten simuliert. Es fehlt noch die eigentliche Funktionalität der einzelnen Prozessstationen, beispielsweise die Schmutzablösung von den Bauteilen. Dazu werden alle Stationen aus dem „ProzessV“ durchlaufen und bei ihnen die Funktion „Aktion“ ausgeführt. Die Auswirkungen hängen von der Art der Station ab. Sie wurden bereits in Kapitel 5.2 für Tauchbecken, Spülbecken und Warmlufttrockeneinrichtungen beschrieben.

Für das Handling der Bauteilchargen ist der obere Teil der Schleife verantwortlich, welcher in **Bild 5.16** dargestellt ist. Dabei wird zunächst bei jedem Schleifendurchlauf geprüft, ob der Zeitpunkt für einen Chargenwechsel gekommen ist. Dies ist immer dann der Fall, wenn seit dem letzten Chargenwechsel wieder genau die vorgegebene Taktzeit verstrichen ist.

Dann wird zunächst geprüft, ob alle Becken ausreichend gefüllt sind. Dies erfolgt, weil zu Beginn der Simulation alle Becken leer sein können und es dann noch keinen Sinn macht, Bauteilchargen in den Prozess einzubringen. Statt dessen müssen die Quellen und Aufbereitungen zunächst die Becken füllen, und erst dann kann der eigentliche Reinigungsprozess beginnen.

Ist diese Bedingung erfüllt, werden zunächst alle Chargen eine Station weitergereicht. Dazu wird der Prozess rückwärts durchlaufen. Wenn in der jeweils betrachteten Station eine Charge enthalten ist, was zu Beginn der Simulation nicht der Fall sein muss, wird diese herausgenommen und in die nachfolgende Station gegeben. Dabei wird im Falle von Tauch- oder Spülbecken auch die Verschleppung berücksichtigt, da diese Funktionalität in den Objektklassen „Tauchbecken“ und „Bauteilcharge“ verankert ist (s. Kapitel 5.2.6 bzw. 5.2.4).

Die letzte Charge wird als gereinigt aus dem Prozess genommen. Hieran kann die erzielte Bauteilreinheit bzw. Restverschmutzung betrachtet werden. Zuletzt wird noch eine neue Bauteilcharge mit der definierten Anfangsver Verschmutzung in die erste Station des Prozesses eingebracht.

Die Simulation benötigt nun noch eine Abbruchbedingung für die große Simulationsschleife. Dies sollte idealerweise der Zeitpunkt sein, an dem der simulierte Reinigungsprozess eingeschwungen ist. Zu Beginn der Simulation sind alle Becken im Normalfall frei von Verunreinigungen. Letztere werden erst allmählich durch die Bauteilchargen in den Prozess eingetragen. Daher steigt die Verschmutzung in den Becken zunächst von Charge zu Charge an und damit auch die Restverschmutzung auf den Bauteilen. Erst nach einiger simulierter Zeit stellt sich ein stationärer Zustand ein, und nur dieser ist für den Praxiseinsatz von Interesse.

Um zu erkennen, wann dieser eingeschwungene Zustand erreicht ist, wird bei jedem Chargentakt der Zustand der Becken und der gereinigten Bauteilcharge mit dem des vorherigen Taktes verglichen. Liegen die Abweichungen der maximalen Beckenverschmutzung für jedes Becken und der Restverschmutzung auf den Bauteilen allesamt unterhalb eines festgelegten Wertes (beispielsweise 0,1 Promille), so wird der Prozess als eingeschwungen angesehen.

Für eine Abschätzung der Betriebskosten des simulierten Reinigungsprozesses ist nur der eingeschwungene Zustand relevant. Daher werden an dieser Stelle zunächst alle Verbräuche auf Null zurückgesetzt. Dies schließt die Energieverbräuche aller Stationen sowie den bis dahin gesammelten zu entsorgenden Abfall aller Senken und Aufbereitungseinrichtungen ein. Dann werden noch zehn weitere Chargentakte simuliert. Die dabei ermittelten Betriebskosten müssen später durch zehn geteilt werden, um die Kosten pro Charge zu ermitteln. Dieser Weg wurde gewählt, um etwaig auftretende Schwankungen zwischen einzelnen Takten, beispielsweise im Energieverbrauch für die Badaufheizung, auszugleichen.

Programmtechnisch wird das Ende der Simulation realisiert, indem eine Variable „zehn_Chargen“ vor der Simulation auf 0 gesetzt und bei Erreichen des eingeschwungenen Zustandes mit jeder Charge um 1 hochgezählt wird. Die Abbruchbedingung der Simulationsschleife ist dann erfüllt, wenn „zehn_Chargen“ größer als 10 ist.

Da es je nach Parametereinstellung vorkommen kann, dass es relativ lange dauert, bis ein Prozess eingeschwungen ist, kann auch eine maximale zu simulierende Zeitspanne vorgegeben werden. Bei deren Erreichen wird die Simulation ebenfalls beendet, so dass die Rechenzeit für einen Simulationslauf nicht allzu groß werden kann. Dies ist wichtig bei der späteren Anbindung eines Evolutionären Algorithmus, für den sehr viele Simulationsläufe verschiedener Prozesse erforderlich sind (s. Kapitel 6). Hier wird jedoch festgehalten, dass der Prozess nicht eingeschwungen ist und somit die Ergebnisse nicht verwendet werden dürfen.

5.3.2 Graphische Benutzeroberfläche

Das bis hierhin beschriebene Simulationssystem ist bereits vollständig lauffähig. Die Modellierung muss allerdings durch Programmierung der in Kapitel 5.2 beschriebenen Prozessstruktur erfolgen.

Die Ergebnisse der Simulation können beispielsweise durch Ausgabe der interessierenden Größen (z. B. Schmutzkonzentration in einzelnen Becken, Restschmutzmenge an der letzten gereinigten Charge) über den Zeitverlauf in eine Textdatei geschrieben, welche wiederum in ein Tabellenkalkulationsprogramm importiert und als Diagramm ausgegeben werden können.

Diese Vorgehensweise ist zwar flexibel, aber relativ umständlich, vor allem für weniger programmiererfahrene Anwender. Eine graphische Benutzeroberfläche für den Simulator schafft hier Abhilfe. Sie ermöglicht einerseits eine graphische Modellierung des zu simulierenden Prozesses und andererseits eine übersichtliche graphische Darstellung der Simulationsergebnisse.

Bild 5.18 zeigt die Oberfläche der Modellierumgebung, in der bereits beispielhaft ein Prozess erstellt wurde. Dieser Prozess ähnelt dem in **Bild 5.1** schematisch dargestellten, jedoch besteht die Spülkaskade hier aus drei anstatt aus zwei Spülstufen.

Die Stationen werden durch Sinnbilder dargestellt. Sie sind in der Reihenfolge durchnummeriert, in der sie von den Bauteilchargen durchlaufen werden, von links nach rechts. Die ersten beiden Stationen sind Tauchbecken, danach folgen drei Spülbecken und eine Warmlufttrocknung. Die Tauchbecken und die Spülbecken sind jeweils als Kaskade geschaltet. Die Überläufe werden durch die gebogenen Pfeile über den Stationen gekennzeichnet.

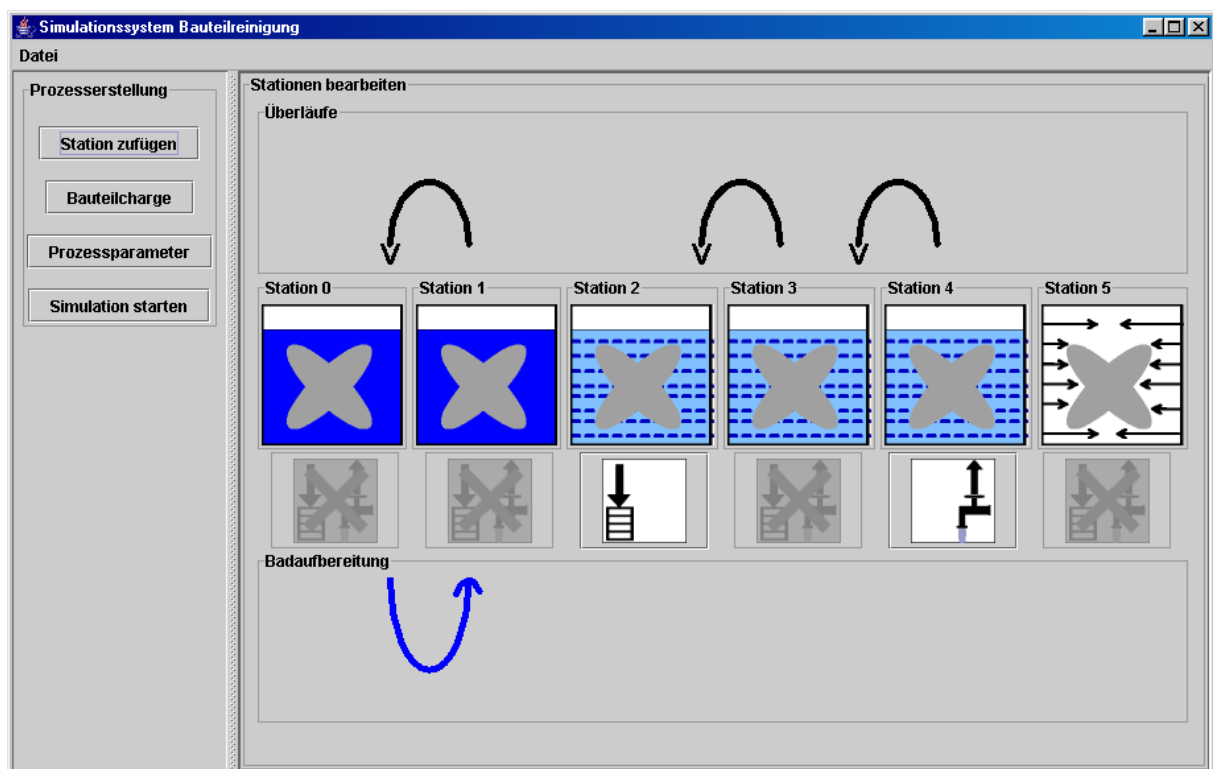


Bild 5.18 Beispielprozess in der graphischen Modellierumgebung

Die Versorgung der Tauchbecken mit Reiniger erfolgt durch eine Aufbereitungseinrichtung, welche durch den unteren gebogenen Pfeil gekennzeichnet ist. Die letzte Spülstation (Station 4) wird von einer Quelle versorgt, welche durch das darunterliegende Symbol eines Wasserhahnes repräsentiert wird. An die erste Spülstation (Station 2) ist eine Senke angeschlossen, welche ebenfalls als Symbol darunter dargestellt ist.

Weitere Stationen lassen sich mit dem Knopf „Station hinzufügen“ hinzufügen, welcher das in **Bild 5.19** dargestellte Fenster aufruft. Hier kann der Typ der einzufügenden Station sowie die gewünschte Position im Prozess gewählt werden.

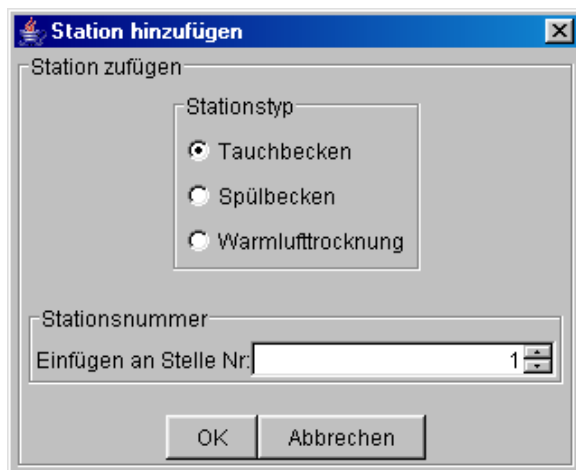


Bild 5.19 Hinzufügen von Stationen

Durch Rechtsklick auf eine Station im Prozess erscheint ein Kontextmenü, welches **Bild 5.20** zeigt. Hier können Veränderungen an der jeweiligen Station durchgeführt werden. „Station bearbeiten“ ruft das in **Bild 5.21** beispielhaft für ein Tauchbecken dargestellte Menü auf, in dem diverse Parameter der Station bearbeitet werden können. Hier kann auch ein Fenster aufgerufen werden, in dem die Flüssigkeit im Becken bearbeitet werden kann.

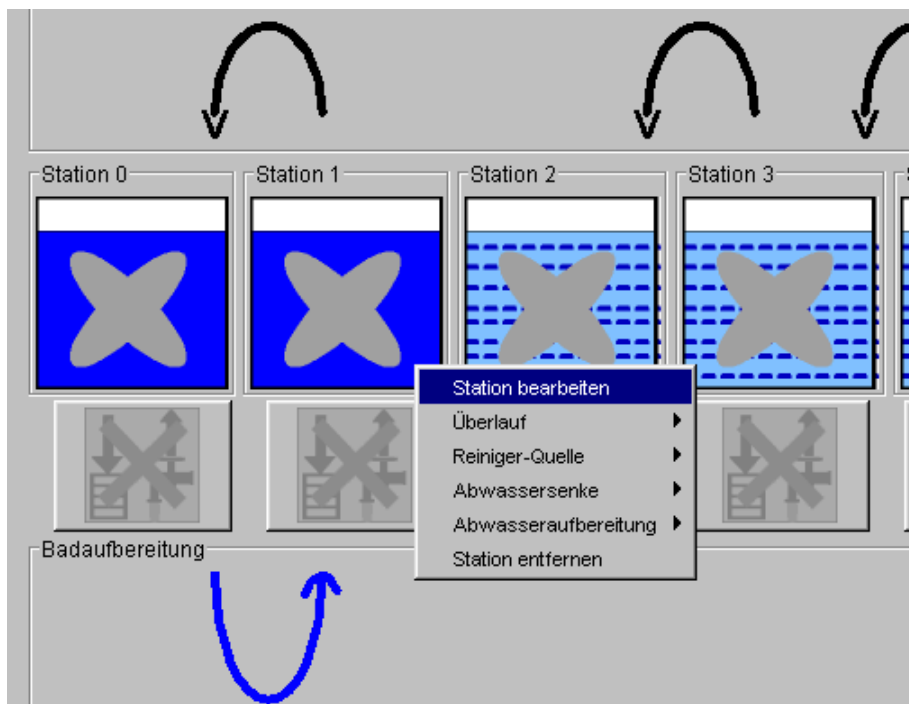
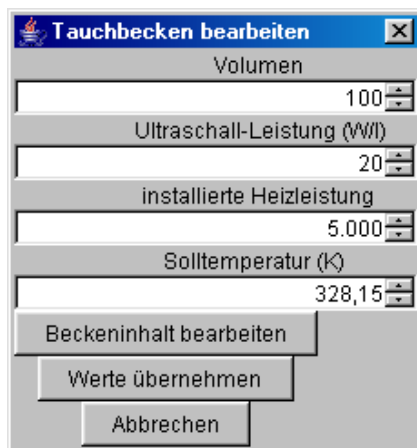


Bild 5.20 Kontextmenü eines Tauchbeckens



The dialog box 'Tauchbecken bearbeiten' contains the following parameters and controls:

Parameter	Value
Volumen	100
Ultraschall-Leistung (W/l)	20
installierte Heizleistung	5.000
Solltemperatur (K)	328,15

Buttons: Beckeninhalt bearbeiten, Werte übernehmen, Abbrechen

Bild 5.21 Bearbeiten eines Tauchbeckens

Weiterhin lassen sich im Kontextmenü einer Station Überläufe erstellen oder entfernen sowie Quellen, Senken oder Abwasseraufbereitungen anschließen. Angeschlossene Quellen, Senken oder Aufbereitungen können bearbeitet werden. Exemplarisch hierfür ist in **Bild 5.22** das Bearbeitungs-menü für eine Aufbereitungseinrichtung dargestellt. Hier können die bei der Modellierung in Kapitel 5.2.10 beschriebenen Parameter eingestellt werden.



The dialog box 'Aufbereitung bearbeiten' contains the following parameters and controls:

Parameter	Value
relativer Anteil Wasser	95
relativer Anteil Trichlotethylen	0
relativer Anteil Perchlorethylen	0
relativer Anteil Methylenchlorid	0
relativer Anteil VE-Wasser	0
relativer Anteil Salz	0
relativer Anteil Tenside	5
Volumenstrom in L/s	1
Kostensatz Frischreiniger in Euro pro m ³	7,8
Kostensatz Abfallentsorgung in Euro pro m ³	65
Klärleistung	500

Buttons: Werte übernehmen, Abbruch

Bild 5.22 Bearbeiten einer Aufbereitungseinrichtung

Zusätzlich zur Modellierung des Prozesses sind noch weitere Vorgabeparameter für die Simulation erforderlich. Vor allem muss die zu reinigende Bauteilcharge definiert werden. Dies erfolgt in dem in **Bild 5.23** dargestellten Menü, welches aus der Modellierungsumgebung über den Knopf „Bauteilcharge“ aufgerufen wird. Neben dem Volumen und dem Verschleppungsvolumen der Bauteile wird hier die vor der Reinigung an den Bauteilen vorhandene Verschmutzung als Volumen der einzelnen Schmutzarten festgelegt.



Bild 5.23 Bearbeiten der Bauteilcharge

Weitere erforderliche Parameter werden über den Knopf „Prozessparameter“ eingestellt, welcher das in **Bild 5.24** dargestellte Menü aufruft. Hier wird die Taktzeit der Anlage, die maximal zulässige Simulationszeit bis zum Abbruch sowie die Länge der Zeitschritte eingegeben. Außerdem wird die relative Werteänderung angegeben, ab der der Prozess als eingeschwungen angesehen wird (s. Kapitel 5.3.1).

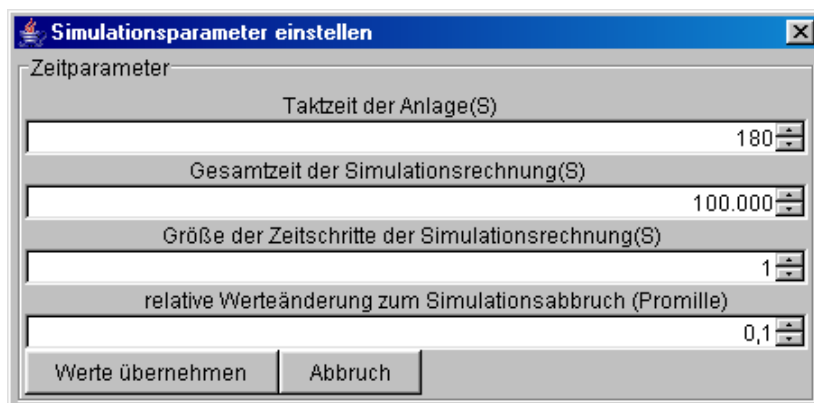


Bild 5.24 Bearbeiten der Simulationsparameter

Ein Klick auf „Simulation starten“ in der Modellierungsumgebung in **Bild 5.18** ruft das Berechnungsmodul mit dem modellierten Prozess auf. Die Ergebnisse werden nach Ende der Simulation in dem in **Bild 5.25** dargestellten Fenster angezeigt.

Dieses Ergebnisfenster ist in zwei Bereiche eingeteilt: Im unteren Bereich befinden sich Registerkarten, in denen Kurzinformationen über die Bauteilchargen und über jede einzelne Stufe des Prozesses abgerufen werden können. In **Bild 5.25** ist die Karte mit dem Überblick über die Bauteilchargen aktiviert. Im Zeitverlauf ist hier der Gesamtschmutz (Summe über alle Verschmutzungsarten) pro gereinigter Charge dargestellt. Darunter ist die Temperatur der aus der Anlage herausgenommenen Bauteilchargen aufgezeichnet. Von den dargestellten Maximalwerten ist vor Allem die maximale Schmutzmenge pro Charge von Interesse, da dieser Wert die erreichte Bauteilreinheit des eingeschwungenen Prozesses beschreibt. Im Beispiel sind es ca. 1,16 Milliliter Restschmutz.

Genauere Informationen lassen sich über den oberen Bereich in **Bild 5.25** abrufen. Hier sind sowohl für die gereinigten Bauteilchargen als auch für jede Station des Prozesses abfragbare Informationen aufgelistet. Für die Becken sind dies beispielsweise Volumina einzelner Flüssigkeitsanteile, welche im Zeitverlauf ausgegeben werden können. Für jede gewünschte Information kann eine Farbe festgelegt werden, in welcher der zugehörige Graph ausgegeben werden soll. Weiterhin kann der interessierende Zeitraum als Beginn und Ende simulierter Zeit angegeben werden.

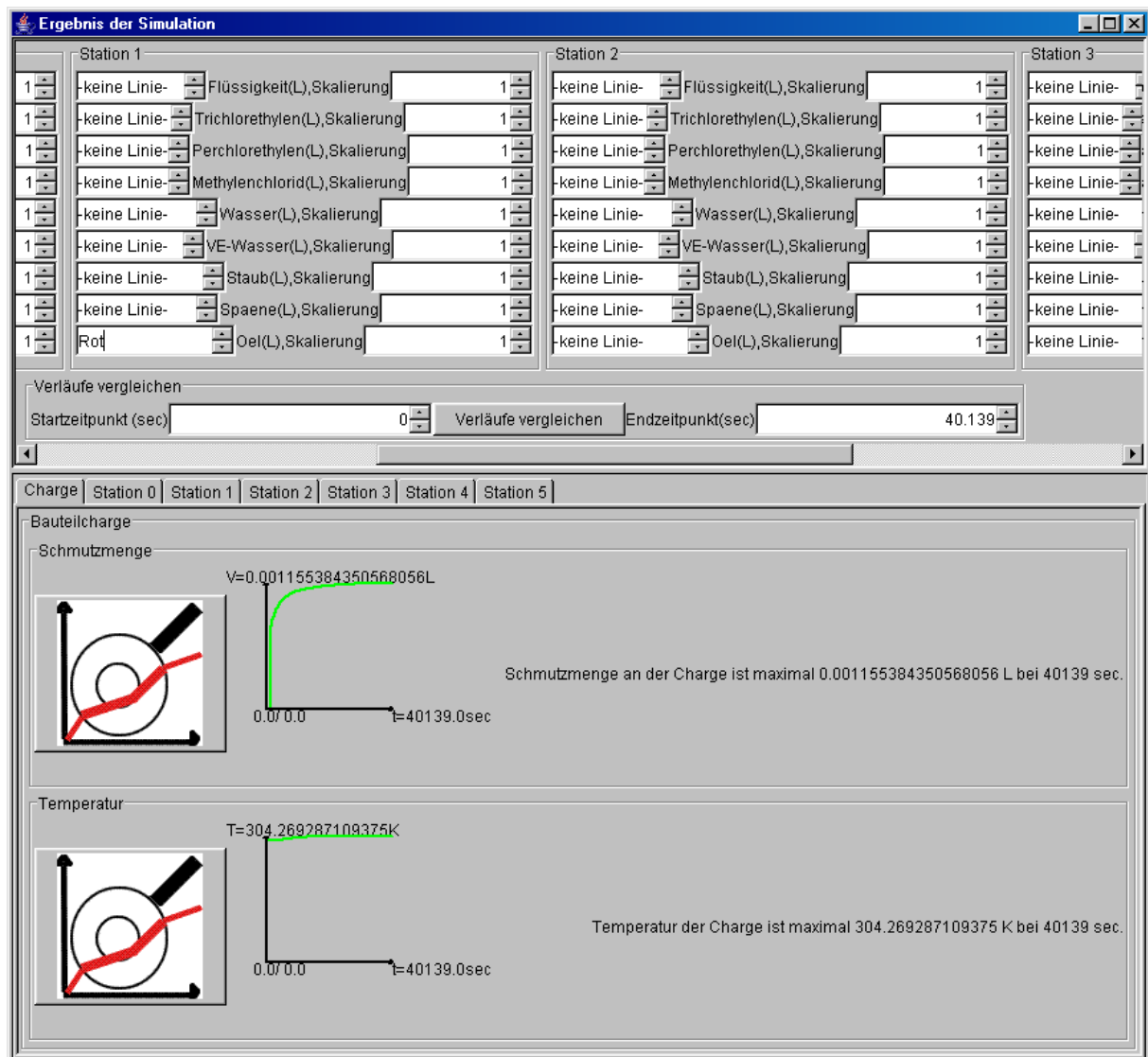


Bild 5.25 Beispiel einer Simulationsergebnisdarstellung

Ein Klick auf „Verläufe vergleichen“ ruft dann eine detaillierte Darstellung auf, wie sie beispielhaft in **Bild 5.26** dargestellt ist. Dieses Bild zeigt den Verlauf des Ölgehaltes in den beiden Tauchbecken des in **Bild 5.18** modellierten Prozesses zwischen Sekunde 35.000 und 40.000 der Simulationszeit.

