

**Strategien zur Optimierung  
der Abbauleistung einer  
betrieblichen Abwasserreinigungsanlage**

Vom Fachbereich Chemie  
der Universität Hannover

zur Erlangung des Grades  
Doktor der Naturwissenschaften  
Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation  
von

Dipl.-Chem. Sabine Müller  
geboren am 17. Februar 1970 in Berlin

Hannover 2000

Referent: Prof. Dr. G. Wunsch  
Korreferent: Prof. Dr. A. Seubert  
Tag der Promotion: 27. Juni 2000  
Tag der Veröffentlichung: 18. September 2013

Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit vom Januar 1997 bis Juni 2000 am Institut für Anorganische Chemie unter Leitung von Prof. Dr. G. Wünsch angefertigt.

Herr Prof. Dr. Wünsch sei an dieser Stelle für die Überlassung des Themas, sein reges Interesse am Zustandekommen dieser Arbeit, seinen wissenschaftlichen Rat sowie seine Unterstützung bei der Bewältigung der zahlreichen Probleme gedankt.

Für die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr. A. Seubert.

Die Arbeit wurde in Kooperation mit Honeywell, Seelze erstellt. Hier gilt mein besonderer Dank Dr. G. Wöhner und Dipl.-Biol. S. Bauer.

Für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit danke ich Honeywell, Seelze.

Bei den Kollegen der Arbeitskreise Wünsch und Seubert bedanke ich mich für die freundliche Aufnahme und für ein ausgesprochen angenehmes Arbeitsklima.

Für die prompte Beseitigung von Software-Problemen danke ich Carl Oelker

Ein ganz dickes Dankeschön geht an alle, die Dafür gesorgt haben, dass ich die Zeit an der Universität Hannover immer in bester Erinnerung halten werde. Das sind besonders Angela Bösel, Carl Oelker, Stefan Stössel, Stefan Reimann, Matthias Folchnandt, Jörn Krüger, Andreas Czwalinna, Olaf Menzel, Jens Pohlmann, Knut Köhler, Holger B. Müller, Anja Hölzer, Matthias Busch und Hajo Weinreich.

Schließlich möchte ich mich noch bei meiner Mutter und meinem Bruder bedanken, wobei mein besonderer Dank meiner Mutter gilt, die mir das Studium ermöglichte – gracias por todo.

## **Abstract**

Gegenstand der Untersuchung ist die werkseigene Abwasserreinigungsanlage der Firma Honeywell, Seelze. Man beobachtet schwankende Abbauleistungen, ohne jedoch die Gründe hierfür genau zu kennen. In dieser Arbeit soll der Frage nachgegangen werden, welche Parameter die Ursachen für dieses unterschiedliche Verhalten sind. Dabei sollen diejenigen Bereiche identifiziert werden, die zu hohen und stabilen Abbauleistungen führen. Die Zusammenhänge zwischen den Betriebsparametern dienen als Grundlage für die Verbesserung der Leistung und Robustheit der Anlage.

Eine Charakterisierung ausgewählter System-Parameter hinsichtlich ihrer Relevanz bezüglich des Abbauverhaltens erfolgte durch die Anwendung statistischer Werkzeuge. Dafür wurde auf die routinemäßig aufgenommenen Messdaten zurückgegriffen, die z.T. zur Generierung neuer Kenngrößen modifiziert wurden.

Anhand zweier Datenreihen, wobei eine kleinere einen ausgewählten Zustandsbereich der ARA beschreibt und die andere, umfangreichere einen repräsentativen, wurde eine Methode entwickelt, mit der sich einflussreiche und wirkungslose System-Parameter unterscheiden und für einen System-Parameter günstige Bereiche bestimmen lassen. Zudem wurde die Methode auf Gebrauchstauglichkeit überprüft.

Die Methode beinhaltet die Korrelationsanalyse und zweifache Varianzanalyse, wobei unterschiedliche Untergruppenbildungsverfahren angewendet werden. Dabei zeichnet sich die entwickelte Methode aus durch maximalen Informationsgewinn und Unabhängigkeit von den Verteilungen der System-Parameter, also der Qualität der Daten. Die Ergebnisse, die anhand dieser Methode ermittelt wurden, dienen als Grundlage für Optimierungen.