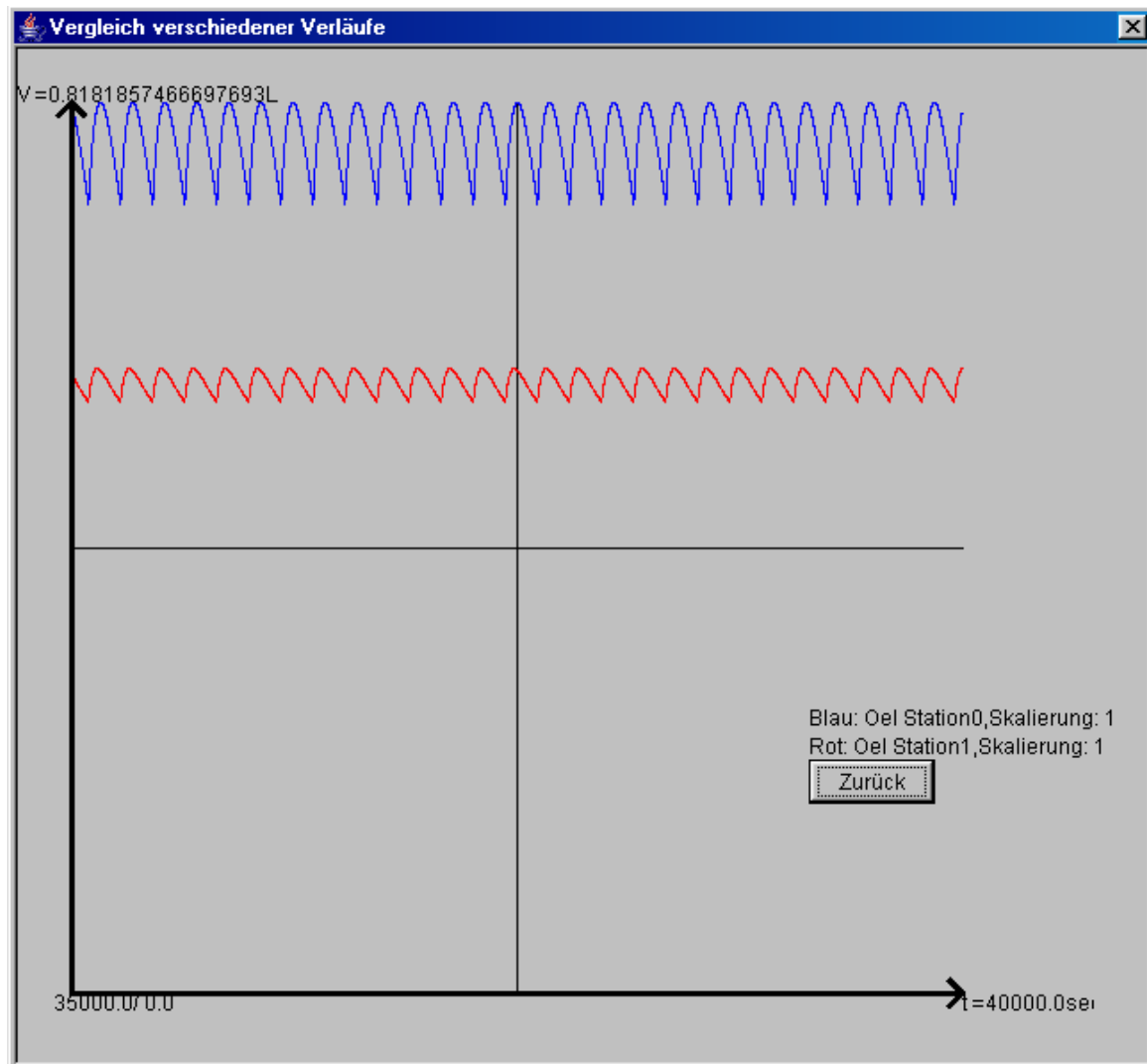


Bild 5.26 Detaildarstellung des Ölgehaltes in den beiden Reinigungsstufen

Gut zu erkennen ist der charakteristische wellenförmige Verlauf, der von den Chargentaktungen herrührt. Wird eine neue Bauteilcharge in ein Becken gegeben, steigt zunächst die Schmutzkonzentration an, da Verschmutzungen von den Bauteilen gelöst werden. Der gegenläufige Effekt, nämlich die Zufuhr von frischem und der Überlauf von verschmutztem Reiniger, ist zunächst schwächer. Allerdings nimmt die Menge des pro Zeiteinheit gelösten Schmutzes mit der Zeit ab, da immer weniger Schmutz an den Bauteilen haftet und die Reinigungswirkung nach Gleichung (5.7) als Anteil am Bauteilschmutz pro Zeiteinheit definiert ist. Ab einem gewissen Zeitpunkt läuft dann der Schmutzaustrag aus dem Becken schneller als die Schmutzablösung von den Bauteilen ab, so dass die Schmutzkonzentration wieder abnimmt, bis die nächste verschmutzte Charge in das Becken gegeben wird.

Die vorgestellte graphische Benutzeroberfläche ermöglicht ein komfortables Arbeiten mit dem Simulationssystem. Verschiedene Reinigungsprozesse lassen sich anwenderfreundlich modellieren, und die Ergebnisse der Simulation lassen sich flexibel anzeigen. Da es sich hier

um ein Java-Applet handelt, kann auch eine Einbindung in HTML und damit eine Ausführung in gängigen Internet-Browsern erfolgen. Damit ist es auch möglich, das Simulationssystem im Rahmen der in Kapitel 4 beschriebenen Internetseite mit der Lösungsdatenbank für industrielle Bauteilreinigungsanlagen zur Verfügung zu stellen.

5.3.3 Verifikation an Spülprozessen

5.3.3.1 Berechnung von Spülprozessen

Bereits in Kap. 3.1.2 wurden bestehende theoretischen Betrachtungen zu Spülprozessen erwähnt, welche in den Zeitschriftenartikeln /HAS96/, /UNR96/ und /WIN95/ dokumentiert sind. Einen guten Überblick über die Thematik bietet auch /NN04/. Diese Überlegungen sollen hier verwendet werden, um die Bilanzierung der Stoffe innerhalb des Simulationssystems zu verifizieren.

In den genannten Artikeln wird ein so genanntes Spülkriterium definiert. Dies ist das Verhältnis zwischen der Konzentration eines Stoffes (genannt Wirkstoffkonzentration) in der an der Bauteilcharge anhaftenden verschleppten Flüssigkeit vor und nach dem Spülen:

$$R = \frac{c_{0_Ws}}{c_{n_Ws}} \quad (5.17)$$

R = Spülkriterium

c_{0_Ws} = Wirkstoffkonzentration in der verschleppten Flüssigkeit vor dem Spülen

c_{n_Ws} = Wirkstoffkonzentration in der verschleppten Flüssigkeit nach dem Spülen = Wirkstoffkonzentration im letzten Spülbecken

Für einen einstufigen Spülprozess kann dann das erreichte Spülkriterium leicht ermittelt werden: Hier werden die Bauteile in ein Spülbecken eingebracht, welches mit Frischwasser gespeist wird und dessen Abwasser in eine Senke führt (s. **Bild 5.27**). Das Spülkriterium ergibt sich dann durch Bilanzierung der ein- und ausgetragenen Wirkstoffmengen:

$$R = \frac{\dot{V}_S + \dot{V}_V}{\dot{V}_V} \quad (5.18)$$

R = Spülkriterium

\dot{V}_V = Volumenstrom der mit einer Bauteilcharge verschleppten Flüssigkeit [l/h]

\dot{V}_S = Volumenstrom der Spülflüssigkeit [l/h]

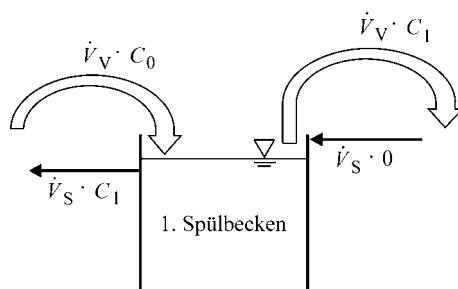


Bild 5.27 Einstufiger Spülprozess

Neben einem solchen einfachen Spülprozess soll auch der in der Praxis häufig vorkommende Fall einer dreistufigen Spülkaskade betrachtet werden (s. **Bild 5.28**). Hierfür ergibt sich das Spülkriterium folgendermaßen:

$$R = \frac{(\dot{V}_S + \dot{V}_V)^3 - 2 \cdot \dot{V}_S \cdot \dot{V}_V \cdot (\dot{V}_S + \dot{V}_V)}{\dot{V}_V^3} \quad (5.19)$$

R = Spülkriterium

\dot{V}_V = Volumenstrom der mit einer Bauteilcharge verschleppten Flüssigkeit [l/h]

\dot{V}_S = Volumenstrom der Spülflüssigkeit [l/h]

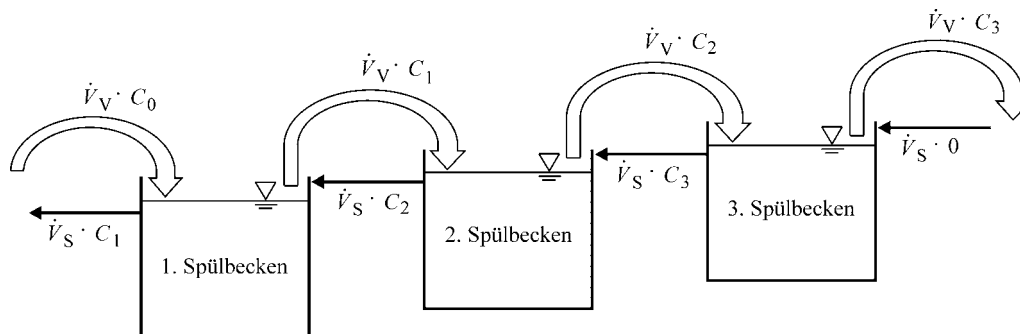


Bild 5.28 Dreistufige Spülkaskade

Bei den obigen Überlegungen wird davon ausgegangen, dass die verschleppte Flüssigkeit mit der Flüssigkeit im Spülbecken verdünnt wird und dass dabei eine ideale Durchmischung erreicht wird. Dies ist eine Annäherung an den Realfall, bei dem beispielsweise auch die Filmdicke der anhaftenden Flüssigkeit und die Badbewegung eine Rolle spielen. Allerdings wurde diese Annäherung auch für den Simulator realisiert, welcher die Verdünnung der Flüssigkeiten mit Hilfe der Objektklasse „Fluessigkeit“ durchführt (s. Kapitel 5.2.3). Somit kann die im Simulator stattfindende Bilanzierung der Stoffe mit Hilfe der oben genannten Formeln für die Berechnung von Spülprozessen verifiziert werden.

5.3.3.2 Simulierte Spülprozesse

Die Verifikation des Simulationsmodells soll anhand von Beispielen simulierter Spülprozesse erfolgen, welche mit den theoretisch berechneten Ergebnissen verglichen werden.

Zunächst wird ein einstufiger Spülprozess simuliert: Beispielhaft werden Chargen mit je 5 l Bauteilen in einem 20-Liter-Spülbecken gespült. An den Bauteilen haften 0,5 l verschleppte Flüssigkeit, davon sind 0,01 l Öl. Das Spülbecken wird mit 0,1 l/s Frischwasser gespeist. Der Überlauf führt in eine Abwassersenke. Die Chargentaktzeit beträgt 180 Sekunden, so dass pro Stunde 20 Chargen gespült werden.

Die Ölkonzentration in der verschleppten Flüssigkeit vor dem Spülen beträgt $c_0 = 0,02$. Das Spülkriterium berechnet sich nach Gleichung (5.18):

$$R = \frac{\dot{V}_S + \dot{V}_V}{\dot{V}_V} = \frac{360 \frac{\text{l}}{\text{h}} + 10 \frac{\text{l}}{\text{h}}}{10 \frac{\text{l}}{\text{h}}} = 37$$

Zu erwarten ist also, dass die Ölkonzentration im Spülbecken $c_1 = 5,41 \cdot 10^{-4}$ beträgt und sich nach dem Spülen noch folgende Ölmenge in der verschleppten Flüssigkeit befindet:

$$c_1 \cdot V_V = \frac{c_0 \cdot V_V}{R} = \frac{0,011}{37} = 2,70 \cdot 10^{-4} \text{ l}$$

Bei der Simulation ergibt sich jedoch zunächst nur ein Wert von $1,42 \cdot 10^{-4}$ Liter. Dies ist allerdings kein Fehler im Simulationssystem, sondern liegt in der Chargentaktung begründet. Zur Erläuterung zeigt **Bild 5.29** den zeitlichen Verlauf der Ölkonzentration in dem Spülbecken. Es ist zu erkennen, dass hier große Schwankungen auftreten, welche aus der Chargentaktung resultieren.

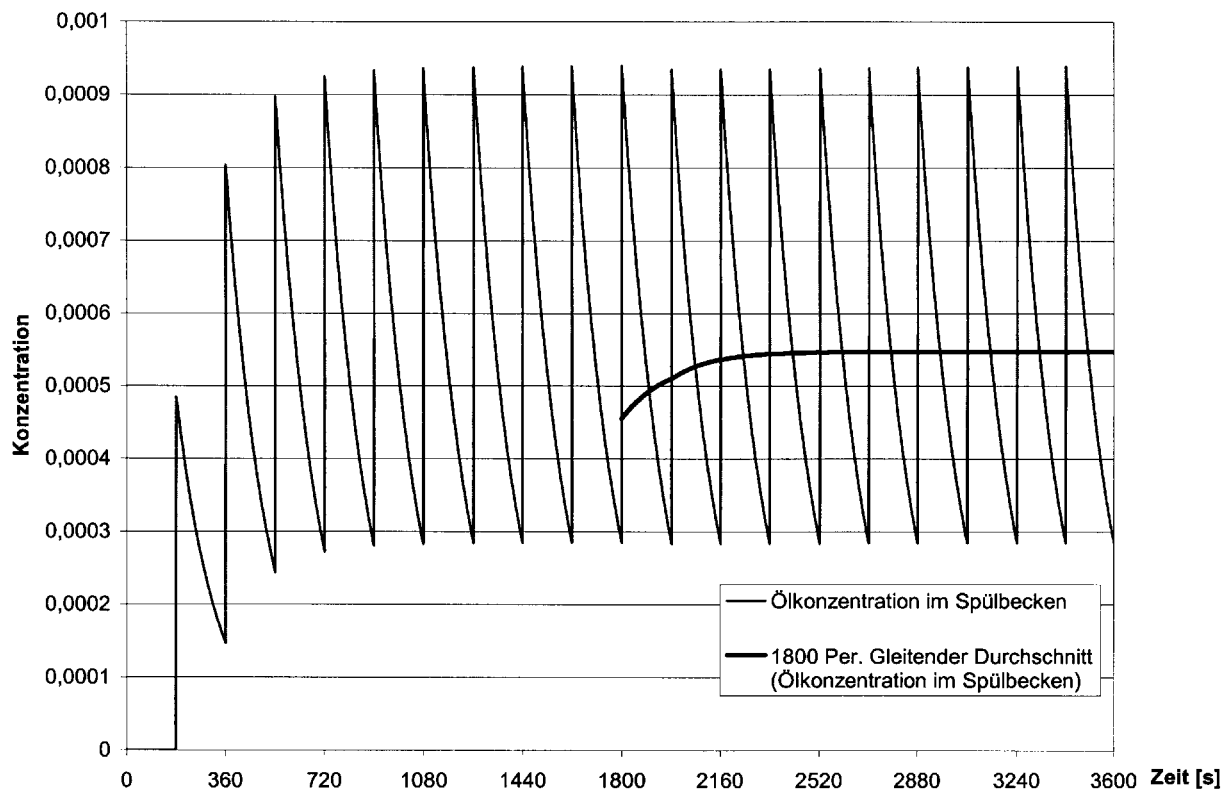


Bild 5.29 Ölkonzentration im 20-Liter-Spülbecken

Mit Einbringen einer Bauteilcharge in das Spülbecken wird schlagartig die Menge Öl in das Becken eingebracht, welche in der verschleppten Flüssigkeit enthalten ist. In der obigen Rechnung nach Gleichung (5.18) hingegen wird das in das Becken eingeschleppte Ölvolumen als kontinuierlicher Volumenstrom betrachtet, welcher eigentlich über die 180 Sekunden Chargentaktzeit verteilt eingebracht werden sollte. In dieser Zeit wird jedoch kein weiteres Öl eingeschleppt. Dagegen gelangt nun kontinuierlich Frischwasser aus der Quelle in das Becken, so dass die Ölkonzentration wieder abfällt, bis die Taktzeit erreicht ist und die nächste Charge in das Becken gegeben wird.

Die durchschnittliche Ölkonzentration im Becken ist in **Bild 5.29** als gleitender Durchschnitt über die letzten zehn Chargen (1800 Sekunden) dargestellt. Dieser Wert liegt mit ca. $5,5 \cdot 10^{-4}$ leicht über dem berechneten Wert von $c_1 = 5,41 \cdot 10^{-4}$. Das liegt daran, dass in dem simulierten Fall weniger Öl mit den Chargen aus dem Becken verschleppt wird als in der Theorie, nämlich nur $1,42 \cdot 10^{-4}$ Liter anstatt $2,7 \cdot 10^{-4}$ Liter. Schließlich wird eine Bauteilcharge immer dann aus dem Becken entnommen, wenn die Ölkonzentration mit ca. $2,84 \cdot 10^{-4}$ am niedrigsten ist. Die Differenz, nämlich $1,28 \cdot 10^{-4}$ Liter Öl pro Charge, muss

über eine höhere durchschnittliche Ölkonzentration im Becken in der Senke entsorgt werden. Bezogen auf das Flüssigkeitsvolumen im Becken von 20 Litern abzüglich 5 Litern Bauteilvolumen ergibt sich eine Konzentrationserhöhung von $8,53 \cdot 10^{-6}$. In Summe beträgt die nun theoretisch berechnete Ölkonzentration im Becken dann $c_1 = 5,50 \cdot 10^{-4}$, so dass eine gute Übereinstimmung zwischen diesem theoretisch berechneten Wert und dem Ergebnis der Simulation (durchschnittliche Ölkonzentration) gegeben ist.

Die Schwankungen der Ölkonzentration im Becken werden um so geringer, je größer das Beckenvolumen ist, da die absolute mit jeder Charge eingetragene Ölmenge gleich groß bzw. gleich klein bleibt, jedoch auf ein größeres Beckenvolumen bezogen zu einer relativ kleinen Konzentrationsänderung führt. Daher wurde der gleiche Simulationslauf noch einmal mit einem 10.000 Liter großen Spülbecken wiederholt. **Bild 5.30** zeigt den zeitlichen Verlauf der nun ermittelten Ölkonzentration in diesem Spülbecken für ca. zehn Chargen im eingeschwungenen Zustand. Dabei wurde die Y-Achse mit dem Faktor 100 vergrößert skaliert, da bei gleicher Skalierung, wie in **Bild 5.29**, die Schwankungen in der Konzentration nicht mehr mit bloßem Auge erkennbar wären, weil sie so gering sind. Die nun ermittelte Ölmenge in der verschleppten Flüssigkeit nach dem Spülen beträgt $2,69873 \cdot 10^{-4}$ Liter. Sie stimmt also sehr genau mit dem errechneten Wert überein.

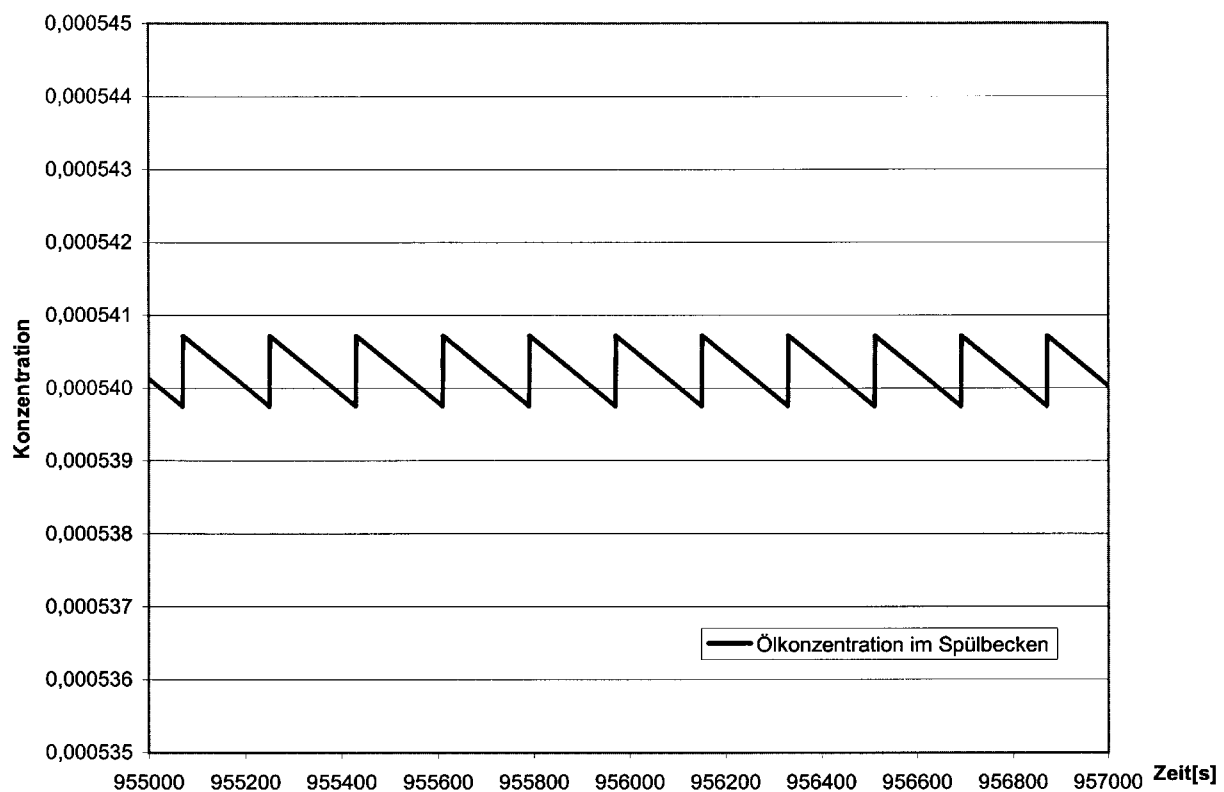


Bild 5.30 Ölkonzentration im 10.000-Liter-Spülbecken

Bei der nun folgenden Simulation einer dreistufigen Spülkaskade sollen von Beginn an sehr große Spülbecken verwendet werden, da sich der oben dargestellte Effekt der gegenüber der Theorie geringeren Restölmenge in der aus einem Spülbecken herausgeschleppten Flüssigkeit im mehrstufigen Fall dadurch verstärkt, dass in den folgenden Stufen auch die in das Becken eingeschleppte Ölmenge gegenüber der theoretischen Betrachtung geringer ist. Die Abweichung potenziert sich also und soll daher durch große Becken so gering wie möglich gehalten werden.

Es werden nun die schon oben verwendete Bauteilchargen (5 l Bauteilvolumen, 0,5 l Verschleppungsvolumen, davon 0,01 l Öl) in einer Spülkaskade aus drei Becken mit je 10.000 l Volumen gespült. Das letzte Spülbecken wird von einer Quelle mit 0,01 l/s Frischwasser gespeist. Der Frischwasserverbrauch ist also gegenüber dem oben dargestellten einstufigen Fall zehnmal geringer. Die drei Becken sind durch Überläufe verbunden, der Überlauf des ersten Beckens führt in eine Abwassersenke. Wie oben beträgt die Chargentaktzeit 180 Sekunden.

Auch hier beträgt die Ölkonzentration in der verschleppten Flüssigkeit vor dem Spülen $c_0 = 0,02$. Rechnerisch ergibt sich für diese Konstellation nach Gleichung (5.19) folgendes Spülkriterium:

$$R = \frac{(\dot{V}_S + \dot{V}_V)^3 - 2 \cdot \dot{V}_S \cdot \dot{V}_V \cdot (\dot{V}_S + \dot{V}_V)}{\dot{V}_V^3}$$

$$= \frac{\left(36 \frac{1}{h} + 10 \frac{1}{h}\right)^3 - 2 \cdot 36 \frac{1}{h} \cdot 10 \frac{1}{h} \cdot \left(36 \frac{1}{h} + 10 \frac{1}{h}\right)}{\left(10 \frac{1}{h}\right)^3} = 64,216$$

Zu erwarten ist also, dass die Ölkonzentration im letzten Spülbecken $c_1 = 3,11 \cdot 10^{-4}$ beträgt und sich also nach dem Spülen noch $1,557 \cdot 10^{-4}$ Liter Öl in der verschleppten Flüssigkeit befinden.

Das Ergebnis der Simulation liefert hier einen Wert von $1,555 \cdot 10^{-4}$ Liter (zum Vergleich: mit 20 Liter großen Spülbecken ergeben sich lediglich $1,36 \cdot 10^{-4}$ Liter). Unter Berücksichtigung der obigen Erläuterungen kann somit festgestellt werden, dass die Bilanzierung im Simulationssystem auch bei komplexen Prozessen mit Kaskadenführung fehlerfrei funktioniert.

5.3.4 Simulationsergebnis

5.3.4.1 Erreichte Bauteilreinheit

Das Simulationssystem liefert als Ergebnis die von der simulierten Reinigungsanlage erreichte Bauteilreinheit, also die Restverschmutzung der Bauteilchargen, welche die simulierte Anlage verlassen. Beispielsweise weisen 5 Liter Bauteile, welche mit 0,5 Liter Öl verschmutzt waren, nach der simulierten Reinigung in der in **Bild 5.18** modellierten Anlage gemäß **Bild 5.25** noch 1,155 Milliliter Öl auf. Es werden also ca. 99,8% der Verschmutzung abgereinigt.

Die technische Funktion der Anlage ist dann hinreichend erfüllt, wenn die Restverschmutzung einen geforderten Maximalwert unterschreitet. Die Ergebnisse im Zeitverlauf, wie sie in der graphischen Benutzeroberfläche angezeigt werden können, interessieren dabei allenfalls peripher. Von deutlich größerem Interesse ist allerdings die zu erwartende Wirtschaftlichkeit der simulierten Reinigungsanlage. Daher wird im folgenden Unterkapitel die vom Simulationssystem durchgeführt Kostenbilanz vorgestellt, mit deren Hilfe die Reinigungskosten pro Bauteilcharge ermittelt werden.

5.3.4.2 Kostenbilanz

Bereits in Kapitel 4.2.3 wurde die Wirtschaftlichkeit von Reinigungsanlagen betrachtet. Hierbei müssen die gesamten Lebenslaufkosten einer Anlage berücksichtigt werden. Die Reinigungskosten pro Bauteilcharge berechnen sich dabei nach Gleichung (4.11) (s. Kapitel 4.2.3), indem sämtliche anfallenden Kostenarten auf eine Charge bezogen und danach aufaddiert werden. Die bei der Tauchreinigung anfallenden Kostenarten sind:

- Investitionskosten bzw. Anlagenabschreibung
- kalkulatorische Zinsen
- Wartungskosten
- Energiekosten
- Reiniger- und Frischwasserkosten
- Abfall- und Abwasserentsorgungskosten
- Personalkosten

Die **Investitionskosten** für eine Reinigungsanlage hängen von zahlreichen Faktoren ab, wie der Anzahl und Größe der einzelnen Stationen, der Dimensionierung von Heizelementen und Ultraschallschwingern, dem geforderten Durchsatz von Pumpen usw. Im Normalfall führt der Anbieter einer Anlage eine Kalkulation durch, deren Grundlage zahlreiche betriebliche Kostendaten sind. Dabei können die Investitionskosten ermittelt werden, indem die Kosten für die einzelnen benötigten Module (Becken, Aufbereitungen, Trockeneinrichtungen usw.) aufaddiert werden.

Dies ist auch die Vorgehensweise des Simulationssystems. Dazu besitzt die Objektklasse für jedes der Module (s. Kapitel 5.2), aus welchen der Prozess zusammengesetzt wird, eine Funktion „Investitionskosten“, in der die Kosten für dieses Modul abhängig von den eingestellten Parametern ermittelt werden.

Für Tauch- und Spülbecken (s. Kapitel 5.2.6) werden die Investitionskosten abgeschätzt, indem sowohl für das Becken selbst als auch für gegebenenfalls vorhandene Heiz- oder Ultraschallschwingeinrichtungen ein Grundpreis und ein dimensionierungsabhängiger Preiszuschlag angenommen wird:

$$K_{LB} = \underbrace{200 \text{ €} + V_B \cdot 5 \text{ €}}_{\text{Beckenkosten}} + \underbrace{150 \text{ €} + P_{US} \cdot V_B \cdot 0,25 \text{ €}}_{\text{Ultraschallschwingerkosten}} + \underbrace{100 \text{ €} + P_H \cdot 0,25 \text{ €}}_{\text{Heizungskosten}} + \underbrace{50 \text{ €}}_{\text{Überlaufkosten}} \quad (5.20)$$

K_{LB} = Investitionskosten für das Tauch- oder Spülbecken [€]

V_B = Beckenvolumen [l]

P_{US} = Ultraschalleistungsdichte [W/l]

P_H = Heizleistung [W]

Ist kein Ultraschallschwinger, Heizelement oder Überlauf installiert, entfällt der jeweilige Kostenanteil. Ein gängiges Ultraschallbecken mit 10 l Volumen, 20 W/l Ultraschalleistung und 2 kW Heizleistung kostet demnach 1050 €, was gemäß /NN04/ als realistischer Wert angesehen werden kann.

Die Kosten für eine Warmlufttrockeneinrichtung (s. Kapitel 5.2.11) werden folgendermaßen abgeschätzt:

$$K_{I_Wt} = 1000 \text{ €} + P_T \cdot 0,25 \text{ €} \quad (5.21)$$

K_{I_Wt} = Investitionskosten für die Warmlufttrockeneinrichtung [€]

P_T = Trockenleistung [W]

Quellmodule werden wie folgt kalkuliert:

$$K_{I_Q} = 100 \text{ €} + \dot{V}_Q \cdot 400 \text{ €} \quad (5.22)$$

K_{I_Q} = Investitionskosten für die Quelle [€]

\dot{V}_Q = Volumenstrom der Quelle [l/s]

Die Investitionskosten für eine Senke werden mit 100 € angesetzt.

Bei einer Aufbereitungseinrichtung muss sowohl die Klärleistung als auch der Volumenstrom berücksichtigt werden:

$$K_{I_Ab} = 1000 \text{ €} + P_A \cdot 3 \text{ €} + \dot{V}_A \cdot 400 \text{ €} \quad (5.23)$$

K_{I_Ab} = Investitionskosten für die Aufbereitungseinrichtung [€]

P_A = Aufbereitungsleistung [W]

\dot{V}_A = Volumenstrom der Aufbereitungseinrichtung [l/s]

Die Höhe der Investitionskosten für die einzelnen Module kann von Anbieter zu Anbieter stark schwanken. Durch den klar strukturierten Aufbau des Simulationssystems können allerdings problemlos modifizierte Formeln hinterlegt werden, die der betrieblichen Praxis des jeweiligen Benutzers eher entsprechen.

Die Investitionskosten für eine simulierte Reinigungsanlage werden ermittelt, indem für jedes enthaltene Modul die Investitionskosten gemäß obiger Formeln abgeschätzt und aufaddiert werden.

Die nun bekannten Investitionskosten müssen als Lebenslaufkosten auf die einzelnen gereinigten Bauteilchargen umgelegt werden. Dies geschieht durch Abschreibung über einen festgelegten Zeitraum. Oft sind dies zehn Jahre. In diesem Fall werden die Investitionskosten durch zehn geteilt und auf die Anzahl der in einem Jahr gereinigten Chargen verteilt:

$$K_{A_Ch} = \frac{\sum_{\text{alle Module}} K_{I_M}}{t_A \cdot n_{Ch_J}} \quad (5.24)$$

K_{A_Ch} = Anlagenabschreibung pro Charge [€]

K_{I_M} = Investitionskosten für das jeweilige Modul [€]

t_A = Abschreibungszeitraum in Jahren

n_{Ch_J} = Anzahl der Bauteilchargen pro Jahr nach Gleichung (5.25)

$$n_{\text{Ch}_J} = 12 \cdot T_B \cdot S_B \cdot \frac{3600 \text{ s}}{t_T} \quad (5.25)$$

- n_{Ch_J} = Anzahl der Bauteilchargen pro Jahr
 T_B = Anzahl Betriebstage der Anlage pro Monat
 S_B = Anzahl Betriebsstunden der Anlage pro Tag
 t_T = Taktzeit [s]

Kalkulatorische Zinsen sind Zinsen, die auf das gebundene Kapital anfallen, entweder in Form von Kreditzinsen oder von entgangenen Zinsgewinnen. Der Zinssatz muss individuell festgelegt werden. Ein gängiger Wert sind 6%. Die kalkulatorischen Zinsen bezogen auf die Bauteilchargen werden berechnet, indem das durchschnittlich gebundene Kapital, also die Hälfte der Investitionskosten, mit diesem Faktor verzinst werden und dieser Wert wiederum durch die Anzahl der pro Jahr gereinigten Bauteilchargen dividiert wird:

$$K_{Z_Ch} = \frac{z_k \cdot \sum_{\text{alle Module}} K_{I_M}}{2 \cdot n_{\text{Ch}_J}} \quad (5.26)$$

- K_{Z_Ch} = kalkulatorische Zinsen pro Charge [€]
 z_k = kalkulatorischer Zinssatz
 K_{I_M} = Investitionskosten für das jeweilige Modul [€]
 n_{Ch_J} = Anzahl der Bauteilchargen pro Jahr nach Gleichung (5.25)

Die jährlichen **Wartungskosten** für eine Anlage hängen stark vom Einzelfall ab und sind erst bekannt, nachdem sie angefallen sind. Dennoch kann eine Abschätzung erfolgen, indem an anderen, bestehenden Anlagen Erfahrungswerte gesammelt werden, welche prozentual auf die Investitionskosten bezogen sind. Beispielsweise werden für Tauch- und Spülbecken jährliche Wartungskosten von 5% der Investitionskosten angenommen. Mit Ultraschallunterstützung sind die Wartungskosten höher, da Ultraschallschwinger mit der Zeit verschleifen. Hier werden 7% angesetzt.

Für Quellen wird dieser Faktor mit 2% abgeschätzt, für Senken mit 1%. Aufbereitungseinrichtungen besitzen einen relativ hohen Wartungsaufwand, da hier regelmäßig Filter o. ä. ausgewechselt werden müssen. Hier werden 10% der Investitionskosten als jährliche Wartungskosten abgeschätzt.

Die gesamten Wartungskosten einer Anlage werden durch Aufsummieren der Wartungskosten aller Einzelmodule ermittelt. Division durch die Anzahl der Bauteilchargen pro Jahr führt zu den geschätzten Wartungskosten pro Bauteilcharge:

$$K_{W_Ch} = \frac{\sum_{\text{alle Module}} W_{I_M}}{n_{\text{Ch}_J}} \quad (5.27)$$

- K_{W_Ch} = Wartungskosten pro Charge [€]
 W_{I_M} = Wartungskosten für das jeweilige Modul [€]
 n_{Ch_J} = Anzahl der Bauteilchargen pro Jahr nach Gleichung (5.25)

Um die **Energiekosten** zu ermitteln, muss zunächst der Energieverbrauch der Anlage abgeschätzt werden. Dieser wird vom Simulationssystem für zehn gereinigte Chargen im eingeschwungenen Zustand ermittelt, wie bereits in Kapitel 5.3.1 beschrieben. Der Gesamtenergieverbrauch errechnet sich durch Addition der Einzelverbräuche aller Module. Dieser Wert muss durch die zehn Chargen dividiert und mit einem Energiekostensatz multipliziert werden:

$$K_{E_Ch} = \frac{\sum_{\text{alle Module}} E_{10Ch_M}}{10} \cdot k_E \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kJ}} \quad (5.28)$$

K_{E_Ch} = Energiekosten pro Charge [€]

E_{10Ch_M} = Energieverbrauch für das jeweilige Modul bei Reinigung von zehn Chargen [kJ]

k_E = Energiekostensatz [€/kWh]

Die **Reiniger- und Frischwasserkosten** können durch Betrachtung aller Quellen und Aufbereitungsmodule ermittelt werden. Jede Quelle liefert einen festgelegten Volumenstrom einer definierten Flüssigkeit. Dieser wird mit der Taktzeit multipliziert, um den Verbrauch pro Charge zu berechnen. Die Aufbereitungsmodule protokollieren den benötigten Frischreiniger für zehn simulierte Chargen im eingeschwungenen Zustand, so dass auch hier der Verbrauch bekannt ist (s. Kapitel 5.2.10). Multiplikation mit den jeweiligen Kostensätzen führt dann zu den Reinigerkosten pro Charge:

$$K_{R_Ch} = \frac{\sum_{\text{alle Quellen}} \dot{V}_{Ri} \cdot t_T \cdot k_{Ri} + \frac{\sum V_{Ri} \cdot k_{Ri}}{10}}{\text{alle Quellen}} \quad (5.29)$$

K_{R_Ch} = Reiniger- und Frischwasserkosten pro Charge [€]

\dot{V}_{Ri} = Volumenstrom der betrachteten Quelle [l/s]

t_T = Taktzeit [s]

k_{Ri} = Kostensatz für den von der Quelle/Aufbereitungseinrichtung gelieferten Frischreiniger [€/l]

V_{Ri} = Volumen des von der Aufbereitung für zehn Chargen benötigten Frischreinigers [l]

Die **Abfall- und Abwasserentsorgungskosten** errechnen sich ähnlich, indem die von den Senken bzw. Aufbereitungseinrichtungen ermittelten zu entsorgenden Mengen durch zehn Chargen dividiert und mit den jeweiligen Kostensätzen multipliziert werden:

$$K_{AE_Ch} = \frac{\sum_{\text{alle Senken}} V_{Ai} \cdot k_{Ai} + \frac{\sum V_{Ai} \cdot k_{Ai}}{\text{alle Aufbereitungsmodule}}}{10} \quad (5.30)$$

K_{AE_Ch} = Abfall- und Abwasserentsorgungskosten pro Charge [€]

V_{Ai} = Volumen des zu entsorgenden Abfalls der betrachteten Senke bzw. Aufbereitungseinrichtung [l]

k_{Ai} = Kostensatz für den aus der Senke/Aufbereitungseinrichtung zu entsorgenden Abfall [€/l]

Die **Personalkosten** pro Charge werden berechnet, indem der Stundensatz des Bedieners der Anlage durch die Anzahl der pro Stunde gereinigten Chargen geteilt wird. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass der Bediener je nach Automatisierungsgrad der Anlage im Normalfall nur einen Teil seiner Arbeitszeit auf diese Anlage verwendet:

$$K_{AB_Ch} = \frac{k_S \cdot f_{Az}}{3600 \text{ s}} \cdot t_T \quad (5.31)$$

- K_{AB_Ch} = Personalkosten pro Charge [€]
 k_S = Personalkostensatz inkl. Lohnnebenkosten [€/h]
 f_{Az} = Anteil der für die Anlagenbedienung aufgewendeten Arbeitszeit an der Gesamtarbeitszeit
 t_T = Chargentaktzeit [s]

Die gesamten **Reinigungskosten pro Charge** ergeben sich als Summe aller nach den Gleichungen (5.24) bis (5.31) ermittelten Kosten:

$$K_{Ch} = K_{A_Ch} + K_{Z_Ch} + K_{W_Ch} + K_{E_Ch} + K_{R_Ch} + K_{AE_Ch} + K_{AB_Ch} \quad (5.32)$$

- K_{Ch} = Reinigungskosten pro Charge [€]
 K_{A_Ch} = Anlagenabschreibung pro Charge [€]
 K_{Z_Ch} = kalkulatorische Zinsen pro Charge [€]
 K_{W_Ch} = Wartungskosten pro Charge [€]
 K_{E_Ch} = Energiekosten pro Charge [€]
 K_{R_Ch} = Reiniger- und Frischwasserkosten pro Charge [€]
 K_{AE_Ch} = Abfall- und Abwasserentsorgungskosten pro Charge [€]
 K_{AB_Ch} = Personalkosten pro Charge [€]

Mit diesem Wert lässt sich die Wirtschaftlichkeit einer Reinigungsanlage beurteilen. Von großem Nutzen ist dabei die Abschätzung der monetären Auswirkungen von Parameteränderungen am Anlagenmodell.

5.3.5 Beispielhafter Simulationslauf

Im Folgenden soll ein beispielhafter Simulationslauf beschrieben werden. Dazu muss zunächst eine exemplarische Reinigungsaufgabe definiert werden:

Gereinigt werden sollen Zahnräder aus Ck 45, welche nach der Einzelteilzeichnung in **Bild 5.31** gefertigt wurden. Das Materialvolumen eines Zahnrades beträgt ca. 0,5 dm³, so dass es ungefähr 4 kg wiegt. Die Oberfläche kann mit 0,065 m² abgeschätzt werden. Die Zahnräder wurden nach der Fertigung für einen langen Transportweg verpackt und dabei mit Korrosionsschutzöl eingestrichen. Pro Zahnrad sind dies 0,05 l Öl. Nach der Reinigung sollen die Zahnräder in Getriebe eingebaut werden.

Zehn der Zahnräder werden jeweils zu einer Bauteilcharge zusammengefasst. Somit besteht jede Charge aus 5 l Bauteilen, welche mit 0,5 l Öl verschmutzt sind. Das Verschleppungsvolumen kann nach /GRS00/ mit 50 bis 100 mg Flüssigkeit pro m² Bauteiloberfläche abgeschätzt werden. Die Bauteiloberfläche pro Charge beträgt ca. 0,65 m², jedoch muss bei der Verschleppung auch der Werkstückträger (Warenkorb o. ä.) berücksichtigt werden. Daher wird an dieser Stelle ein relativ großes Verschleppungsvolumen von 200 ml angenommen.

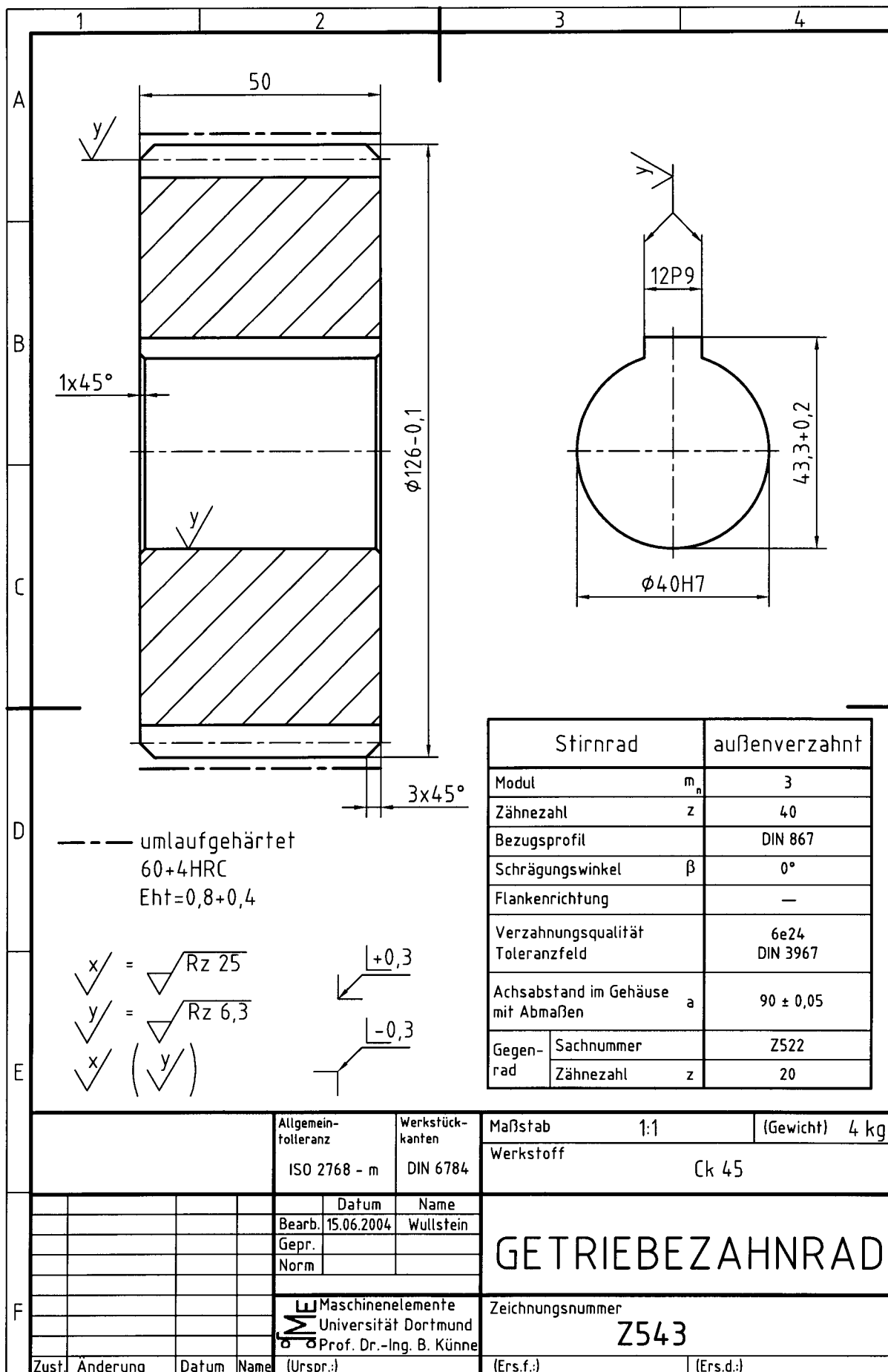


Bild 5.31 Einzelteilzeichnung der zu reinigenden Zahnräder

Pro Arbeitstag im Zweischichtbetrieb sollen 3200 der Zahnräder montiert werden. Bei 16 Arbeitsstunden pro Tag müssen dementsprechend 20 Bauteilchargen pro Stunde gereinigt werden, was eine Chargentaktzeit von 180 Sekunden erfordert.