In einem gesonderten Kapitel werden neuere Betrachtungen zum Robustheitsbegriff vorgestellt.

## **Abstract**

Schlagworte: industrielle Abwasserreinigungsanlage, Optimierung durch statistische Verfahren, Robustheit

Gegenstand der Untersuchung ist die werkseigene Abwasserreinigungsanlage der Firma Honeywell, Seelze. Man beobachtet schwankende Abbauleistungen, ohne jedoch die Gründe hierfür genau zu kennen. In dieser Arbeit soll der Frage nachgegangen werden, welche Parameter die Ursachen für dieses unterschiedliche Verhalten sind. Dabei sollen diejenigen Bereiche identifiziert werden, die zu hohen und stabilen Abbauleistungen führen. Die Zusammenhänge zwischen den Betriebsparametern dienen als Grundlage für die Verbesserung der Leistung und Robustheit der Anlage.

Eine Charakterisierung ausgewählter System-Parameter hinsichtlich ihrer Relevanz bezüglich des Abbauverhaltens erfolgte durch die Anwendung statistischer Werkzeuge. Dafür wurde auf die routinemäßig aufgenommenen Messdaten zurückgegriffen, die z.T. zur Generierung neuer Kenngrößen modifiziert wurden.

Anhand zweier Datenreihen, wobei eine kleinere einen ausgewählten Zustandsbereich der Abwasserreinigungsanlage beschreibt und die andere, umfangreichere einen repräsentativen, wurde eine Methode entwickelt, mit der sich einflussreiche und wirkungslose System-Parameter unterscheiden und für einen System-Parameter günstige Bereiche bestimmen lassen. Zudem wurde die Methode auf Gebrauchstauglichkeit überprüft.

Die Methode beinhaltet die Korrelationsanalyse und zweifache Varianzanalyse, wobei unterschiedliche Untergruppenbildungsverfahren angewendet werden. Dabei zeichnet sich die entwickelte Methode aus durch maximalen Informationsgewinn und Unabhängigkeit von den Verteilungen der System-Parameter, also der Qualität der Daten. Die Ergebnisse, die anhand dieser Methode ermittelt wurden, dienen als Grundlage für Optimierungen.

In einem gesonderten Kapitel werden neuere Betrachtungen zum Robustheitsbegriff vorgestellt.

## **Abstract**

Key words: industrial sewage treatment plant, optimisation by statistical methods, robustness

Subject of investigation is the factory-owned sewage treatment plant of Honeywell's plant in Seelze.

The efficiency of degradation fluctuates, specific reasons are mostly unclear. This study analyses which parameters are the causes for the different performances. Whereas such ranges will be identified which lead to high and stable degradation performances. Interrelations between operating parameters are base for improvement of the performance and robustness of the sewage treatment plant. Characterisation of selected system-parameters regarding relevance for degradation performance was done by use of statistical methods. Therefor routinely collected data was used, partly modified for generation of new parameter.

On the basis of two streams of data a method was developed for identifying significant and ineffective system-parameters and determining for each parameter optimal ranges.

However, one stream of data was representative for a selected condition of the sewage treatment plant, one much wider stream of data describes a long period representatively.

In addition to method development respective method was checked for serviceability.

The method comprises analysis of correlation and double analysis of variance, whereas different generation modes for subgroups are applied.

The method developed is characterised by maximum gain of information and independency of data distributions of the system-parameters, thus quality of data. The results derived from the method developed are base for optimisations.

A separate chapter deals with latest investigations regarding the term of robustness.