Eine Reinigungsanlage, welche zur Lösung dieses Problems geeignet ist, kann beispielsweise durch das in Kapitel 4.8.2 vorgestellte Auswahlssystem gefunden werden. Dabei werden im Fragebogen folgende Angaben gemacht:

- Längste Abmessung des Bauteils: zwischen 100 mm und 500 mm
- Bauteilgewicht: zwischen 1 kg und 10 kg
- Besonderheiten des Bauteils: keine
- Werkstoff: Gehärteter/Angelassener Stahl
- Vorhandene Beschichtung: keine
- Vorliegende Verschmutzung: Korrosionsschutzöle und Fette
- Beurteilung der Schmutzmenge: Bauteile stehen in Öl/Schmutz
- Angestrebter Reinheitsgrad: Reinigung (z. B. Vorbereitung zum Einbau)
- Maximale Investitionskosten: Keine Angabe
- Teiledurchsatz in kg/h: bis 1.000 kg/h

Das Ergebnis der Anlagensuche listet nun zahlreiche gut geeignete Anlagen auf, unter anderem auch die in **Bild 5.32** dargestellte mehrstufige Tauch- und Ultraschallreinigungsanlage. Der Anbieter einer solchen Anlage kann nun kontaktiert und das genaue Reinigungsproblem mit ihm erörtert werden.



Bild 5.32 Tauchreinigungsanlage der Schweizer Firma UCM AG /NN04/

Nun muss der Anbieter seine Anlage auf das Reinigungsproblem hin anpassen. Hierbei kann ihm das hier vorgestellte Simulationssystem eine große Hilfe sein. Dazu muss er zunächst seine Anlage bzw. den darin ablaufenden Reinigungsprozess modellieren. Dabei werden die strukturalen wie auch die deskriptiven Parameter des Prozesses (s. Kapitel 5.1.2) zunächst so eingestellt, dass die Anlage in einer normalen Konfiguration mit nach der Praxiserfahrung des Anbieters gängigen Temperaturen, Ultraschalleistungen usw. betrieben wird. Später kann dann eine Optimierung mit Hilfe evolutionärer Algorithmen erfolgen (s. Kapitel 6).

In der in diesem Beispiel verwendeten Anlage soll der Beispielprozess ablaufen, welcher in **Bild 5.18** mit Hilfe der graphischen Benutzeroberfläche modelliert wurde. An eine dreistufige Tauchreinigung mit Aufbereitungseinrichtung und Kaskadenführung schließt sich eine zwei-stufige Spülkaskade und ein anschließendes Warmlufttrocknen an. Die genauen Parameter lassen sich der Tabelle in **Bild 5.34** entnehmen.

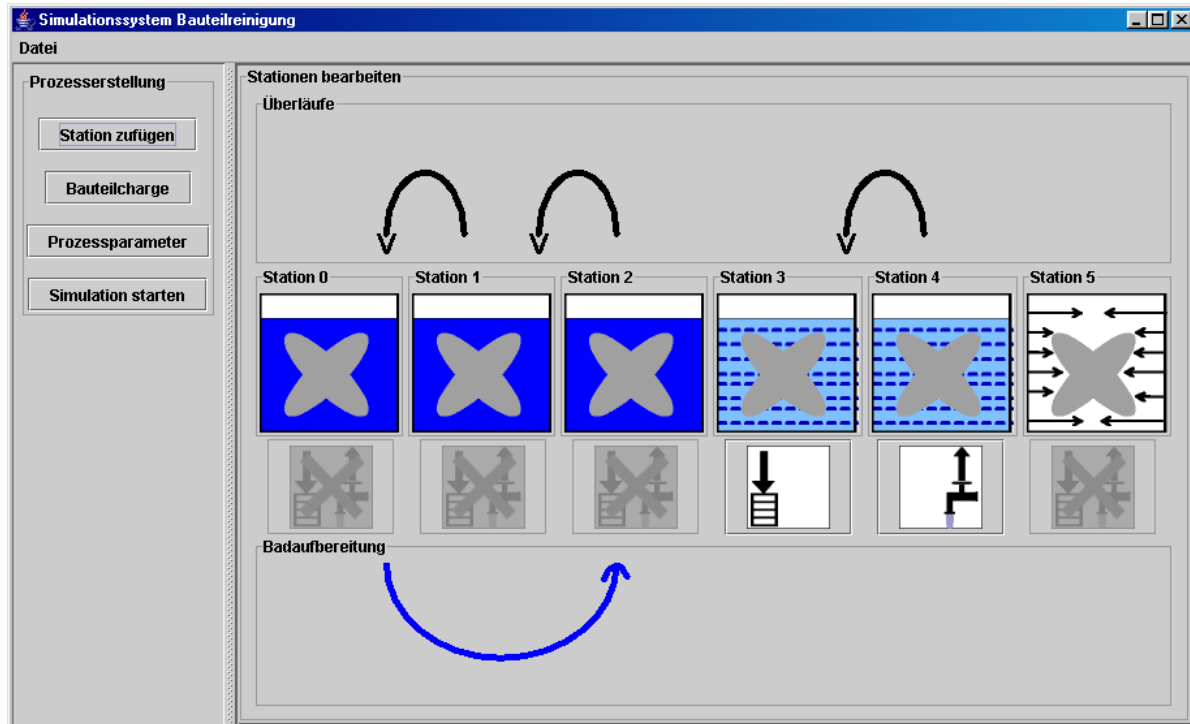


Bild 5.33 Modellierter Reinigungsprozess in der zu simulierenden Anlage

Stufe	Typ	Volumen	Solltemp.	Heizleistg.	US-Leistg.	Trockenleistg.
1	Tauchen	20 l	328,15 K	5000 W	0	-
2	Tauchen	20 l	328,15 K	5000 W	0	-
3	Tauchen	20 l	228,15 K	5000 W	12 W/l	-
4	Spülen	20 l	293,15 K	0	0	-
5	Spülen	20 l	293,15 K	0	0	-
6	Trocknen	-	-	-	-	8000 W
Versorgung der Reinigungsbecken: Aufbereitung mit 95% Wasser u. 5% Tensiden; Volumenstrom 1 l/s; Aufbereitungsleistung 500 W						
Versorgung der Spülbecken: Quelle mit 100% Wasser, 0,02 l/s; Ablauf in Senke						

Bild 5.34 Parameter des Reinigungsprozesses in der zu simulierenden Anlage

Wie bereits erläutert, wird die Bauteilcharge mit 5 l Stahlbauteilen, 0,5 l Öl und 0,2 l Verschleppungsvolumen modelliert. Die Chargentaktzeit beträgt 180 s, die Länge der Zeitschritte 1 s. Die maximale Abweichung im Prozesszustand zwischen zwei Chargentakten, bei der die Simulation abgebrochen wird (s. Kapitel 5.3.1), beträgt 0,1 Promille.

Nach dem Starten der Simulation wird nach 21.240 simulierten Sekunden der eingeschwungene Prozesszustand erreicht. Danach haften einer gereinigten Bauteilcharge noch 0,748 ml Restöl an. Die Investitionskosten für die Anlage werden mit 23.838 € abgeschätzt, die jährlichen Wartungskosten mit 1.471,26 €. Der Energieverbrauch pro Charge beträgt 2.650 kJ. Die Kosten für eine gereinigte Charge belaufen sich auf 0,603 €. Ihre Zusammensetzung kann **Bild 5.35** entnommen werden.

Kostenart	nach Gleichung	Kosten pro Charge [€]
Abschreibungskosten	(5.24)	0,0621
kalkulatorische Zinsen	(5.26)	0,0186
Wartungskosten	(5.27)	0,0383
Energiekosten	(5.28)	0,1104
Reiniger- und Frischwasserkosten	(5.29)	0,0083
Abfall- und Abwasserentsorgungskosten	(5.30)	0,0648
Personalkosten	(5.31)	0,3000
Summe	(5.32)	0,6025

Bild 5.35 Zusammensetzung der Reinigungskosten pro Charge für den simulierten Beispielfall

Dabei wurden folgende Kostensätze zugrundegelegt:

- Energiekostensatz: 0,15 €/kWh
- Frischwasserkostensatz: 1,5 €/m³
- Abwasserkostensatz: 9 €/m³
- Frischreinigerkostensatz: 14,8 €/m³
- Abfallentsorgungskostensatz: 65 €/m³
- Personalkostensatz: 18 €/h inkl. Lohnnebenkosten; der Mitarbeiter verwendet 1/3 seiner Arbeitszeit auf die Bedienung der Anlage

Diese Kostensätze können durch den modularen Aufbau des Systems leicht den beim Benutzer vorliegenden Bedingungen angepasst werden.

Mit diesem Simulationslauf hat der Anbieter der Anlage zwei Ergebnisse erzielt: Zum einen hat er nun einen Anhaltspunkt dafür, wie sauber die Bauteile mit der simulierten Anlage werden, und zum anderen kann er die ungefähren Reinigungskosten abschätzen.

Die Angabe einer maximal zulässigen Restölmenge für die Reinigungsaufgabe in ml pro Bauteil ist schwierig, weswegen die Definition der geforderten Bauteilreinheit in dem Auswahlssystem lediglich mit Hilfe von vier Klassen erfolgt (hier: „Reinigung“, s. Kapitel 3.1.1.3 bzw. 4.8.2). Die Anlage ist jedoch vom Auswahlssystem als „gut zur Lösung der gestellten Reinigungsaufgabe geeignet“ eingestuft worden. Dies bedeutet, dass der Anbieter die Reinigungswirkung bei der klassifizierten Reinigungsaufgabe für ausreichend hält. Daher kann ab jetzt der vom Simulationssystem ermittelte Wert von ca. 0,75 ml Restöl pro Bauteilcharge als mindestens zu forderndes Simulationsergebnis bei der nun folgenden Optimierung angesehen werden.

Ziel dieser Optimierung ist es, sowohl strukturelle als auch deskriptive Parameter der Reinigungsanlage so einzustellen, dass mindestens die geforderte Bauteilreinheit erzielt wird und dabei die Reinigungskosten pro Bauteilcharge möglichst gering sind. Ein vielversprechender Ansatz hierzu ist der Einsatz Evolutionärer Algorithmen, welcher im folgenden Kapitel beschrieben wird.

6 Optimierung mit Hilfe Evolutionärer Algorithmen

6.1 Vorüberlegungen

6.1.1 Zu optimierende Reinigungsanlage

Der zu entwickelnde Evolutionäre Algorithmus soll eine automatische Optimierung einer mit dem in Kapitel 5 vorgestellten System simulierten Reinigungsanlage durchführen. Das Simulationssystem ermöglicht eine Abschätzung der Reinigungsqualität und der Reinigungskosten beliebiger Tauchreinigungsprozesse, welche durch strukturelle und deskriptive Parameter gekennzeichnet sind (s. Kapitel 5.1.2).

Eine Reinigungsanlage kann nur im Hinblick auf die Lösung einer definierten Reinigungsaufgabe optimiert werden. Hier soll das Beispiel der mit Korrosionsschutzöl verunreinigten Zahnräder aus Kapitel 5.3.5 betrachtet werden. Die dort simulierte Reinigungsanlage erreicht bei der vorgegebenen Chargentaktzeit von 180 Sekunden eine Restverschmutzung von 0,748 ml Öl pro Charge. Die Reinigungskosten werden mit 0,603 € pro Charge abgeschätzt. Aufgabe des automatischen Optimierverfahrens ist es nun, eine Reinigungsanlage zu finden, bei deren Simulation mindestens die gleiche Bauteilreinheit erreicht wird und bei der die Reinigungskosten möglichst niedrig sind.

Die grundlegende Funktionsweise Evolutionärer Algorithmen wurde bereits in Kapitel 3.2.3 beschrieben. Für die Implementierung muss zunächst eine geeignete Codierung gefunden werden, in diesem Fall für die verschiedenen Reinigungsprozesse. Dabei muss vor allem bei den strukturellen Parametern eine Einschränkung erfolgen, da zum einen bestimmte Prozessstrukturen unsinnig sind (beispielsweise eine Trocknungsstufe zwischen zwei Tauchbädern) und zum anderen feste Regeln für die Evolutionsoperatoren (Rekombination, Mutation) notwendig sind.

An dieser Stelle werden folgende Regeln für den zu optimierenden Reinigungsprozess festgelegt: Am Anfang des Prozesses befinden sich ein bis zehn Reinigungsbecken, welche als Kaskade geschaltet sind und von einer Reinigerquelle gespeist werden. Der Ablauf des ersten Beckens führt in eine Senke. Alternativ kann diese Kaskade auch von einer Aufbereitungseinrichtung versorgt werden. Das Reinigungsmittel soll ein wässriger Neutralreiniger mit 5 % Zusatz (Tensiden) sein. Auf den alternativen Einsatz verschiedener Reinigungsmedien wird verzichtet, da keine Versuchsdaten zu den unterschiedlichen Reinigungswirkungen vorliegen. Eine Erweiterung des Evolutionären Algorithmus in diese Richtung ist allerdings problemlos möglich. An die Reinigung schließt sich eine Spülkaskade an, welche ebenfalls aus ein bis zehn Bädern besteht. Die Kaskade wird von einer Frischwasserquelle versorgt, und die Entsorgung erfolgt über eine Abwassersenke. Am Ende des Prozesses befindet sich eine Warmlufttrockeneinrichtung.

Insgesamt handelt es sich also um den in **Bild 5.1** dargestellten Reinigungsprozess, wobei die Anzahl der Reinigungsstufen sowie die Anzahl der Spülstufen variieren können. Auch die Reinigerversorgung kann entweder über eine Aufbereitungseinrichtung oder über je eine Quelle und eine Senke erfolgen. Weiterhin können sämtliche deskriptiven Parameter (Volumina, Temperaturen, Ultraschalleinrichtung usw.) variiert werden.

6.1.2 Ablauf des Evolutionären Algorithmus

Wie bereits in Kapitel 3.2.3.2 erläutert, gibt es verschiedene Arten evolutionärer Algorithmen, welche jedoch in der jüngeren Vergangenheit meist zu hybriden Verfahren verschmelzen, in denen die Vorteile verschiedener Ansätze kombiniert werden. Der hier vorgestellte Algorithmus ähnelt am ehesten der Evolutionsstrategie, enthält jedoch auch Elemente eines Genetischen Algorithmus, da neben der Mutation auch die Rekombination als Evolutionsoperator eine Rolle spielt.

Zunächst soll eine konkretisierte Version des in **Bild 3.7** gezeigten Evolutionären Algorithmus vorgestellt werden, welche weitgehend problemunabhängig funktioniert. Die dabei verwendeten Operatoren (Rekombination, Mutation, Fitnessermittlung) müssen im nächsten Schritt problemspezifisch programmiert werden. Dies wird im Rahmen der Integration des Evolutionären Algorithmus in das Simulationssystem in Kapitel 6.2 beschrieben.

Das Ablaufdiagramm des implementierten Evolutionären Algorithmus ist in **Bild 6.1** und **Bild 6.2** dargestellt. Im oberen Teil (**Bild 6.1**) werden Startwerte gesetzt, und die Startpopulation wird erzeugt. Bei einer festgelegten Populationsgröße von 60 Individuen pro Generation werden dazu 60 verschiedene Reinigungsprozesse zufällig erzeugt, und ihre Fitness wird bewertet. Näheres zur zufälligen Erzeugung von Prozessen und zur Fitnessbewertung findet sich in den Unterkapiteln 6.2.3 und 6.2.4. Der beste der gefundenen Prozesse wird in der Variablen *Bestes_Individuum* festgehalten. Aufgrund der vollkommen zufälligen Belegung der Population wird die Fitness dieses Prozesses wahrscheinlich noch relativ schlecht sein.

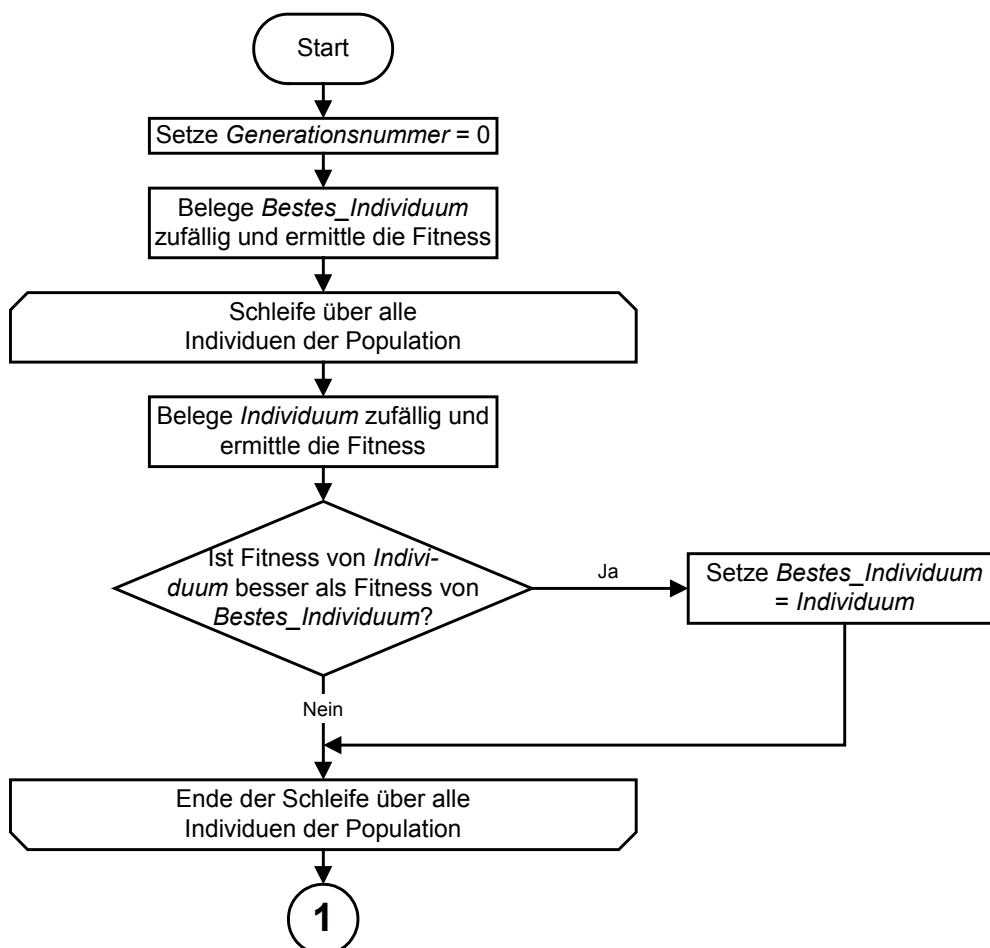
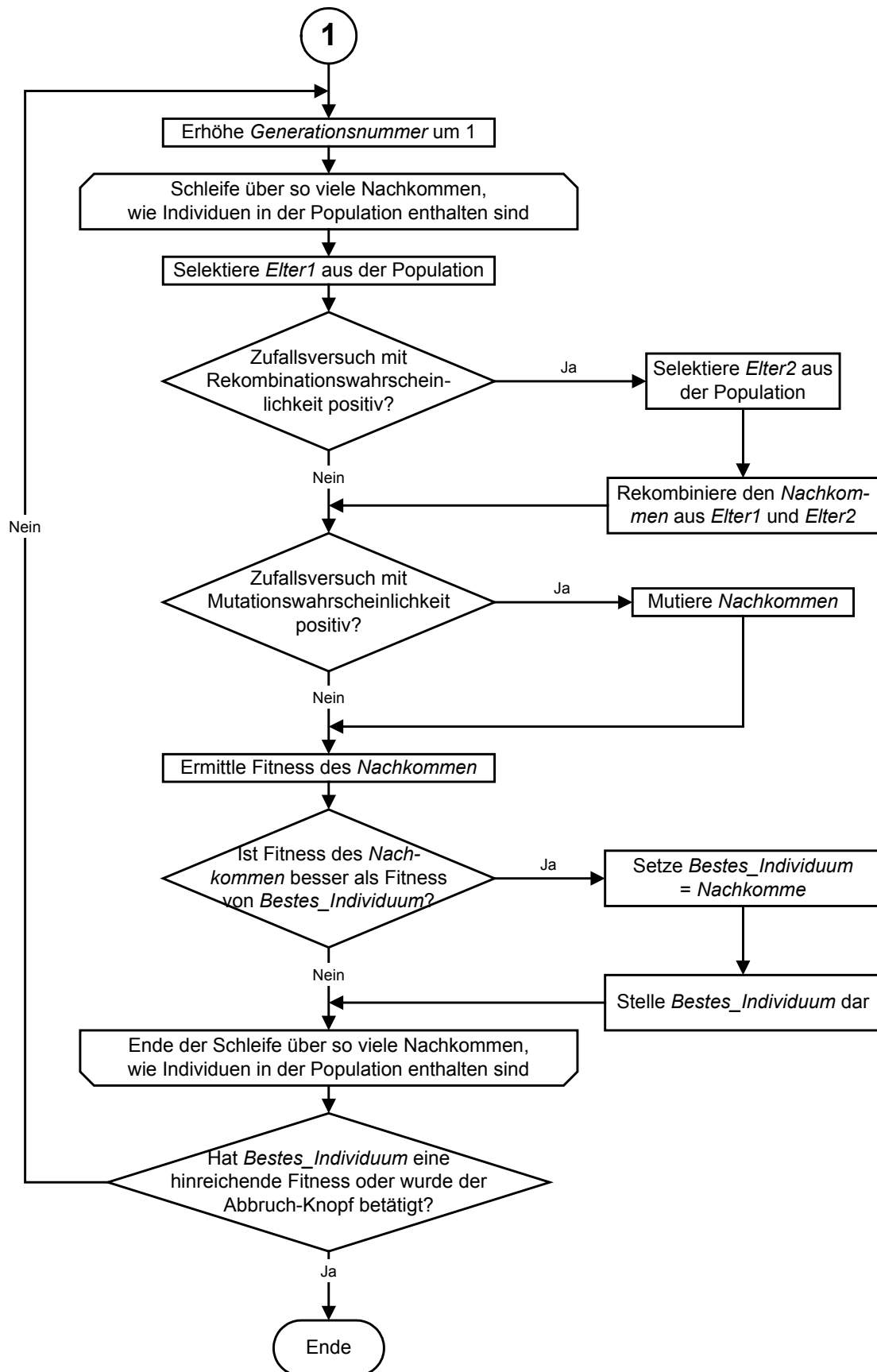


Bild 6.1 Ablaufdiagramm des modularen Evolutionären Algorithmus, Teil 1

**Bild 6.2** Ablaufdiagramm des modularen Evolutionären Algorithmus, Teil 2

Im unteren Teil des Algorithmus (**Bild 6.2**) befindet sich die eigentliche Evolutionsschleife. Jede neue Generation wird in einer Schleife über alle 60 zu belegenden Nachkommen erzeugt. Für jeden Nachkommen wird ein Elter aus der Vorgängerpopulation selektiert. Die Selektion erfolgt fitnessabhängig, so dass bessere Individuen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit ausgewählt werden, woraus der Selektionsdruck hin zu guten Lösungen resultiert. Die Selektion der Reinigungsprozesse wird in Kapitel 6.2.5 beschrieben.

Nun erfolgt mit einer Rekombinationswahrscheinlichkeit von 75% die Selektion eines weiteren Elters und die Rekombination der beiden zum neuen Nachkommen. Dieser Operator wird in 6.2.6 näher erläutert.

Danach wird mit einer Mutationswahrscheinlichkeit von 50% noch eine Mutation an dem Nachkommen vorgenommen. Diese wird in Kapitel 6.2.7 beschrieben.

Für den neuen Nachkommen wird dann die Fitness ermittelt. Ist diese besser als die Fitness des bis dahin besten Prozesses, wird der Nachkomme seinerseits in der Variablen *Bestes_Individuum* gespeichert. Der neue beste gefundene Prozess wird entweder am Bildschirm dargestellt oder in einer Datei gespeichert, aus welcher später die Ausgabedaten des Optimierprogramms ausgelesen werden können.

Der Abbruch der Evolutionsschleife erfolgt, wenn eine hinreichende Fitness erreicht wurde (beispielsweise durch Vorgabe von maximal zulässigen Reinigungskosten bei ausreichender Bauteilreinheit) oder der Benutzer den Abbruch per Tastendruck einleitet.

6.2 Integration in das Simulationssystem

6.2.1 Die Objektklasse „Prozess“

Die Integration des Evolutionären Algorithmus in das Simulationssystem erfolgt über die Objektklasse „Prozess“. Dies ist die Klasse, aus der jedes Individuum der Population abgeleitet wird. Das zugehörige Klassendiagramm ist in **Bild 6.3** dargestellt.

Die Datenstruktur der Klasse repräsentiert die Codierung für den Evolutionären Algorithmus (s. Kapitel 6.2.2). In den Methoden sind alle von dem Optimieralgorithmus benötigten Funktionen implementiert. Dazu gehört das zufällige Auslegen von Reinigungsprozessen für die Startpopulation (s. Kapitel 6.2.3), die Fitnessbewertung (Kapitel 6.2.4) sowie die Evolutionsoperatoren Rekombination (Kapitel 6.2.6) und Mutation (Kapitel 6.2.7). Die einzelnen Methoden werden in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

6.2.2 Codierung

Bei der Codierung des Reinigungsprozesses werden alle strukturalen und deskriptiven Parameter gespeichert. Es handelt sich um die gleiche Datenstruktur, wie sie das Simulationssystem verwendet (s. Kapitel 5.2), also Vektoren für die Prozessstationen, die Quellen, Senken und Aufbereitungen. Dadurch kann eine leichte Integration in den Simulator erfolgen.

Prozess
-anzahl_reini: int -anzahl_spuel: int -AufbereitungsV: Vector -Chargenkosten: double -fitness: double -Mindestvolumen: double -ProzessV: Vector -QuellenV: Vector -rnd: Random -Schmutz: double -SenkenV: Vector -Spuelkrit: double
+Prozess(double) +aendern(double, double, double): double +Anschlusse_neu_machen() +Aufbereitung_ausgeben(Aufbereitung) +Aufbereitung_wuerfeln(): Aufbereitung +ausgeben() +ausgeben(Ausgabedatei) +auswuerfeln() +Becken_ausgeben(Tauchbecken, Ausgabedatei) +Becken_ausgeben(Tauchbecken) +Chance(int): boolean +fitness_ermitteln(Bauteilcharge, Simulationszeit) +get_reinizahl(): int +get_spuelzahl(): int +getAufbereitungsV(): Vector +getChargenkosten(): double +getfitness(): double +getProzessV(): Vector +getQuellenV(): Vector +getSchmutz(): double +getSenkenV(): Vector +getSpuelkrit(): double +kopieren(): Prozess +mutieren() +Normalverteilung(double): double +Quelle_ausgeben(Quelle, Ausgabedatei) +Quelle_ausgeben(Quelle) +Quelle_wuerfeln(boolean): Quelle +rekombinieren(Prozess, Prozess) +Senke_ausgeben(Senke, Ausgabedatei) +Senke_ausgeben(Senke) +Senke_wuerfeln(boolean): Senke +set_AufbereitungsV(Vector) +set_ProzessV(Vector) +set_QuellenV(Vector) +set_reinizahl(int) +set_SenkenV(Vector) +set_spuelzahl(int) +setChargenkosten(double) +setfitness(double) +setSchmutz(double) +Spuelbecken_wuerfeln(): Spuelbecken +Tauchbecken_wuerfeln(): Tauchbecken +Warmlufttrocknen_ausgeben(Warmlufttrocknen, Ausgabedatei) +Warmlufttrocknen_ausgeben(Warmlufttrocknen) +Warmlufttrocknen_wuerfeln(): Warmlufttrocknen

Bild 6.3 Klassendiagramm zu der Objektklasse „Prozess“

6.2.3 Prozesse zufällig generieren

Die Belegung der Prozessdatenstruktur muss für die Erzeugung der Startpopulation zufällig erfolgen. Hierfür ist die Methode *auswuerfeln* vorgesehen. Diese erzeugt eine zufällige Anzahl von Tauchbecken, eine zufällige Anzahl von Spülbecken sowie eine Warmlufttrockeneinrichtung und speichert sie in dem Vektor „ProzessV“ ab. Ebenso wird eine Aufbereitungseinrichtung oder eine Quelle und eine Senke für die Reinigungsstufen sowie eine Quelle und eine Senke für die Spülstufen erzeugt und in den entsprechenden Vektoren abgelegt.

Zum Schluss müssen alle Anschlüsse (Überläufe, Quellen, Senken, Aufbereitungen) korrekt verschaltet werden. Die verwendeten Methoden werden im Folgenden beschrieben.

6.2.3.1 Tauchbecken zufällig generieren

Die Funktion *Tauchbecken_wuerfeln* erzeugt zufällig ein Tauchbecken. Das Beckenvolumen variiert zwischen einem festzulegenden Mindestwert und dem 20-fachen dieses Wertes. Für das hier betrachtete Beispiel der zehn zu reinigenden Zahnräder pro Bauteilcharge wird ein Mindestvolumen von 15 l festgelegt.

Mit einer Wahrscheinlichkeit von 70% wird eine Solltemperatur vorgegeben, welche zwischen 35 °C und 85 °C liegt. Für die restlichen 30% wird keine Heizeinrichtung modelliert. Auf die Vorgabe einer Heizleistung wird verzichtet, da eine Abhängigkeit zur Solltemperatur besteht: Eine vorgegebene Solltemperatur ist nur mit einer Mindestheizleistung zu erreichen, bzw. mit einer vorgegeben Heizleistung kann nicht jede beliebige Solltemperatur erreicht werden. Eine solche Abhängigkeit sollte aufgelöst werden, damit der Evolutionäre Algorithmus nicht beide Parameter unabhängig voneinander zu optimieren versucht.

Dies geschieht, indem die Heizleistung zunächst sehr hoch angesetzt wird (beispielsweise einige Megawatt), so dass während der Simulation auf jeden Fall die Solltemperatur erreicht und gehalten werden kann. Bei der Simulation der Reinigung der letzten zehn Chargen wird dann die tatsächlich benötigte Heizenergie protokolliert. Daraus kann mittels Division durch die zehnfache Chargentaktzeit die mindestens benötigte Heizleistung für die eingestellte Solltemperatur ermittelt werden. Diese wird dann dem Tauchbecken zugewiesen, um später die korrekten Abschreibungs- und Wartungskosten berechnen zu können.

Mit einer Wahrscheinlichkeit von 30% wird eine Ultraschalleinrichtung modelliert. Die Leistungsdichte variiert zwischen 5 und 30 Watt pro Liter Beckenvolumen.

Das fertige Becken wird von der Funktion zurückgegeben und kann in dem Vektor „ProzessV“ gespeichert werden.

6.2.3.2 Spülbecken zufällig generieren

Die zufällige Belegung von Spülbecken erfolgt mit der Funktion *Spuelbecken_wuerfeln* analog zu der Erzeugung von Tauchbecken. Allerdings liegt die Wahrscheinlichkeit für die Modellierung einer Heizung bei lediglich 10%, da Spülprozesse in der Praxis oft bei Raumtemperatur durchgeführt werden. Die Wahrscheinlichkeit für eine Ultraschallunterstützung wird mit nur 3% festgelegt, da die zusätzliche Reinigungswirkung beim Spülen in der Regel nicht benötigt wird.

6.2.3.3 Warmlufttrockeneinrichtungen zufällig generieren

Die Funktion *Warmlufttrocknen_wuerfeln* erzeugt eine Warmlufttrockeneinrichtung mit einer zufälligen Trockenleistung.

Damit ist jedoch nicht gewährleistet, dass die Bauteile auch tatsächlich innerhalb der Chargentaktzeit vollkommen trocken werden. Das Optimierverfahren wird versuchen, eine möglichst geringe Trockenleistung einzustellen, damit möglichst viel Restflüssigkeit erhalten bleibt und der darin enthaltene Schmutz nicht dem Restschmutz der Bauteile zugerechnet wird.

Um Abhilfe zu schaffen, könnte die Trockenheit der Bauteile als Optimierkriterium hinzugezogen werden. Das Optimierverfahren würde dann die optimale Trockenleistung annähern, mit der die Charge gerade noch ganz trocken wird. Dieser Ansatz ist jedoch zu aufwändig, da sich die benötigte Trockenleistung zur vollständigen Trocknung der Bauteile leicht berechnen lässt (s. Kapitel 5.2.11). Der nach Gleichung (5.15) berechnete Wert wird der Trockeneinrichtung vom Simulationssystem zugewiesen, welches zuvor die Eintrittstemperatur der Bauteile ermittelt. Dadurch ist eine optimale Trocknung sichergestellt, und das Optimierverfahren wird entlastet, da es einen Parameter weniger berücksichtigen muss.

6.2.3.4 Quellen zufällig generieren

Die Funktion *Quelle_wuerfeln* bekommt als Übergabewert die Information, ob es sich um eine Quelle für die Reinigungs- oder für die Spülkaskade handelt. Für die Reinigungskaskade wird ein Reiniger aus 95% Wasser und 5% Tensiden eingestellt (Kostensatz: 14,8 €/m³), für die Spülkaskade reines Wasser (Kostensatz: 1,5 €/m³). Der Volumenstrom variiert zwischen 0,0001 l/s und 2 l/s.

6.2.3.5 Senken zufällig generieren

Eine Senke wird von der Funktion *Senke_wuerfeln* erzeugt. Dabei wird der Entsorgungskostensatz für verbrauchten Reiniger mit 65 €/m³ und für Spülwasser mit 9 €/m³ festgelegt.

6.2.3.6 Aufbereitungseinrichtungen zufällig generieren

Die Funktion *Aufbereitung_wuerfeln* erzeugt eine Aufbereitungseinrichtung für die Reinigungskaskade. Der Frischreiniger besteht aus 95% Wasser und 5% Tensiden und kostet 14,8 €/m³. Der Volumenstrom variiert zwischen 0,01 l/s und 3 l/s. Der Kostensatz für die Entsorgung des Schmutzabfalls wird mit 65 €/m³ festgelegt. Die Klärleistung wird mit einem Wert zwischen 50 und 5000 Watt belegt.

6.2.3.7 Anschlüsse verschalten

Sind alle Prozesselemente zufällig erzeugt, müssen noch die Anschlüsse verschaltet werden. Dies erledigt die Funktion *Anschuesse_neu_machen*. Dabei werden alle Reinigungsbecken der Reihe nach rückwärts mit Überläufen verbunden (Kaskadenschaltung). Desgleichen wird

mit den Spülbecken verfahren. Der Ausgang der Aufbereitungseinrichtung wird an das letzte und der Eingang an das erste Reinigungsbecken angeschlossen (alternativ: Quelle und Senke). Auch die Quelle und die Senke für die Spülkaskade werden an das letzte und an das erste Spülbecken angeschlossen.

Damit ist der gesamte Reinigungsprozess zufällig erzeugt, und es kann die Fitnessbewertung erfolgen.

6.2.4 Fitnessbewertung

Bei der Fitnessbewertung wird dem Individuum ein Wert zugeordnet, welcher die Eignung des Individuums zur Lösung der gestellten Aufgabe beschreibt. Die Fitnessfunktion ist damit die Zielfunktion für die Optimierungsaufgabe.

Im hier vorliegenden Fall liefert das Simulationssystem die Grundlage für die Fitnessbewertung der verschiedenen Reinigungsprozesse. Die Hauptzielgröße sind dabei die Reinigungskosten pro Charge, welche es zu minimieren gilt. Dabei ist allerdings die Randbedingung einzuhalten, dass die Restverschmutzung pro Bauteilcharge einen vorgegeben Wert nicht überschreiten darf. Für das Beispiel der zu reinigenden Zahnräder wurde in Kapitel 5.3.5 eine maximale Restverschmutzung von 0,758 ml pro Charge ermittelt.

Solche Randbedingungen können von Evolutionären Algorithmen auf zweierlei Arten berücksichtigt werden: Entweder durch Letalmutation oder über Straffunktionen bei der Fitnessbewertung. Letalmutation bedeutet, dass ein neu erzeugter Nachkomme auf seine Funktionsfähigkeit, d. h. auf das Einhalten der Randbedingung hin, überprüft wird. Ist die Bedingung nicht erfüllt, „stirbt“ er, und es muss statt dessen ein neuer Nachkomme erzeugt werden. Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist es, dass dadurch der Suchraum für den Algorithmus eingeschränkt wird. Daher ist es empfehlenswerter, das Nichteinhalten von Randbedingungen mit Straffunktionen bei der Fitnessbewertung zu belegen. So könnte eine leichte Überschreitung des zulässigen Restschmutzes nur leicht bestraft werden, und ein ansonsten sehr günstiger Prozess könnte im Rahmen der weiteren Optimierung wieder in den zulässigen Bereich gelangen. Eine starke Überschreitung muss allerdings auch stark bestraft werden, da ansonsten die Einhaltung der Randbedingung gefährdet ist.

Eine geeignete Fitnessfunktion, welche auf den Reinigungskosten basiert und die Randbedingung der Bauteilreinheit in Form einer Straffunktion berücksichtigt, kann folgendermaßen formuliert werden:

$$f_{\text{Schm}} = \begin{cases} K_{\text{Ch}}, & \text{für } S_{\text{sim}} < S_{\text{zul}} \\ K_{\text{Ch}} \cdot \frac{(S_{\text{sim}} - S_{\text{zul}})^{1,5}}{10}, & \text{für } S_{\text{sim}} > S_{\text{zul}} \end{cases} \quad (6.1)$$

f_{Schm} = Fitness des simulierten Reinigungsprozesses unter Berücksichtigung des Restschmutzes

K_{Ch} = Reinigungskosten pro Charge [€] nach Gleichung (5.32), vom Simulator ermittelt

S_{sim} = Restverschmutzung pro Bauteilcharge, vom Simulator ermittelt [ml]

S_{zul} = maximal zulässige Restverschmutzung pro Bauteilcharge [ml]

Eine graphische Darstellung der Straffunktion für eine maximal zulässige Restverschmutzung von 0,75 ml Öl pro Bauteilcharge zeigt **Bild 6.4**.

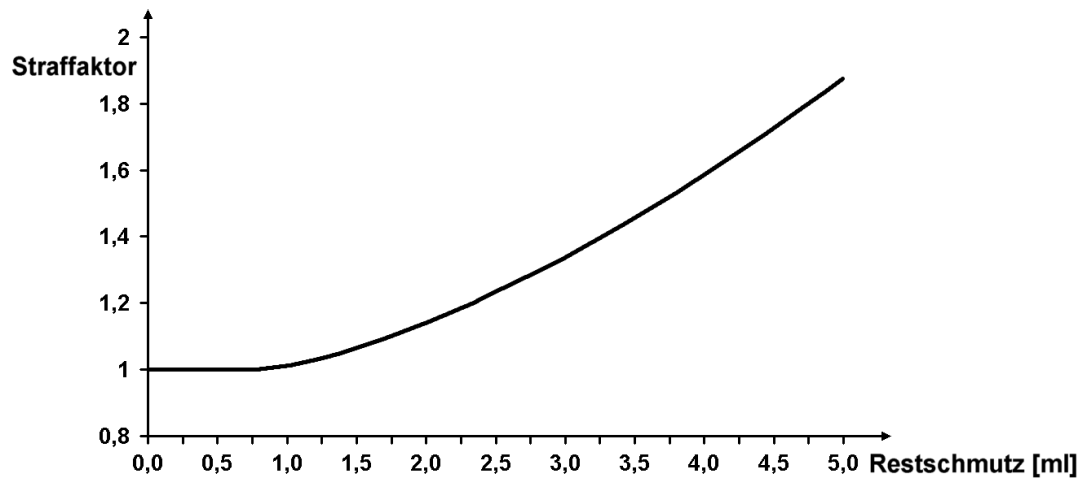


Bild 6.4 Straffunktion für eine maximal zulässige Restverschmutzung von 0,75 ml Öl pro Charge

Auf diese Art und Weise können auch weitere Randbedingungen berücksichtigt werden. Beispielsweise kann neben der eigentlichen Bauteilreinheit auch ein mindestens einzuhaltendes Spülkriterium gefordert werden. Das tatsächlich erreichte Spülkriterium kann vom Simulationssystem leicht ermittelt werden, indem die Konzentration des Reinigerzusatzes in dem letzten Reinigungsbecken (5% Tenside) durch die Konzentration dieses Zusatzes im letzten Spülbecken dividiert wird. Laut /NN04/ ist beispielsweise bei der Heißentfettung ein Spülkriterium ab $R_{zul} = 100$ zu fordern. Die hierfür implementierte Straffunktion ist ähnlich wie die für den Restschmutz aufgebaut (s. **Bild 6.5**):

$$f_P = \begin{cases} f_{Schm}, & \text{für } R_{sim} > R_{zul} \\ f_{Schm} \cdot \frac{(R_{zul} - R_{sim})^2}{1000}, & \text{für } R_{sim} < R_{zul} \end{cases} \quad (6.2)$$

f_P = Fitness des simulierten Reinigungsprozesses

f_{Schm} = Fitness unter Berücksichtigung des Restschmutzes nach Gleichung (6.1)

R_{sim} = Spülkriterium, vom Simulator ermittelt

R_{zul} = minimal erforderliches Spülkriterium

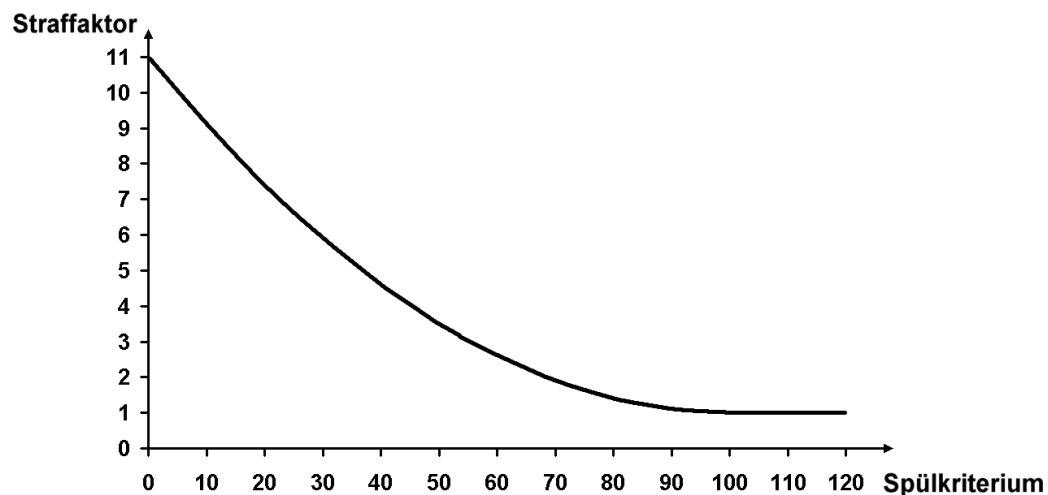


Bild 6.5 Straffunktion für ein mindestens gefordertes Spülkriterium von 100

Die Fitnessbewertung für ein Individuum geschieht nach dieser Formel in der Funktion *fitness_ermitteln* der Objektklasse „Prozess“. Sie sollte nicht allzu viel Rechenzeit in Anspruch nehmen, da sie sehr oft vorgenommen werden muss. Ein Simulationslauf für einen normalen Reinigungsprozess (z. B. den in 5.3.5 simulierten) benötigt auf einem heute handelsüblichen Notebook mit einem Prozessortakt von 1,5 GHz ca. eine halbe bis eine Sekunde. Bei einer Populationsgröße von 60 Individuen pro Generation können damit an einem Tag ca. 2000 Generationen bewertet werden. Erfahrungsgemäß sind gute Ergebnisse nach wenigen Tausend Generationen zu erwarten. Insofern ergibt sich eine Optimierungsdauer von einem bis wenigen Tagen, welche dadurch zu rechtfertigen ist, dass eine solche Auslegung für eine Reinigungsanlage (mit einer geplanten Nutzungsdauer von mehreren Jahren) einmalig ist. Außerdem ist in Zukunft durch die ständig steigende Rechenleistung mit weiteren Verbesserungen zu rechnen.

Die Dauer eines Simulationslaufes hängt annähernd linear von der Länge der simulierten Zeit ab. Die Simulation wird im Normalfall abgebrochen, wenn der eingeschwungene Zustand erreicht ist (s. Kapitel 5.3.1). Je nach Einstellung der Prozessparameter kann dies jedoch sehr lange dauern. Damit die Simulation und damit die Fitnessbewertung für ein einzelnes Individuum nicht allzu lange dauern kann, wird daher die maximale simulierte Zeit auf 250.000 Sekunden beschränkt. Nach diesem simulierten Zeitraum wird die Simulation abgebrochen. Jedoch ist das Ergebnis der Simulation dann unsinnig und darf nicht verwendet werden. Insofern gibt es noch eine dritte Randbedingung für die Fitnessfunktion, welche nicht reinigungstechnischer, sondern programmiertechnischer Natur ist: Der Prozess muss während der Simulation auf jeden Fall den eingeschwungenen Zustand erreichen. Ist dies nicht der Fall, so wird die nach Gleichung (6.2) ermittelte Fitness nochmals mit dem Faktor 5 multipliziert, was einer beinahe letalen Straffunktion entspricht.