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung und Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Aufgabenstellung.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Die betriebseigene Abwasserreinigungsanlage (ARA) .....</b>	<b>2</b>
1.2.1	Der Gang des Abwassers durch die Kläranlage .....	3
1.2.2	Das Belebungsverfahren .....	5
<b>1.3</b>	<b>System-Parameter und Abbau-Größen .....</b>	<b>5</b>
1.3.1	System-Parameter.....	6
1.3.2	Definitionen der System-Parameter .....	8
1.3.3	Abbau-Größen und ihre Berechnung .....	9
<b>1.4</b>	<b>Zur Terminologie in dieser Arbeit.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Werkzeuge zur Optimierung - Situationen und Strategien .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Experimentelle Optimierungen - sequentiell und simultan .....</b>	<b>12</b>
2.1.1	Sequentielle Methoden.....	12
2.1.1.1	EVOP .....	13
2.1.1.2	Simplex-Methode.....	14
2.1.2	Simultane Verfahren .....	18
2.1.2.1	Prinzipien der statistischen Versuchsplanung.....	18
2.1.2.2	Zweistufiger Faktorenversuchsplan .....	19
2.1.2.3	Faktorielle Teilversuchspläne .....	25
2.1.2.4	Central Composite Design (CCD) .....	26
2.1.2.5	Vollständiger 3n-Faktorenversuchsplan.....	27
2.1.2.6	Versuchsplan nach Box-Behnken .....	28
<b>2.2</b>	<b>Nicht-experimentelle Optimierungen.....</b>	<b>29</b>
2.2.1	Test auf Normalverteilung.....	30
2.2.2	Mittelwert.....	30
2.2.3	Standardabweichung und Varianz.....	31
2.2.4	Vertrauensintervall.....	31
2.2.5	F-Test .....	31
2.2.6	t-Test.....	32
2.2.7	Korrelation .....	33
2.2.8	Best-Subsets-Regression .....	34
2.2.9	Varianzanalyse - ANOVA .....	34

2.2.10 Der $\epsilon^2$ -Wert .....	35
<b>3 Angewandte statistische Verfahren.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1 Statistische Verfahren zur Charakterisierung der Anlage und die     Notwendigkeit ihrer Anwendung .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2 Statistische Verfahren zur Identifizierung abbaurelevanter Parameter und     zur Bestimmung kritischer bzw. unkritischer Parameter-Bereiche .....</b>	<b>40</b>
3.2.1 Korrelationsanalyse.....	40
3.2.2 Best-Subsets-Regressionen .....	42
3.2.3 Varianzanalyse (ANOVA).....	44
<b>3.3 Behandlung der Ergebnisse.....</b>	<b>49</b>
<b>4 Untersuchungen am vereinfachten System.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1 Charakterisierung der Betriebsparameter und Abbaugrößen.....</b>	<b>51</b>
4.1.1 Betriebsparameter.....	51
4.1.2 Abbau-Größen.....	56
<b>4.2 Identifizierung abbaurelevanter Parameter und Bestimmung kritischer     bzw. unkritischer Parameter-Bereiche .....</b>	<b>58</b>
4.2.1 Korrelationsanalyse.....	58
4.2.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Korrelationsanalyse .....	62
4.2.3 Best Subsets Regression.....	62
4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Best-Subsets-Regressionen.....	67
4.2.5 Varianzanalyse ANOVA.....	67
4.2.6 Ergebnisse für Stufe I.....	70
4.2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der ANOVA für Stufe I .....	70
4.2.8 Ergebnisse für Stufe II.....	71
4.2.9 Zusammenfassung der Ergebnisse der ANOVA für Stufe II.....	73
<b>4.3 Untersuchung des Parameters Temperatur für den Zeitraum     27.1. – 30.10.97.....</b>	<b>75</b>
<b>5 Untersuchungen am komplexen System .....</b>	<b>79</b>
<b>5.1 Charakterisierung der Betriebsparameter und Abbaugrößen.....</b>	<b>80</b>
5.1.1 Betriebsparameter.....	80
5.1.2 Zustand der Anlage Phase II .....	80
5.1.3 Abbau-Größen.....	84