6.2.5 Selektion

Die Selektion hat die Aufgabe, aus der Population Individuen als Eltern für Nachkommen auszuwählen. Diese Auswahl soll auf der Fitness basieren, so dass die Auswahlwahrscheinlichkeit für jedes Individuum umso höher ist, desto besser (also kleiner) sein Fitnesswert ist.

Für den hier vorgestellten Evolutionären Algorithmus wurden alternativ die beiden gängigen Selektionsverfahren Turnierselktion und Glücksradselektion implementiert, welche im Folgenden näher beschrieben werden sollen.

Bei der **Turnierselktion** wird eine kleine Gruppe von Individuen zufällig aus der Population ausgewählt. Die Größe dieser Gruppe wird mit dem Parameter „Turniergröße“ festgelegt. Die ausgewählten Teilnehmer nehmen nun an einem Turnier teil, welches derjenige mit dem besten Fitnesswert gewinnt. Dieser Gewinner ist das selektierte Individuum. Solche Turniere arbeiten rangbasiert, das heißt, die Individuen werden direkt miteinander verglichen, ohne dass der Betrag des Fitnessunterschiedes berücksichtigt wird. Für die Auswahl ist es also unerheblich, ob der Fitnesswert eines Individuums 1% besser oder 1000 mal so gut ist wie die der anderen Turnierteilnehmer. Die Anzahl der Turnierteilnehmer bezogen auf die Populationsgröße ist hier natürlich von entscheidender Bedeutung: Nimmt nur ein Individuum an jedem Turnier teil, entspricht die Turnierselktion einer rein zufälligen Auswahl. Nehmen alle Individuen der Population teil, wird immer genau das allerbeste Individuum der Population ausgewählt. Für eine Populationsgröße von 60 Individuen pro Generation hat sich eine Turniergröße von 6 Teilnehmern als empfehlenswert herausgestellt.

Die **Glücksradselektion** arbeitet im Gegensatz zu der Turniers Selektion fitnessproportional. Sie funktioniert nur für eine Maximierung der Fitness, was bei dem hier vorliegenden Minimierungsproblem für die Reinigungskosten durch Transformation erreicht werden kann. Beispielsweise kann jeder Fitnesswert von einem festen Wert, welcher über der maximalen (also schlechtesten) in der Population vorkommenden Fitness liegt, subtrahiert werden. Das Ergebnis gilt es zu maximieren.

Bei der Glücksradselektion werden zunächst die Fitnesswerte der gesamten Population addiert. Das Ergebnis wird nun als Umfang eines Glücksrades betrachtet, welches daraufhin in Segmente eingeteilt wird. Jedes Segment verkörpert ein Individuum, und der Winkel des Segmentes wird durch den Fitnesswert des Individuums, bezogen auf den Gesamtumfang (Fitnesssumme der Population) bestimmt (s. **Bild 6.6**). Nun wird das virtuelle Glücksrad gedreht, und das Individuum, über dem das Rad stehen bleibt, wird selektiert. Somit ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Individuum ausgewählt wird, genau so groß wie sein Fitnesswert, bezogen auf die Summe aller Fitnesswerte der Population.

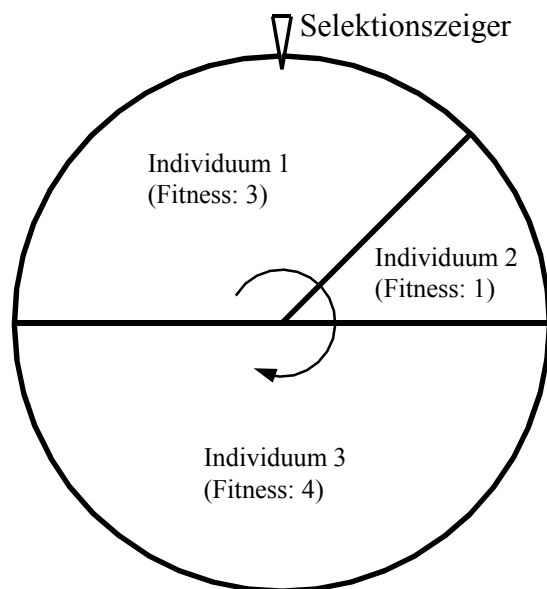


Bild 6.6 Glücksradselektion

Dies bringt allerdings das Problem mit sich, dass die Selektion einer reinen Zufallsauswahl gleichkommt, sobald die Fitnesswerte in der Population alle von der Größenordnung her ähnlich sind. Dies kann entweder der Fall sein, wenn alle Individuen annähernd gleich gut sind, oder wenn die Skalierung der Fitness ungünstig ist, zum Beispiel durch Addition einer sehr großen Konstante zu jedem Fitnesswert. Bei den Reinigungskosten haben beispielsweise die Arbeitskosten einen hohen Anteil von ca. 50%, sind jedoch vom Optimierverfahren nicht zu reduzieren, so dass sie einer Konstante gleichkommen. Bei der Turniers Selektion spielt diese Konstante keine Rolle.

Der geringe Selektionsdruck der Reinigungsprozessoptimierung mit Glücksradselektion führt zu einer niedrigen Konvergenzgeschwindigkeit, das heißt, dass die Annäherung an eine optimale Lösung nur sehr langsam erfolgt. Dafür ist der Algorithmus mit solch einem niedrigen Selektionsdruck explorativer, indem viele unterschiedliche Lösungen weiterverfolgt (rekombiniert und mutiert) werden, die sonst durch den starken Selektionsdruck schnell aussortiert würden. Schneller zu guten Lösungen führt allerdings die Turniers Selektion.

6.2.6 Rekombination

Die Rekombination hat die Aufgabe, aus zwei selektierten Individuen der Elterngeneration ein neues Individuum für die Nachkommengeneration zu erzeugen. Dabei soll der Nachkomme jede seiner Eigenschaften zufällig von dem einen oder dem anderen Elter „erben“. Dabei besteht analog zur Natur die Möglichkeit, dass gute Teillösungen zu sehr guten Gesamtlösungen verbunden werden.

Die Rekombination ist der Hauptoperator der Genetischen Algorithmen (s. Kapitel 3.2.3.2). Dort spricht man auch vom „Crossover“, bei dem beide Elternindividuen an einer festgelegten Stelle in jeweils zwei Teile aufgespalten und diese Teile über Kreuz zu neuen Nachfahren zusammengesetzt werden.

Bei Reinigungsprozessen erweist es sich als sinnvoll, diese Aufspaltung genau zwischen der Reinigungs- und der Spülkaskade vorzunehmen. Die Funktion *rekombinieren* der Objektklasse „Prozess“ erzeugt also aus zwei übergebenen Elternprozessen einen neuen Prozess, indem sie von dem einen Elter die Reinigungskaskade inklusive deren Reinigerversorgung und von dem anderen Elter die Spülkaskade mit Spülwasserversorgung sowie die Warmlufttrockeneinrichtung übernimmt.

6.2.7 Mutation

Die Funktion *mutieren* ist ebenfalls eine Methode der Objektklasse „Prozess“. Sie führt die Mutation der jeweiligen Prozessinstanz durch. Im Gegensatz zur Rekombination ist die Mutation der Hauptoperator der Evolutionsstrategien, während sie bei den Genetischen Algorithmen von eher untergeordneter Bedeutung ist (s. Kapitel 3.2.3.2). Der Mutationsoperator soll eine oder mehrere Eigenschaften eines Individuums zufällig verändern.

Die Eigenschaften eines Reinigungsprozesses liegen in Form der Parameter vor, wobei strukturelle und deskriptive Parameter zu unterscheiden sind (s. Kapitel 5.1.2). Daher ist zu Beginn der Mutation zu entscheiden, welche dieser beiden Parameterarten verändert werden soll. Als gute Einstellung hat sich erwiesen, mit 20-prozentiger Wahrscheinlichkeit die Prozessstruktur zu verändern und in den restlichen 80% der Fälle andere Parameter zu mutieren.

Für eine Mutation der Prozessstruktur wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit eine von vier Operationen durchgeführt:

- Entfernen einer beliebigen Reinigungs- oder Spülstation
- Hinzufügen einer zufällig erzeugten Reinigungsstation
- Hinzufügen einer zufällig erzeugten Spülstation
- Wechsel der Versorgung der Reinigungskaskade von Aufbereitungseinrichtung zu Quelle/Senke oder umgekehrt

Sämtliche deskriptiven Prozessparameter sind mit reellen Zahlen belegt. Eine Mutation eines solchen Parameters sollte immer durch Addition einer normalverteilten Zufallsvariablen mit dem Erwartungswert 0 erfolgen, so dass analog zur natürlichen Evolution die Wahrscheinlichkeit für kleine Veränderungen höher ist als die für große.

Daher wurde in der Objektklasse „Prozess“ die Methode *aendern* definiert, welche als Übergabewerte einen bestehenden Parameterwert und die Untergrenze sowie die Obergrenze für diesen Parameter erhält. Als Rückgabewert liefert die Methode den mutierten Parameterwert, den sie erzeugt, indem zu dem bestehenden Wert eine normalverteilte Zufallsvariable mit dem Erwartungswert 0 hinzuaddiert wird. Die Standardabweichung, welche die Mutationschrittweite bestimmt, wird mit der Hälfte des Wertebereichs festgelegt, der sich durch Subtraktion der Untergrenze von der Obergrenze des zu mutierenden Parameters ergibt. Liegt der mutierte Wert unterhalb der Untergrenze oder oberhalb der Obergrenze des Parameters, so wird statt dessen die Untergrenze bzw. die Obergrenze zurückgegeben.

Die Mutation eines deskriptiven Parameters wird vorgenommen, indem mit gleich hoher Wahrscheinlichkeit unter Anwendung der oben beschriebenen Funktion *aendern* eine der folgenden fünf Operationen durchgeführt wird:

- Variation eines beliebigen **Badvolumens** zwischen dem vorgegebenen Minimalwert (im Beispiel der zu reinigenden Zahnräder 20 l) und dem Zwanzigfachen dieses Wertes
- Variation der **Solltemperatur** eines beliebigen Beckens zwischen Raumtemperatur (d. h. keine Temperaturregelung) und 85 °C
- Variation der **Ultraschalleistungsdichte** in einem beliebigen Becken zwischen 0 W/l (d. h. keine Ultraschallunterstützung) und 30 W/l
- Variation der **Reinigerversorgung**: im Falle einer Aufbereitungseinrichtung: mit 60%-iger Wahrscheinlichkeit den Volumenstrom zwischen 0,01 l/s und 3 l/s verändern und ansonsten die Aufbereitungsleistung zwischen 50 W und 5000 W verändern; im Falle einer Quelle mit einer Senke: den Quellvolumenstrom zwischen 0,001 l/s und 2 l/s verändern
- Variation des **Spülwasservolumenstroms** zwischen 0,001 l/s und 2 l/s

Die Funktion *mutieren* liefert keinen Rückgabewert, da die Mutation an der Prozessinstanz selbst vorgenommen wird, so dass im Gegensatz zur Rekombination keine Rückgabe des neuen Prozesses erforderlich ist.

6.3 Ausgabedaten des Optimierprogramms

6.3.1 Bildschirmausgabe

Das Ergebnis der Optimierung ist der beste von dem Evolutionären Algorithmus gefundene Reinigungsprozess, d. h. seine strukturalen und deskriptiven Parameterwerte. Gerade zu Beginn eines Programmlaufes ist dieser Prozess absolut betrachtet noch sehr schlecht, da er im Rahmen der Belegung der Startpopulation zufällig ermittelt wurde. Bei Fortschreiten der Generationen jedoch werden durch die evolutionäre Vorgehensweise immer bessere Prozesse mit immer niedrigeren Fitnesswerten gefunden. Um hier die Entwicklung der endgültig gefundenen Lösung nachvollziehen zu können, werden diese Prozesse der Reihe nach in eine Ausgabedatei geschrieben (s. Kapitel 6.3.2). Das Endergebnis der Optimierung kann dann am Ende dieser Datei abgelesen werden.

Dennoch ist auch eine Bildschirmausgabe erforderlich. Da ein Programmlauf relativ viel Rechenzeit benötigt, wird der Fortschritt des Algorithmus am Bildschirm ausgegeben. Für jedes neu erzeugte Individuum wird die Generationsnummer, die Individuenummer sowie die ermittelte Bauteilreinheit, die Reinigungskosten und das Spülkriterium ausgegeben.

Zum Vergleich werden diese Werte auch jeweils für den besten bis dahin gefundenen Prozess ausgegeben. So kann der Benutzer beurteilen, ob bereits ein für ihn hinreichender Prozess gefunden wurde bzw. ob noch ein weiterer Fortschritt erzielt wird. Ist das Ergebnis zufriedenstellend, kann der Programmablauf abgebrochen und das Ergebnis der Ausgabedatei entnommen werden.

6.3.2 Ausgabedatei

Die Ausgabedatei ist eine Textdatei, in der jeder gefundene beste Prozess mit allen erforderlichen Angaben protokolliert wird. Dazu gehören neben der Generationsnummer alle strukturellen und deskriptiven Parameter sowie die simulierte Bauteilreinheit, das Spülkriterium und die Reinigungskosten.

Die Angaben aus der Ausgabedatei für den besten in einem Beispiellauf des Evolutionären Algorithmus gefundenen Prozess sind in der Tabelle in **Bild 6.10** dargestellt. Mit Hilfe dieser Parameterwerte kann der Anlagenbauer nun die optimierte Anlage auslegen.

6.4 Testläufe und Ergebnisse

6.4.1 Beispielhafter Programmablauf

Für den beispielhaften Programmablauf wurde wieder das Reinigungsproblem aus Kapitel 5.3.5 gewählt. Eine Bauteilcharge besteht aus zehn zu reinigenden Zahnrädern (s. **Bild 5.31**), welche mit 0,5 l Korrosionsschutzöl verunreinigt sind und ein Verschleppungsvolumen von 0,2 l aufweisen. Die geforderte Bauteilreinheit wurde nach dem Simulationslauf in Kapitel 5.3.5 mit maximal 0,75 ml Restöl pro Charge festgelegt. Das Spülkriterium soll mindestens 100 betragen.

Stufe	Typ	Volumen	Solltemp.	Heizleistg.	US-Leistg.	Trockenleistg.
1	Tauchen	20 l	328,15 K	3442 W	0	-
2	Tauchen	20 l	328,15 K	317 W	0	-
3	Tauchen	20 l	328,15 K	2228 W	12 W/l	-
4	Spülen	20 l	293,15 K	0	0	-
5	Spülen	20 l	293,15 K	0	0	-
6	Trocknen	-	-	-	-	4647 W
Versorgung der Reinigungsbecken: Aufbereitung mit 95% Wasser u. 5% Tensiden; Volumenstrom 1 l/s ; Aufbereitungsleistung 500 W						
Versorgung der Spülbecken: Quelle mit 100% Wasser, 0,02 l/s ; Ablauf in Senke						
Restschmutz pro Charge: 0,748 ml				Spülkriterium: 342		
Reinigungskosten pro Charge: 0,5405 €						

Bild 6.7 Beispielprozess mit optimaler Heiz- und Trockenleistung

Die Kosten für eine Reinigung nach dem in **Bild 5.34** dargestellten Prozess betragen 0,603 € pro Charge. Allerdings wurde in Kapitel 6.2.3 das Konzept beschrieben, die optimale Heizleistung eines Beckens abhängig von dessen Solltemperatur zu ermitteln und auch die Trockenleistung genau an die zu trocknenden Bauteile anzupassen. Da dies kein direktes Ergebnis der evolutionären Optimierung ist, soll zunächst der Simulationslauf aus Kapitel 5.3.5 mit

dem nach diesem Ansatz verbesserten Prozess wiederholt werden. Das Ergebnis zeigt die Tabelle in **Bild 6.7**. Die Zusammensetzung der Reinigungskosten kann **Bild 6.8** entnommen werden.

Kostenart	Kosten pro Charge [€]
Abschreibungskosten	0,0423
kalkulatorische Zinsen	0,0127
Wartungskosten	0,0271
Energiekosten	0,0853
Reiniger- und Frischwasserkosten	0,0083
Abfall- und Abwasserentsorgungskosten	0,0648
Personalkosten	0,3000
Summe	0,5405

Bild 6.8 Zusammensetzung der Reinigungskosten des Beispielprozesses mit optimaler Heiz- und Trockenleistung

Generationsnummer	Anzahl der Reinigungsbäder	Anzahl der Spülbäder	Restschmutz [ml]	Spülkriterium	Reinigungskosten pro Charge [€]
1	3	1	0,832005	127,8	0,95176
1	1	3	0,000005	62267,8	0,82066
1	3	3	0,838514	133972,0	0,76536
2	3	3	0,838514	133972,0	0,76536
2	3	2	0,839939	2067,0	0,76157
3	1	3	0,000003	134048,3	0,76341
3	3	4	0,840270	12082,7	0,70892
3	3	3	0,841313	118,0	0,67310
4	1	2	0,005693	111,3	0,67358
4	1	3	0,005515	117,4	0,65859
5	3	3	0,854474	116,1	0,63510
7	3	2	0,881011	111,8	0,62617
7	3	3	0,857911	118,1	0,62385
8	3	3	0,888548	116,9	0,59651
9	3	3	0,888466	114,6	0,59529
10	3	3	1,036553	116,1	0,57696
24	3	3	0,657729	104,6	0,55107
65	3	3	0,840824	99,9	0,50117
102	3	3	0,801343	100,0	0,50039
193	3	3	0,772669	99,9	0,50058
255	3	3	0,723069	99,9	0,49967
284	3	3	0,783910	100,0	0,49718
321	3	3	0,783635	100,0	0,49715
397	3	3	0,757605	100,0	0,49740
402	3	3	0,773280	100,0	0,49725
606	3	3	0,786140	100,0	0,49707
658	3	3	0,756019	100,0	0,49724
824	3	3	0,760942	100,0	0,49715
1099	3	3	0,760506	100,0	0,49710
1171	3	3	0,776258	100,1	0,49690

Bild 6.9 Überblick über einen Teil der beim beispielhaften Programmablauf gefundenen besten Prozesse

Im Rahmen der automatischen Optimierung soll nun ein Reinigungsprozess gefunden werden, der die geforderte Reinigungsqualität zu möglichst geringen Reinigungskosten erreicht. Die für den Ausgangsprozess ermittelten 0,5405 € pro Bauteilcharge sollen dabei auf jeden Fall unterschritten werden.

Bei dem dazu durchgeführten Programmlauf des Evolutionären Algorithmus wurden ca. 2000 Generationen erzeugt, wozu knapp zwei Tage Rechenzeit erforderlich waren. Einen Überblick über einen Teil der dabei in der Ausgabedatei protokollierten besten Prozesse gibt die Tabelle in **Bild 6.9**.

6.4.2 Bester gefundener Prozess

Der insgesamt beste bei dem Programmlauf gefundene Prozess ist in der Tabelle in **Bild 6.10** mit allen erforderlichen Angaben dargestellt. Die Reinigungskostenstruktur kann der Tabelle in **Bild 6.11** entnommen werden.

Stufe	Typ	Volumen	Solltemp.	Heizleistg.	US-Leistg.	Trockenleistg.
1	Tauchen	15 l	326,04 K	0	0	-
2	Tauchen	15 l	333,72 K	6032 W	0	-
3	Tauchen	15 l	328,54 K	0	0	-
4	Spülen	15 l	327,15 K	0	0	-
5	Spülen	15 l	323,78 K	0	0	-
6	Spülen	15 l	319,09 K	0	0	-
7	Trocknen	-	-	-	-	4587 W
Versorgung der Reinigungsbecken: Aufbereitung mit 95% Wasser u. 5% Tensiden; Volumenstrom 0,298 l/s ; Aufbereitungsleistung 253,95 W						
Versorgung der Spülbecken: Quelle mit 100% Wasser, 0,0047 l/s ; Ablauf in Senke						
Restschmutz pro Charge: 0,776 ml				Spülkriterium: 100,1		
Reinigungskosten pro Charge: 0,4969 €				Generation: 1171		

Bild 6.10 Bester gefundener Reinigungsprozess

Kostenart	Kosten pro Charge [€]
Abschreibungskosten	0,0381
kalkulatorische Zinsen	0,0114
Wartungskosten	0,0219
Energiekosten	0,0814
Reiniger- und Frischwasserkosten	0,0042
Abfall- und Abwasserentsorgungskosten	0,0399
Personalkosten	0,3000
Summe	0,4969

Bild 6.11 Zusammensetzung der Reinigungskosten des besten gefundenen Prozesses

Der Evolutionäre Algorithmus hat hier einen Reinigungsprozess gefunden, dessen Reinigungskosten pro Charge ca. 8% niedriger sind als die des Ausgangsprozesses. Die erreichte Bauteilreinheit und das Spülkriterium erfüllen dabei die Anforderungen voll. Der um 0,03 ml erhöhte Restschmutz ist dabei zu vernachlässigen, da die Forderung nach maximal 0,75 ml lediglich eine Größenordnung und keine Fixgrenze darstellt (s. Simulationslauf in Kapitel 5.3.5).

Zu erkennen ist, dass nicht nur deskriptive Parameter optimiert, sondern auch die Prozessstruktur verändert wurde. Der beste Prozess weist zwar auch drei Tauchbecken auf, jedoch wurde die Spülkaskade von zwei auf drei Becken erweitert. Dadurch kann ein deutlich geringerer Quellvolumenstrom für das Spülwasser gewählt werden, ohne dass das Spülkriterium zu gering wird. Dies spart Frischwasser- und Entsorgungskosten.

Bei Betrachtung der deskriptiven Parameter fällt sofort auf, dass alle Becken dasselbe Volumen, nämlich das Mindestvolumen von 15 l, aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein geringes Beckenvolumen mehrere Vorteile, jedoch keine Nachteile gegenüber größeren Volumina mit sich bringt. Zum einen ist der Wärmeverlust eines kleinen Beckens gering, so dass eine geringere Heizleistung zum Halten der voreingestellten Solltemperaturen ausreicht. Ein weiterer Punkt ist der positive Einfluss der Schwankungen im Ölgehalt sowohl in Spül- als auch in Reinigungsbecken, welcher in Kapitel 5.3.3.2 beschrieben wird: Je kleiner ein Becken ist, desto stärker schwankt die Ölkonzentration im Chargentakt um einen mittleren Wert. Die Entnahme der Bauteilchargen findet immer dann statt, wenn diese Schwankung ihren niedrigsten Wert erreicht hat, so dass die Bauteile mit weniger Öl aus der Station entnommen werden, als durch den mittleren Wert vorgegeben. Somit sind sie umso „sauberer“, desto stärker die Ölkonzentration schwankt, also desto kleiner die Becken sind. Ein Vorteil großer Becken lässt sich (zumindest bei der aktuellen Beschaffenheit des Simulationssystems) nicht ausmachen. Dementsprechend hat der Evolutionäre Algorithmus hier für eine optimale Parametereinstellung aller Beckenvolumina gesorgt.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist die Heizeinrichtung, welche lediglich an einem Tauchbecken, nämlich dem mittleren, angebracht wird. Dennoch steht die Solltemperatur der anderen beiden Becken nicht auf Raumtemperatur. Das mittlere Becken wird nämlich auf eine relativ hohe Temperatur von gut 60 °C geheizt, und durch den Reinigerfluss über den Überlauf in das erste Becken wird dieses dann mitbeheizt. Die aufgeheizten Bauteile wiederum erwärmen auch das dritte Tauchbecken, so dass sich der positive Temperatureinfluss auf die Reinigungswirkung in allen drei Reinigungsbecken auswirkt. Dabei kann die tatsächlich erreichte Temperatur auch über der Solltemperatur der unbeheizten Becken liegen, nur nicht darunter, weil in dem Fall eine Heizung installiert würde. Für das erste und das letzte Reinigungsbecken werden die Investitionskosten für die Heizung (100 € Grundpreis) gespart, was sich über Abschreibungs-, kalkulatorische Zins- und Wartungskosten positiv auf die Reinigungskosten pro Charge auswirkt.