<b>5.2</b>	<b>Identifizierung abbaurelevanter Parameter und Bestimmung kritischer bzw. unkritischer Parameter-Bereiche .....</b>	<b>87</b>
5.2.1	Korrelationsanalyse.....	87
5.2.1.1	Zusammenfassung der Ergebnisse der Korrelationsanalyse.....	91
5.2.2	Varianzanalyse (ANOVA).....	91
5.2.2.1	Ergebnisse für Stufe I.....	98
5.2.2.2	Zusammenfassung der Ergebnisse für Stufe I.....	100
5.2.2.3	Ergebnisse für Stufe II.....	100
5.2.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Varianzanalysen für Stufe II....	104
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse und Bewertung.....</b>	<b>105</b>
<b>6.1</b>	<b>Auswirkungen des Datenumfangs auf die Ergebnisse.....</b>	<b>107</b>
6.1.1	Signifikanzbetrachtungen bei der Korrelationsanalyse.....	107
6.1.2	Signifikanzbetrachtungen bei der Varianzanalyse .....	108
<b>6.2</b>	<b>Auswirkungen der Breite der Datenbasis auf die Ergebnisse.....</b>	<b>110</b>
<b>6.3</b>	<b>Mögliche Situationen beim Vergleich von Ergebnissen .....</b>	<b>111</b>
6.3.1	Verschiedenartigkeit von Ergebnissen .....	112
<b>6.4</b>	<b>Vergleich der Ergebnisse.....</b>	<b>113</b>
6.4.1	Vergleich von Stufe I und Stufe II innerhalb einer Phase.....	116
6.4.2	Vergleich zwischen den Phasen .....	118
<b>6.5</b>	<b>Validierung der Methode .....</b>	<b>127</b>
<b>7</b>	<b>Robustheit - Arbeit am Begriff .....</b>	<b>129</b>
<b>7.1</b>	<b>Weitere Definitionen von Robustheit .....</b>	<b>130</b>
<b>7.2</b>	<b>Überblick über den Gebrauch der Robustheit in der Analytischen Chemie .....</b>	<b>130</b>
<b>7.3</b>	<b>Robustheitstests .....</b>	<b>131</b>
<b>7.4</b>	<b>Robustheit in der Taguchi-Methodik.....</b>	<b>133</b>
<b>7.5</b>	<b>Kenngrößen für Robustheit .....</b>	<b>135</b>
7.5.1	Die Jones-Methode.....	136
7.5.2	Der Robustheitskoeffizient RC .....	139
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>143</b>
<b>8.1</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>143</b>
<b>8.2</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>145</b>



## Abkürzungsverzeichnis

---

AOX	Adsorbierbare organische Halogene
ARA	Abwasserreinigungsanlage
ANOVA	Analysis of Variance, Varianzanalyse
BE	Belebungsbecken
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf
CCD	Central Composite Design, zentral zusammengesetzter Versuchplan
CI	Confidence Intervall, Vertrauensintervall
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CSB-SA	Anteil CSB, der schwer abbaubar ist
DF	Degree of Freedom, Freiheitsgrad
EVOP	Evolutionary Operation, Evolutionsverfahren
f	Freiheitsgrad
FVP	Faktorieller Versuchsplan
GL	Einheit des Leuchtbakterientestes, Verdünnungsfaktor
MS	Mean Sum of Squares, mittlere Quadratsumme
NK	Nachklärbecken
OFAT	One Factor at Time, Ein-Faktor-zur Zeit-Betrachtung
orgTS	organischer Anteil der Trockensubstanz
p	Wahrscheinlichkeit, (für Aufrechterhaltung der Nullhypothese)
PI	Phenolindex
r	Korrelationskoeffizient
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitskoeffizient
SS	Sum of Squares, Summe der quadratischen Abweichungen
s	Standardabweichung
s <sup>2</sup>	Varianz
StDev	Standard Deviation, Standardabweichung
TS	Trockensubstanz
VWZ	Verweilzeit

# 1 Aufgabenstellung und Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Wasser ist in den Kreislauf der Natur eingebunden und für alle Lebewesen unersetzlich und lebensnotwendig. Es ist daher unbedingt erforderlich, verunreinigtes Wasser wieder weitestgehend zu reinigen, bevor es in den natürlichen Kreislauf zurückgeführt wird.

Große Industriebetriebe betreiben werkseigene Abwasserreinigungsanlagen, da Produktionsabwässer anders zusammengesetzt sind als kommunale Abwässer.