An der „Entwicklungsgeschichte“ des gefundenen besten Prozesses, welche in **Bild 6.9** dargestellt ist, zeigt sich, dass die grundsätzliche Prozessstruktur (drei Reinigungs- und drei Spülbecken) bereits in der siebten Generation festgelegt und danach nicht mehr verändert wurde. Das liegt daran, dass die Optimierung der strukturalen und der deskriptiven Parameter parallel erfolgen muss. Sind nun aber die deskriptiven Parameter für einen Prozess schon relativ gut eingestellt, wird eine zufällige Veränderung der Prozessstruktur, beispielsweise das Hinzufügen eines zufällig belegten Reinigungsbeckens, eine deutliche Verschlechterung des Prozesses bewirken, da die deskriptiven Parameterwerte nicht mehr zu der neuen Struktur passen. Dieser Prozess stirbt zwischen den bereits vorhandenen guten Prozessen mit der alten Struktur mit hoher Wahrscheinlichkeit schnell wieder aus, so dass hier keine weitere Optimierung erfolgen kann. Mit der einmal festgelegten Struktur wird erfahrungsgemäß innerhalb von ca. 1000 Generationen ein zumindest weitgehend optimaler Prozess ausgelegt.

Dass die Prozessstruktur verhältnismäßig früh festgelegt wird, wenn die Population noch stark von der zufällig belegten Startpopulation beeinflusst ist, zeigt sich auch darin, dass bei unterschiedlichen Durchläufen des Evolutionären Algorithmus oft unterschiedlich strukturierte Prozesse gefunden werden. Beispielsweise zeigt **Bild 6.12** einen Reinigungsprozess mit fünf Reinigungs- und drei Spülbecken, dessen Reinigungskosten sogar noch geringfügig besser sind als die des Prozesses aus **Bild 6.10**. Die höheren Investitionskosten für die Anlage werden hier durch geringere Betriebskosten wettgemacht. Der Unterschied in den Reinigungskosten ist zwar mit ca. 0,4% gemessen an dem bereits genutzten Optimierungspotential von 8% relativ gering, doch es bleibt festzuhalten, dass mit dem Optimierverfahren keine Garantie besteht, den jeweils absolut besten Prozess für eine Reinigungsaufgabe zu finden. Statt dessen kann davon ausgegangen werden, dass ein sehr guter Prozess gefunden wird, was gegebenenfalls mit mehreren Programmdurchläufen verifiziert werden sollte. Welcher Reinigungsprozess dann tatsächlich implementiert wird, sollte der Anlagenanbieter im Dialog mit dem Anwender entscheiden.

Stufe	Typ	Volumen	Solltemp.	Heizleistg.	US-Leistg.	Trockenleistg.
1	Tauchen	15 l	317,99 K	0	0	-
2	Tauchen	15 l	323,36 K	4721 W	0	-
3	Tauchen	15 l	297,64 K	0	0	
4	Tauchen	15 l	295,01 K	0	14,82 W/l	
5	Tauchen	15 l	294,94 K	0	0	-
6	Spülen	15 l	319,83 K	0	0	-
7	Spülen	15 l	301,87 K	0	0	-
8	Spülen	15 l	304,78 K	0	0	-
9	Trocknen	-	-	-	-	4613 W
Versorgung der Reinigungsbecken: Aufbereitung mit 95% Wasser u. 5% Tensiden; Volumenstrom 0,514 l/s ; Aufbereitungsleistung 254,14 W						
Versorgung der Spülbecken: Quelle mit 100% Wasser, 0,0047 l/s ; Ablauf in Senke						
Restschmutz pro Charge: 0,778 ml				Spülkriterium: 103,3		
Reinigungskosten pro Charge: 0,4949 €				Generation: 1263		

Bild 6.12 Bester gefundener Reinigungsprozess in einem weiteren Durchlauf des Evolutionären Algorithmus

Insgesamt wurden durch den entwickelten Evolutionären Algorithmus sehr gute Reinigungsprozesse ausgelegt, ohne dass Wissen über die Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern und dem Reinigungsergebnis bzw. den Kosten verwendet wurde.

Das Problem des Auffindens lokaler Optima resultiert vor allem aus der Tatsache, dass gleichzeitig die Prozessstruktur und die deskriptiven Parameter optimiert werden müssen. Als Abhilfe wird in der Informatik an zahlreichen Konzepten zur Effizienzsteigerung von Evolutionären Algorithmen gearbeitet. Vielversprechende neuere Ansätze werden unter anderem in /HAF98/ beschrieben.

Der einfachste Fall ist ein mehrfaches Durchlaufen des Evolutionären Algorithmus, um mehrere lokale Optima zu finden und das beste davon als Ergebnis zu betrachten. Dies kann auch direkt als „Meteoreinschlag“ in den Algorithmus eingebaut werden, indem nach einer gewissen Entwicklungszeit die bestehende Population vernichtet und eine vollkommen neue Startpopulation erzeugt wird.

Inselmodelle gehen sogar noch einen Schritt weiter: Sie simulieren mehrere „Inseln“ mit voneinander getrennten Populationen, auf denen je ein eigener Evolutionärer Algorithmus arbeitet. Zwischendurch erfolgt sporadisch eine Migration der Individuen zwischen diesen Populationen, einigen Individuen gelingt also eine „Überfahrt“. Dadurch wird einer Stagnation der Suche in lokalen Optima vorgebeugt, da auf den verschiedenen Inseln wahrscheinlich unterschiedliche Optima gefunden werden, und durch die Migration jede Population wieder mit neuen Suchpunkten angereichert wird. Allerdings bedeutet die Implementierung eines Inselmodells eine deutliche Verlängerung der Rechenzeit, da mehrere Evolutionäre Algorithmen parallel ablaufen müssen. Die zu erwartende Rechenzeit von mehreren Wochen ist für die industrielle Anwendung nicht tauglich.

Eine deutliche Verkürzung der Rechenzeit ist durch Parallelisierung zu erwarten. Evolutionäre Algorithmen profitieren stark von Parallel-Rechenanlagen. Der hohe Rechenaufwand, der vor allem aus den vielen erforderlichen Fitnessbewertungen resultiert, kann leicht auf mehrere Rechner bzw. Prozessoren verteilt werden. Dazu werden im Extremfall alle Individuen einer Generation parallel bewertet, so dass der Rechenaufwand fast um den Faktor der Populationsgröße sinken kann. Da jedoch in der Praxis beim Reinigungsanlagenhersteller kaum Cluster aus bis zu 60 Computern vorhanden sind, wurde auch dieser Ansatz hier nicht weiter verfolgt.

Dass die Evolutionäre Optimierung für industrielle Bauteilreinigungsanlagen ein vielversprechender Ansatz ist, konnte jedoch in diesem Kapitel eindeutig gezeigt werden.

7 Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Auswahl und optimalen Auslegung industrieller Bauteilreinigungsanlagen. Hier benötigen sowohl Anwender (bei der Auswahl) als auch Anbieter der Reinigungsbranche (bei der Optimierung) Hilfestellung.

Zur Unterstützung des Anwenders bei der Auswahl einer Reinigungsanlage, welche sein definiertes Reinigungsproblem technisch hinreichend und dazu möglichst wirtschaftlich lösen kann, wurde eine internetbasierte Lösungsdatenbank für Reinigungsanlagen entwickelt (s. Kapitel 4). Hier können Anbieter der Reinigungsbranche die von ihnen angebotenen Reinigungsanlagen und Reinigungsmittel selber in einen geschützten Datenbankbereich eintragen.

Die Datenstruktur wurde dabei derart gestaltet, dass aufgrund der eingegebenen Daten sowohl eine technische als auch eine wirtschaftliche Bewertung der Anlagen erfolgen kann. Das Bewertungsverfahren wurde von der technisch-wirtschaftlichen Bewertung nach VDI 2225 abgeleitet.

Dabei basiert die technische Bewertung auf einer in /KLO03/ vorgeschlagenen Anforderungsliste für Reinigungsanlagen, wobei die Anbieter der Anlagen hier selber als Experten auftreten und ihre Produkte in den verschiedenen Kategorien bewerten. Das Bewertungsverfahren basiert auf dem System „+“, „0“, „-“. Diese Kurzzeichen stehen für „gut geeignet“, „bedingt geeignet“ und „ungeeignet“. Mit diesen Anbieterangaben kann das Auswahlssystem eine automatische technische Bewertung der in der Datenbank vorhandenen Anlagen im Hinblick auf ihre Eignung für in einem Onlinefragebogen spezifizierte Reinigungsprobleme vornehmen.

Die wirtschaftliche Bewertung einer Reinigungsanlage kann nur im Zusammenhang mit einer konkreten Reinigungsaufgabe erfolgen. Daher wurden in die Datenstruktur auch Beispiele für auf der jeweiligen Anlage gereinigte Teile aufgenommen. An diesen kann eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgen. Dabei werden die gesamten Lebenslaufkosten einer Anlage für das jeweilige Reinigungsbeispiel bilanziert. Eine Vergleichbarkeit der Anlagen wird geschaffen, indem die Lebenslaufkosten auf die Oberfläche der gereinigten Bauteile bezogen werden. Dazu wurden charakteristische Bauteilformen definiert, welche eine Klassifizierung der Bauteile und darauf basierend eine abgeschätzte Umrechnung zwischen Oberfläche und Volumen ermöglichen.

Für die Datenbank wurde eine komfortable Benutzeroberfläche erstellt, welche sowohl die Dateneintragung (Anbieterseite) als auch die Verwendung der Datenbank (Anwenderseite mit Auswahlssystem und gezielter Durchsuchung) über das Internet ermöglicht. Die Administration der Datenbank erfolgt ebenfalls internetbasiert über einen geschützten Administratorbereich. Das erstellte System wurde mit Hilfe einer neuen Portalseite in das Fachinformationssystem integriert, welches unter der Internetadresse www.bauteilreinigung.de/NN04/ zugänglich ist.

Das Ergebnis, welches der Anwender bei der Arbeit mit der Datenbank erhält, ist eine Auflistung von Anbietern, Anlagen, Reinigungsbeispielen oder Reinigungsmitteln. Meist sind es für die Lösung seines Reinigungsproblems gut geeignete Anlagen, welche durch das automatische Auswahlssystem ermittelt wurden. Der nächste Schritt sollte nun immer die Kontaktaufnahme zu den entsprechenden Anbietern sein, welche die weitere Vorgehensweise festlegen, indem sie eine auf das konkrete Problem optimal zugeschnittene Anlage auslegen.

Dabei benötigt ein Anbieter neben seinem Expertenwissen in den allermeisten Fällen umfangreiche, aufwändige Vorversuche, um eine möglichst wirtschaftliche Lösung zu finden, welche die technische Forderung der hinreichenden Bauteilreinheit erfüllt. Abhilfe kann hier das in Kapitel 5 entwickelte Simulationssystem für industrielle Bauteilreinigungsanlagen in Verbindung mit der in Kapitel 6 vorgestellten automatischen Optimierung mit Hilfe Evolutionärer Algorithmen schaffen.

Aufgrund der großen Vielfalt der in der Praxis eingesetzten Reinigungsverfahren musste bei der Entwicklung des Simulationssystems zunächst die Beschränkung auf ein gängiges Verfahren erfolgen, um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen. Wegen des großen Marktanteils wurde hier die Tauchreinigung gewählt. Der Simulator wurde jedoch modular und flexibel aufgebaut, so dass eine Erweiterung um andere Reinigungsverfahren jederzeit möglich ist.

Um eine Verteilung über das Internet zu ermöglichen, wurde als Simulationsansatz die Eigenentwicklung in der plattformunabhängigen Programmiersprache Java gewählt. Die Modellierung des in einer Reinigungsanlage ablaufenden Tauchreinigungsprozesses erfolgt mit Hilfe von Modulen für Tauchbecken, Spülbecken, Warmlufttrockeneinrichtungen, Reinigerquellen, Abwassersenkens und Aufbereitungseinrichtungen, welche zu dem Gesamtprozess verschaltet werden können. Die Datenstruktur und die Funktionalität der Module ist dabei in Objektklassen hinterlegt.

Vor allem bei der Abschätzung der Reinigungsleistung in einem Tauchbecken bei definierten Parametereinstellungen mussten einige Annahmen getroffen werden, da Daten aus Reinigungsversuchen in der Literatur nicht zu finden sind und die Aufnahme solcher Daten aufgrund der Vielzahl der möglichen Parameterkombinationen sehr aufwändig ist. Somit kann das hier erstellte Simulationssystem lediglich als erster Ansatz verstanden werden, welcher die Grundlage für umfangreiche weitere Forschungen bildet. Dabei ermöglicht der offene, objektorientierte Aufbau des Simulationssystems die flexible Integration neuer Erkenntnisse, die beispielsweise mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung gewonnen werden können.

Das Simulationssystem wurde mit einer graphischen Benutzeroberfläche versehen, welche sowohl eine einfache Modellierung verschiedener Reinigungsprozesse inklusive der Definition der zu reinigenden Bauteilcharge als auch die übersichtliche Darstellung der Simulationsergebnisse ermöglicht.

Als Ergebnis liefert die Simulation die von der simulierten Reinigungsanlage erreichte Bauteilreinheit als Restverschmutzung pro Bauteilcharge. Weiterhin werden unter Einbeziehung der simulierten Verbräuche die Reinigungskosten pro Bauteilcharge ermittelt, welche es zu minimieren gilt, ohne dabei die maximal zulässige Restverschmutzung zu überschreiten.

Die Verifikation des Simulationssystems erfolgte anhand von Spülprozessen, indem theoretisch berechnete Spülkriterien mit den bei der Simulation ermittelten verglichen wurden. Es wurde eine gute Übereinstimmung erzielt. Dabei wurde der Einfluss der Konzentrationschwankungen beobachtet, welche sich vor allem bei kleinen Becken auf das Spülkriterium auswirken.

Ein beispielhafter Simulationslauf wurde mit einer Bauteilcharge aus Zahnrädern durchgeführt, welche in einer Reinigungsanlage mit drei Tauchreinigungs- und zwei Spülstufen gereinigt werden. Das Ergebnis dient als Grundlage für die Optimierung mit Hilfe Evolutionärer Algorithmen.

Dementsprechend wurde als Codierung für den Evolutionären Algorithmus ein Reinigungsprozess mit einer Reinigungskaskade, einer Spülkaskade und einer anschließenden Warmlufttrocknung gewählt. Die Anzahl der Reinigungs- und der Spülbäder ist dabei beliebig und gehört zu den strukturalen Parametern. Deskriptive Parameter sind unter Anderem Beckentemperaturen, Solltemperaturen, Ultraschalleistungsdichten usw.

Der Evolutionäre Algorithmus wurde zunächst in einer Grundversion entwickelt. Die Evolutionsoperatoren, wie Selektion, Mutation, Rekombination und Fitnessbewertung wurde dann in einer eigenen Objektklasse „Prozess“ implementiert, so dass auch hier ein flexibler modularer Aufbau vorliegt. Die Fitnessbewertung basiert auf den Reinigungskosten pro Bauteilcharge, die es zu minimieren gilt. Die Nebenbedingungen der mindestens einzuhaltenden Bauteilreinheit und eines mindestens zu erreichenden Spülkriteriums werden durch Straffunktionen berücksichtigt.

Mit Hilfe des entwickelten Evolutionären Algorithmus konnten in mehreren Testläufen sehr gute Reinigungsprozesse gefunden werden, welche die durch den initialen Simulationslauf geforderte Bauteilreinheit erreichen und dabei die Reinigungskosten deutlich unterschreiten. Die benötigte Rechenzeit von mehreren Stunden bis einigen Tagen pro Durchlauf ist dabei gerade noch tolerierbar. In Zukunft ist hier mit Verbesserungen zu rechnen. Somit konnte gezeigt werden, dass die Simulation und evolutionäre Optimierung von Bauteilreinigungsanlagen ein vielversprechender Ansatz ist, der dabei helfen kann, die bis heute benötigten umfangreichen Vorversuche bei der Auslegung von Bauteilreinigungsanlagen zu minimieren.

Insgesamt konnte im Rahmen dieser Arbeit ein Beitrag zur rechnerbasierten Unterstützung der Auswahl und optimalen Auslegung industrieller Bauteilreinigungsanlagen geleistet werden.

8 Literaturverzeichnis

- /BAU01/ Baumgärtner, U.: Feinreinigung verschiedener Metalle – Praktische Beispiele für wässrige Reinigungsprozesse; Metalloberfläche, Jahrgang 55, Heft 3 2001
- /BFB01/ Bäßler, C., Fischwasser, K., Brzezinski, U., Thürk, J., Wittwer, R.: Phosphatierstraße umweltgerecht umgerüstet – Praxiserfahrungen mit einer stoffverlustminimierten Prozesstechnik; Metalloberfläche, Jahrgang 55, Heft 1 2001
- /BIS90/ N. N.: 2. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Emissionsbegrenzung von leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen – 2.BImSchV) 1990
- /BIS01/ N. N.: 31. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen - 31.BImSchV) 2001
- /BOS94/ Bossel, H.: Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme; Vieweg, 2. Auflage, Braunschweig, Wiesbaden 1994
- /BRA98/ Brand, F.: Evolutionsstrategischer Entwurf komplexer optischer Systeme; Diss. TU Berlin, Fachbereich 6 Verfahrenstechnik, Umwelttechnik, Werkstoffwissenschaften, Berlin 1998
- /CLA96/ Claus, T.: Objektorientierte Simulation und Genetische Algorithmen zur Produktionsplanung und –steuerung; Peter Lang GmbH, Europäischer Verlag der Wissenschaften, Frankfurt am Main 1996
- /CLE93/ N. N.: Modelldokumentation zum Projekt CLEANER: Simulation CKW-freier Reinigungsanlagen; Lehrstuhl für Operations Research und Systemtheorie, Universität Passau 1993
- /CLE04/ N. N.: EU-Projekt der Kooperationsstelle Hamburg mit vier weiteren europäischen Kooperationspartnern zur Erstellung der Online-Datenbank CLEANTOOL; Internetadresse <http://www.cleantool.org/> 2004
- /CTC03/ N. N.: Aqueous Cleaning: The Sum Of its Parts; CleanTech magazine 11-12/03, Artikel online veröffentlicht unter www.cleantechcentral.com 2003
- /DAR67/ Darwin, Ch.: Die Entstehung der Arten; Verlag Philipp Reclam Jun., Stuttgart 1967
- /DAM97/ Dasgupta, D., Michalewicz, Z. (Hrsg.): Evolutionary Algorithms in Engineering Applications; Springer-Verlag, 1. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York 1997
- /DGO89/ N. N.: Richtlinien vom DGO-Arbeitskreis „Reinigen“: Planung, Beschaffung und Betrieb von Oberflächenanlagen – Wässrige Systeme Teil 1 und 2; Galvanotechnik 80 Nr. 7 und 8 1989

- /DGO92/ N. N.: Reinigen: Verfahrenskonzepte nach dem Stand der Technik, Teil 1 und 2, Bearbeitet vom DGO-Fachausschuß „Reinigen“; Metalloberfläche, Jahrgang 46, Heft 8 und 11 1992
- /DIN94/ Norm DIN 50902: Schichten für den Korrosionsschutz von Metallen; Begriffe, Verfahren und Oberflächenvorbereitung, Juli 1994
- /DIN03a/ Norm DIN 8580: Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung, September 2003
- /DIN03b/ Norm DIN 8592: Fertigungsverfahren Reinigen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, September 2003
- /DRE03/ N. N.: Reinigungsanlagen für Drehteile; Schwerpunktthema in Drehteil + Drehmaschine, 15. Jahrgang, Juli/August 2003
- /EG98/ N. N.: Richtlinie 98/37/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Juni 1998 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für Maschinen 1999
- /EG99/ N. N.: EG-Richtlinie Nr. 1999/13EG über die Begrenzung von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC-Richtlinie) 1999
- /EHR03/ Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung; Carl Hanser Verlag, 2. Auflage, München, Wien 2003
- /EKL03/ Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung; Springer-Verlag, 4. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York 2003
- /EN95/ Norm DIN EN 1829 (Entwurf): Hochdruckreiniger, Hochdruckwasserstrahlmaschinen – Sicherheitstechnische Anforderungen, Juni 1995
- /EN97/ Norm DIN EN 12921: Maschinen zur Oberflächenreinigung und –vorbehandlung mittels Flüssigkeiten oder Dampfphasen; Teil 1: Allgemeine Sicherheitsanforderungen, September 1997
- /EN00/ Norm DIN EN 292 (Entwurf): Sicherheit von Maschinen – Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsgrundsätze, Juni 2000 (geplanter Übergang in EN ISO 12100)
- /EN02/ Norm DIN EN 1248: Gießereimaschinen – Sicherheitsanforderungen für Strahlanlagen, April 2002
- /ERN03/ Ernst, Ch.: Standardisierung der Sauberkeitsanalytik; Vortrag auf der Fachmesse Parts2Clean in Friedrichshafen, 28.10.2003
- /GAN98/ Ganster, K.: Entwicklung eines Programms zur Unterstützung der Konstruktion durch genetische Algorithmen; Diplomarbeit am Fachgebiet Maschinenelemente der Universität Dortmund 1998, unveröffentlicht
- /GOL02/ Goller, H.: Das LAMP Buch: Webserver mit Linux, Apache, MySQL und PHP; SuSE-Press, Nürnberg 2002

- /GRS00/ Gröniger, H.-B., Schaal, U.: Effektive Trocknung mit Umluft im Vakuum; JOT – Journal für Oberflächentechnik, Band 40, Heft 12 2000
- /GRU99/ Grün, R.: Reinigen und Vorbehandeln – Stand und Perspektiven; Galvanotechnik 90 Nr. 7 1999
- /HAF98/ Hafner, S. (Hrsg.): Industrielle Anwendungen Evolutionärer Algorithmen; Oldenbourg Verlag, München, Wien 1998
- /HAS96/ Hasler, J.: Wirtschaftliche Spülprozesse; Metalloberfläche, Jahrgang 50, Heft 10 1996
- /HAT94/ Hater, W.: Standzeitverlängerung wässriger Lösungen durch Badpflege; Metalloberfläche, Jahrgang 48, Heft 10 1994
- /HBG96/ Haase, B., Brunn, K., Grün, R., Hasler, J., Kunz, U., Stedry, B.: Bauteilreinigung – Alternativen zum Einsatz von Halogenkohlenwasserstoffen – Reinigungsmittel, Reinigungsmechanismen und Reinigungsanlagen; expert-Verlag, Renningen-Malmsheim 1996
- /HEI97/ Heimlich, B.: Sauber und „Fein“ – Der Elektrowerzeughersteller setzt bei der Teilereinigung auf modernste Lösemitteltechnologie; Metalloberfläche, Jahrgang 51, Heft 1 1997
- /HER00/ Hertlein, K.: Reinigen mit Kohlenwasserstoff-Lösemitteln und Wasser im metallverarbeitenden Gewerbe, im Druck- und Elektronikbereich; expert-Verlag, Renningen-Malmsheim 2000
- /HOL00/ Holberg, Eberhard: Ultraschall-Reinigung vor dem PCD-Beschichten – Wendeschneidplatten mit hohem Durchsatz reinigen; Metalloberfläche, Jahrgang 54, Heft 3 2000
- /IHB96/ Irretier, O., Haase, B., Bauckhage, K.: Optimierung der Bauteilreinigung – Verbesserung der Reinigungsergebnisse mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung, Teil 1 und 2; Metalloberfläche, Jahrgang 50, Heft 7 und 8 1996
- /JEL99/ Jelinek, T. W. (Hrsg.): Reinigen und Entfetten in der Metallindustrie; Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau/Württ. 1999
- /KAN01/ Kanegsberg, B., Kanegsberg, E.: Handbook für Critical Cleaning; CRC Press LLC, Boca Raton, London, New York, Washington D. C. 2001
- /KAZ94/ Kampe, G., Zeitz, M. (Hrsg.): Fortschritte in der Simulationstechnik, Band 9; Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, Wiesbaden 1994
- /KKL01/ Künne, B., Kloke, U.: Reinigen von Kleinstteilen – eine anspruchsvolle Aufgabe; JOT – Journal für Oberflächentechnik, Band 41, Heft 5 2001
- /KLO03/ Kloke, U.: Auslegung von Bauteilreinigungsanlagen mit Hilfe eines Fachinformationssystems; Diss. Universität Dortmund, Fachgebiet Maschinenelemente 2003

- /KOC99/ Koch, H.: Reinigen vor dem Vakuumbeschichten; Metalloberfläche, Jahrgang 53, Heft 6 1999
- /KRE98/ Kreisel, G. (Arbeitsgruppenleiter): Abschlussbericht zum BMBF-Projekt „Ganzheitliche Bilanzierung/Bewertung von Reinigungs-/Vorbehandlungstechnologien in der Oberflächenbehandlung“; Institut für Technische Chemie der Friedrich-Schiller-Universität Jena in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung und der Deutschen Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e. V. 1998
- /KRE03/ Krems, Burkhardt: Wirtschaftlichkeit, Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen; Beitrag im Online-Verwaltungslexikon olev.de, Version 1.1
- /KRU02/ Krüger, G.: Handbuch der Java-Programmierung; Addison Wesley Verlag, 3. Auflage, München, Boston, San Francisco, Harlow, Don Mills, Ontario, Sydney, Mexico City, Madrid, Amsterdam 2002
- /KUE01/ Künne, B.: Einführung in die Maschinenelemente – Gestaltung – Berechnung – Konstruktion; Verlag B. G. Teubner, 2. Auflage, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden 2001
- /KUE02/ Künne, B.: Kostenbewusstes Konstruieren; Unterlagen zum Seminar im Haus der Technik e. V., Essen 2002
- /KUE03/ Künne, B.: Köhler/Rögnitz – Maschinenteile 1; Verlag B. G. Teubner, 9. Auflage, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden 2003
- /KWU03/ Künne, B., Wullstein, M.: Informationssystem für die Bauteilreinigung – Phase zwei; JOT – Journal für Oberflächentechnik, Band 43, Heft 7 2003
- /LAK94/ Lachenmeyer, U., von Krempelhuber, H.: Industrielle Teilereinigung: Auswahl und Bewertung von Verfahrenskonzepten mit der statistischen Versuchsmethodik; Metalloberfläche, Jahrgang 48, Heft 5 1994
- /LAK95/ Lachenmeyer, U., von Krempelhuber, H.: Industrielle Teilereinigung: Qualität, Kosten und Umweltschutz; Metalloberfläche, Jahrgang 49, Heft 5 1995
- /LES98/ Leudolph, J., Sommer, H.-J.: Grundsätzliches zur wässrigen Teilereinigung; JOT – Journal für Oberflächentechnik, Band 38, Heft 4 1998
- /LIE96/ Lienig, J.: Anwendung evolutionärer Algorithmen für den rechnergestützten Entwurf des Schaltungslayouts; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 228; VDI Verlag Düsseldorf 1996
- /LUH99/ Luhede, J.: Zur Reinigung von metallischen Bauteilen mit Kohlenwasserstoff-Lösemitteln und Wasser; Diss. Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik, Bremen 1999
- /MIN91/ Minkwitz, D.: Ersatzstoffe für Halogenkohlenwasserstoffe bei der Entfettung und Reinigung in industriellen Prozessen; Wirtschaftsverlag NW – Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven 1991

- /MUE86/ Müller, K.-D.: Optimieren mit der Evolutionsstrategie in der Industrie anhand von Beispielen; Diss. TU Berlin, Fachbereich 10 Verfahrenstechnik, Berlin 1986
- /NIS97/ Nissen, V.: Einführung in Evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution; Verlag Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden 1997
- /NN03/ N. N.: Steigende Reinheitsanforderungen am Beispiel der Automobilindustrie; Vortragsreihe auf der Fachmesse Parts2Clean in Friedrichshafen, 28.10.2003
- /NN04/ N. N.: www.bauteilreinigung.de - Informations- und Auswahlsystem zur industriellen Teilereinigung; Internetseite <http://www.bauteilreinigung.de>, Fachgebiet Maschinenelemente, Universität Dortmund 2004
- /PAB97/ Pahl, G., Beitz, W.: Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung; Springer-Verlag, 4. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York 1997
- /PAP96/ Papageorgiou, M.: Optimierung - Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung; Oldenbourg-Verlag, 2. Auflage, München, Wien 1996
- /PAR00/ Parmee, I. C. (Hrsg.): Evolutionary Design and Manufacture, Selected Papers from ACDM '00; Springer-Verlag, 1. Auflage, London, Berlin, Heidelberg 2000
- /PET97/ Peterson, D. S.: Practical guide to industrial metal cleaning; Hanser Gardner Publications, Cincinnati OH 1997
- /PET98/ Petzold, T.: Ein Beitrag zur Entwurfsoptimierung ebener Fachwerke mit Evolutionsstrategien; Diss. Uni Stuttgart, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Stuttgart 1998
- /PMA04/ N. N.: The phpMyAdmin project; Internetseite www.phpmyadmin.net 2004
- /QUK95/ Quaß, D., Kerney, U.: Entfettungsbäder kontinuierlich aufbereiten - Betriebliche Erfahrungen in einer Feuerverzinkerei - Teil 1 und 2; Metalloberfläche, Jahrgang 49, Heft 7 und 8 1995
- /POH00/ Pohlheim, H.: Evolutionäre Algorithmen: Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2000
- /REC73/ Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie; Friedrich Frommann Verlag, Stuttgart-Bad Cannstatt 1973
- /REC94/ Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie '94; Friedrich Frommann Verlag, Stuttgart-Bad Cannstatt 1994
- /SAG04/ N. N.: SAGE – Solvent Alternatives Guide; Internetadresse <http://clean.rti.org/> 2004
- /SCH94/ Schmidt, K.-J.: Reinigen mit wässrigen Medien: Bad-Standzeiten verlängern; Metalloberfläche, Jahrgang 48, Heft 4 1994

- /SCH95/ Schuler, H. (Hrsg.): Prozeßsimulation; VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1. Auflage, Weinheim, New York, Basel, Cambridge 1995
- /SCH00/ Schneider, Roy: Reinigung von Metallteilen – Optimierte Reinigungsergebnisse und einfache Handhabung; Metalloberfläche, Jahrgang 54, Heft 6 2000
- /SKH99/ Striegel, G., Kreisel, G., Hoffmann, E., Grün, R.: Ganzheitliche Bilanzierung von Verfahren der industriellen Teilereinigung; JOT – Journal für Oberflächentechnik, Jahrgang 39, Heft 3 1999
- /SWE75/ Schwefel, H-P.: Evolutionsstrategie und numerische Optimierung; Diss. TU Berlin, Fachbereich 10 Verfahrenstechnik, Berlin 1975
- /SWE95/ Schwefel, H.-P.: Evolution and Optimum Seeking; Verlag John Wiley & Sons, 1. Auflage, New York 1995
- /STA94/ Stache, U.: Untersuchung der Eignung von Genetischen Algorithmen zur simultanen Termin- und Kapazitätsplanung; Diss. Uni Dortmund 1994
- /TRI97/ Trint, K.: Strukturoptimierung mit geschachtelten Evolutionsstrategien; Diss. TU Berlin, Fachbereich Verfahrenstechnik, Umwelttechnik, Werkstoffwissenschaften, Fachgebiet Bionik & Evolutionstechnik, Berlin 1997
- /ULL03/ Ullenbohm, C.: Java ist auch eine Insel - Programmieren für die Java 2 - Plattform in der Version 1.4; Galileo Press GmbH, 3. Auflage, Bonn 2003
- /UNR96/ Unruh, J.: Fähige Spülprozesse – Spülqualität gemäß ISO 9000; Metalloberfläche, Jahrgang 50, Heft 6 1996
- /UTE97/ Utecht, U.: Design neuronaler Netze mit der Evolutionsstrategie; Diss. TU Berlin, Fachbereich Verfahrenstechnik, Umwelttechnik, Werkstoffwissenschaften, Fachgebiet Bionik & Evolutionstechnik, Berlin 1997
- /VDI87/ N. N.: VDI 2235: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren; Methoden und Hilfen, Oktober 1987
- /VDI90/ N. N.: VDI 2234: Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur, Januar 1990
- /VDI97a/ N. N.: VDI 2225 Blatt 1: Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Vereinfachte Kostenermittlung, November 1997
- /VDI97b/ N. N.: VDI 2225 Blatt 4: Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Bemessungslehre, November 1997
- /VDI98a/ N. N.: VDI 2225 Blatt 2: Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Tabellenwerk, Juli 1998
- /VDI98b/ N. N.: VDI 2225 Blatt 3: Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung, November 1998

- /VDI00/ VDI Berichte 1526: Computational Intelligence im industriellen Einsatz: Fuzzy Systeme, Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Data Mining; VDI Verlag, Düsseldorf 2000
- /VDI03/ N. N.: VDI/VDE 3550 Blatt 3: Computational Intelligence - Evolutionäre Algorithmen - Begriffe und Definitionen, Februar 2003
- /VER99/ Verheyen, K., Ekstrand, B., Wolf, K., Morris, M., Pease, R., Quitmeyer, J., Fuchs, J.: Conversion Case Study: Astropak Switches to Aqueous; CleanTech magazine 11/1999, Artikel online veröffentlicht unter www.cleantechcentral.com 1999
- /WEG99/ Wegner, B.: Autogenetische Konstruktionstheorie – Ein Beitrag für eine erweiterte Konstruktionstheorie auf der Basis Evolutionärer Algorithmen; Diss. Uni Magdeburg, Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, Magdeburg 1999
- /WIN95/ Winkler, L.: Spülen - Qualitätssicherung und Umweltschutz, Spülen als prozessfähiger Fertigungsschritt, Teil 1 - 10; Galvanotechnik 85, Heft 9 – 12 1994 und Galvanotechnik 86, Heft 3 – 5, 9, 11 und 12 1995
- /WOE02/ Wöhe, G.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre; 21. Auflage, Vahlen Verlag, München 2002
- /WOL96/ Wolf, H. G.: Evolutionäre Algorithmen für den automatischen Layout-Entwurf analoger Transistor-Array-Schaltungen; Diss. Universität Karlsruhe, Institut für Theoretische Elektrotechnik und Meßtechnik, Karlsruhe 1996
- /YRK00/ Yarger, R. J., Reese, G., King, T.: MySQL & mSQL; O'Reilly Verlag, Beijing, Cambridge, Farnham, Köln, Paris, Sebastopol, Taipei, Tokyo 2000

Verwendete Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Oberfläche pro Bauteil
a_i		anwendungsfallspezifischer Berechnungsparameter
b		anwendungsfallspezifischer Berechnungsparameter
b_B	m	Breite eines Bauteils
β		Zuschlagsfaktor, bei der Kalkulationsabteilung zu erfragen
c_{0_Ws}		Wirkstoffkonzentration in der verschleppten Flüssigkeit vor dem Spülen
c_{max}		Sättigungskonzentration des Reinigers
c_n		Schmutzkonzentration im Becken
$c_n(t)$		Schmutzkonzentration des Reinigers im Bad
$c_{n+1}(t)$		Schmutzkonzentration des Reinigers aus dem Bad der nächsten Kaskadenstufe
$\dot{c}_n(t)$	s^{-1}	zeitliche Änderung der Schmutzkonzentration des Reinigers im n -ten Bad
c_{p_Baut}	kJ/kgK	spez. Wärmekapazität der Bauteile
c_{p_Fl}	kJ/kgK	spez. Wärmekapazität der Flüssigkeit
c_{n_Ws}		Wirkstoffkonzentration in der verschleppten Flüssigkeit nach dem Spülen (im letzten Spülbecken)
$d(Z_{Ki})$		Teiledurchsatz pro für die i -te Kostenart eingegebener Zeiteinheit
D_T	E_T/Z_T	Teiledurchsatz
E_{10Ch_M}	kJ	Energieverbrauch für das jeweilige Modul bei Reinigung von zehn Chargen
E_T		Einheit der gereinigten Teile (Stück/kg/Liter/ m^2)
f_{Az}		Anteil der für die Anlagenbedienung aufgewendeten Arbeitszeit an der Gesamtarbeitszeit
f_P		Fitness des simulierten Reinigungsprozesses
f_{Schm}		Fitness des simulierten Reinigungsprozesses unter Berücksichtigung des Restschmutzes
g_i		Gewichtung des i -ten Kriteriums
H	€	Herstellkosten des Produkts
h_B	m	Höhe eines Bauteils
H_i	€	ideale Herstellkosten
h_{v_Fl}	kJ/kg	Verdampfungsenthalpie der Flüssigkeit
H_{zul}	€	zulässige Herstellkosten des Produkts
i		Index der betrachteten Kostenart
K_{A_Ch}	€	Anlagenabschreibung pro Charge
K_{AB_Ch}	€	Personalkosten pro Charge
K_{AE_Ch}	€	Abfall- und Abwasserentsorgungskosten pro Charge
k_{Ai}	$\text{€}/l$	Kostensatz für den aus der Senke/Aufbereitungseinrichtung zu entsorgenden Abfall
K_{Ch}	€	Reinigungskosten pro Charge
k_E	$\text{€}/kWh$	Energiekostensatz

Symbol	Einheit	Bedeutung
K_{E_Ch}	€	Energiekosten pro Charge
K_{ges_n}	s^{-1}	Zusammenfassung von Konstanten ($K_{ges_n} = K_{Temperatur} \cdot T_n \cdot K_{Reiniger}$)
K_{L_Ab}	€	Investitionskosten für die Aufbereitungseinrichtung
K_{L_B}	€	Investitionskosten für das Tauch- oder Spülbecken
K_{L_M}	€	Investitionskosten für das jeweilige Modul
K_{L_Q}	€	Investitionskosten für die Quelle
K_{L_Wt}	€	Investitionskosten für die Warmlufttrockeneinrichtung
K_{Ki}	€	Kostensatz der i -ten Kostenart
K_L	€	Lebenslaufkosten
$\bar{K}_{L,id}$	€	geringste gemittelte Lebenslaufkosten aller Anlagen der Datenbank
K_{Li}	€	Lebenslaufkosten des i -ten auf der Anlage gereinigten Beispielteils
K_{R_Ch}	€	Reiniger- und Frischwasserkosten pro Charge
$K_{Reiniger}$	s^{-1}	Reinigerkonstante
k_{Ri}	€/l	Kostensatz für den von der Quelle/Aufbereitungseinrichtung gelieferten Frischreiniger
k_S	€/h	Personalkostensatz inkl. Lohnnebenkosten
K_{SR}		Sättigungskonstante des Reinigers
$K_{Temperatur}$	K^{-1}	Temperaturkonstante
K_{W_Ch}	€	Wartungskosten pro Charge
K_{Z_Ch}	€	kalkulatorische Zinsen pro Charge
l_B	m	Länge eines Bauteils
λ_B		Badbelastungsfaktor
λ_R		Reinigerfaktor
λ_T		Temperaturfaktor
λ_{US}		Ultraschallfaktor
M_{Ki}		Mengenverbrauch der i -ten Kostenart
n_{Krit}		Gesamtanzahl der Kriterien
n_{KA}		Gesamtanzahl der eingegebenen Kostenarten (bis zu 15)
n_{Bsp}		Anzahl der zu der Anlage angegebenen Beispielteile
n_{Ch_J}	a^{-1}	Anzahl der Bauteilchargen pro Jahr nach Gleichung (5.24)
P_A	W	Aufbereitungsleistung
P_H	W	Heizleistung
p_i		Punktbewertung des i -ten Kriteriums
P_{Kl}	W	Klärleistung
P_M	€	Marktpreis der bewerteten Anlage
$P_{M,id}$	€	Marktpreis der gemäß Marktübersicht günstigsten Anlage
$P_{M,min}$	€	niedrigster ermittelter Marktpreis aller Konkurrenzprodukte
p_{max}		Maximale Punktbewertung je Kriterium

Symbol	Einheit	Bedeutung
P_R		Reinigungsleistung (Anteil am gesamten an den Bauteilen anhaftenden Schmutz der betrachteten Art)
P_T	W	Trockenleistung
P_{Tr}	kW	installierte Trockenleistung der Trocknungsstufe
P_{Tr_soll}	kW	Solltrockenleistung für vollständige Trocknung
P_{US}	W/l	Ultraschalleistungsdichte
R		Spülkriterium
R_{sim}		Spülkriterium, vom Simulator ermittelt
R_{zul}		minimal erforderliches Spülkriterium
ρ	kg/l	Dichte des Bauteilwerkstoffes
ρ_{Baut}	kg/l	Dichte der Bauteile
ρ_{Fl}	kg/l	Dichte der Flüssigkeit
s		Stundenfaktor
$s(Z_{Ki})$		Stundenfaktor der für die i -te Kostenart eingegebenen Zeiteinheit
$s(Z_T)$		Stundenfaktor für den Teiledurchsatz eingegebenen Zeiteinheit
S_B		Anzahl Betriebsstunden der Anlage pro Tag
S_{sim}	ml	Restverschmutzung pro Bauteilcharge, vom Simulator ermittelt
S_{zul}	ml	maximal zulässige Restverschmutzung pro Bauteilcharge
t	s	betrachteter Zeitschritt
T	°C	Badtemperatur
T_{0_Baut}	°C	Ausgangstemperatur der Bauteile
T_{0_Fl}	°C	Ausgangstemperatur der Flüssigkeit
t_A	a	Abschreibungszeitraum in Jahren
T_B		Anzahl Betriebstage der Anlage pro Monat
T_n	°C	Temperatur des n -ten Bades
t_S	s	Zeitschritt der Simulation
T_{s_Fl}	°C	Siedetemperatur der Flüssigkeit
t_T	s	Chargentaktzeit
V	m ³	Volumen pro Bauteil
V_{0_Fl}	l	Ausgangsvolumen der Flüssigkeit
\dot{V}_A	l/s	Volumenstrom der Aufbereitungseinrichtung
V_{Ai}	l	Volumen des zu entsorgenden Abfalls der betrachteten Senke bzw. Aufbereitungseinrichtung
V_B	l	Beckenvolumen
V_{Baut}	l	Volumen der Bauteile
V_{Becken_n}	m ³	Volumen des n -ten Reinigungsbeckens
$\dot{V}_{Reiniger}$	m ³ /s	Volumenstrom des Reinigers, der durch die Kaskade strömt
V_{Ri}	l	Volumen des von der Aufbereitung für zehn Chargen benötigten Frischreinigers

Symbol	Einheit	Bedeutung
\dot{V}_{Ri}	l/s	Volumenstrom der betrachteten Quelle
\dot{V}_S	l/h	Volumenstrom der Spülflüssigkeit
$V_{\text{Schmutz}_n(t)}$	m ³	Volumen des noch auf dem Bauteil befindlichen Schmutzes
$\dot{V}_{\text{Schmutz}_n(t)}$	m ³ /s	Volumenstrom des vom Bauteil in Bad n abgelösten Schmutzes
\dot{V}_Q	l/s	Volumenstrom der Quelle
V_{Tr}	l	Volumen der pro Zeitschritt getrockneten Flüssigkeit
\dot{V}_V	l/h	Volumenstrom der mit einer Bauteilcharge verschleppten Flüssigkeit
W_{Baut}	kJ	Energiemenge für die Erwärmung der Bauteile
W_{Fl}	kJ	Energiemenge für die Erhitzung und Verdampfung der Flüssigkeit
W_{I_M}	€	Wartungskosten für das jeweilige Modul
W_{Kl}		Klärwirkung (Anteil am gesamten im Tank vorhandenen Schmutz der betrachteten Art)
x		technische Wertigkeit
x_1	s	Reinigungszeit
x_2		Anzahl der Spülstufen
x_3		Badbelastung (KSS) 1. Spülbecken
x_4		mechanische Reinigungsunterstützung
x_5		Reinigersystem
x_6		Reinigerkonzentration
x_7		Badbelastung (KSS) Reinigungsbad
x_8		Badtemperatur
x_g		technische Wertigkeit, gewichtet
y		wirtschaftliche Wertigkeit der betrachteten Anlage
y_{KS}	mg/Teil	Restkühlschmierstoff
Z		Zeiteinheit
z_k	%	kalkulatorischer Zinssatz
Z_T		für den Teiledurchsatz angegebene Zeiteinheit (Stunde/Tag/Monat/Jahr)

Lebenslauf

Persönliche Daten: Mathias Wullstein
Wuppertaler Str. 18
45549 Sprockhövel
geboren am 19.11.1973 in Hattingen
verheiratet mit Britta Wullstein

Schulausbildung: 08/1980 - 07/1984 Grundschule Börgersbruch, Niedersprockhövel
08/1984 - 05/1993 Gymnasium an der Waldstraße, Hattingen

Studium: 10/1993 - 12/1998 Universität Dortmund,
Diplomstudiengang Maschinenbau,
Vertiefungsrichtung Technische Betriebsführung

Studienbegleitend: 10/1995 - 12/1998 Studentische Hilfskraft,
Fachgebiet Maschinenelemente der Transporttechnik

Zivildienst: 02/1999 - 02/2000 Evangelisches Krankenhaus, Hattingen

Berufstätigkeit: Seit 03/2000 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Universität Dortmund,
Fachgebiet Maschinenelemente

Sprockhövel, den 26.07.2004