Die Abwasserreinigung hat die Aufgabe, Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor und die Schwermetalle aus dem Abwasser zu eliminieren. Dabei erfolgt die Entfernung von Kohlenstoff als gasförmiges  $\text{CO}_2$ . Die Beurteilung der organischen Belastung von Wasser geschieht meistens anhand von Summen-Parametern, wie CSB, BSB oder PI, womit sich allerdings keine Einzelsubstanzen überwachen lassen. Die abzubauenen Abwasserinhaltsstoffe müssen für die abbauenden Mikroorganismen Nährstoffcharakter haben.

Gegenstand der Arbeit ist der Betrieb der werkseigenen Abwasserreinigungsanlage (ARA) von Honeywell in Seelze. Beim Betrieb der ARA wird routinemäßig eine Vielzahl von Messwerten aufgenommen. Dies dient hauptsächlich der Überwachung hinsichtlich einzuhaltender Grenzwerte und zu Dokumentationszwecken. Eine Auswertung dieser Datenmengen erfolgte bisher nicht. Diese Daten sollen nun herangezogen werden, um Kenntnis über die Arbeitsweise der ARA zu erlangen. Die Auswertung soll auf der Anwendung statistischer Werkzeuge beruhen. Es soll eine Methode entwickelt und angewendet werden, die es ermöglicht, ausgewählte Parameter hinsichtlich ihrer Relevanz bezüglich des Abbauverhaltens zu charakterisieren. Darüber hinaus sollen diejenigen Parameterbereiche identifiziert werden, die hohe Abbauraten und eine stabile Arbeitsweise der ARA ermöglichen.

Dafür werden zwei Datenreihen herangezogen; eine kleinere, mit der ein ausgewählter Zustandsbereich der ARA beschrieben wird (Phase I), und eine umfangreiche, die die

ARA repräsentativer charakterisiert (Phase II). Zunächst soll anhand der Daten für Phase I eine geeignete Methode entwickelt werden. Die Methodvalidierung soll dann anhand des Datenmaterials für Phase II erfolgen.

Die Ergebnisse der Methode sollen als Grundlage für Optimierungen dienen. Dabei soll auch geprüft werden, ob sich Hinweise auf die maximalen Kapazität, d.h. auf eine mögliche Belastungsgrenze, der ARA ergeben.

## **1.2 Die betriebseigene Abwasserreinigungsanlage (ARA)**

Bei dem untersuchten Betrieb fallen drei Arten von Abwasser an: Produktionsabwasser, Fäkalabwasser und Kühl- und Regenwasser. Diese Abwässer werden in drei verschiedenen Kanalsystemen gesammelt und abgeleitet. Dabei werden nur das Produktionsabwasser und das Kühl- und Regenwasser der betriebseigenen Abwasserreinigungsanlage zugeführt [1].

### 1.2.1 Der Gang des Abwassers durch die Kläranlage

Das Produktionsabwasser durchläuft in der ARA zuerst eine physikalisch-chemische Behandlungsstufe. Hier werden wasserunlösliche Verbindungen, wie z.B. Calciumfluorid gebildet und dem Abwasserstrom entzogen. An die physikalisch-chemische Behandlungsstufe schließt sich die biologische Behandlungsstufe an. Hier werden wasserunlösliche Stoffe mit Hilfe von Mikroorganismen um- und abgebaut. Dabei verfügt die ARA über ein sogenanntes zweistufiges Belebungsverfahren. Bei diesem Verfahren durchläuft das Abwasser zwei hintereinander geschaltete Belebungsbecken, BE I und BE II. Dabei stellt Becken I eine hochbelastete Stufe dar, Becken II eine niedrigbelastete. Die beiden Belebungsbecken sind übereinander angeordnet. In das Becken II wird zudem das schwach belastete Kühl- und Regenwasser geleitet. Darüber hinaus wird dem Becken II ein Teilstrom aus dem Zulauf des Becken I zugeführt. Der in den Belebungsbecken gebildete biologische Schlamm wird in den beiden Nachklärbecken, NK I und NK II, vom Klarwasser abgetrennt. Der überwiegende Teil fließt als sogenannter Rücklaufschlamm den Belebungsbecken wieder zu. Ein kleiner Teil wird als Überlaufschlamm dem Schlammkreislauf entzogen. Eine schematische Übersicht der ARA zeigt Abbildung 1-1.

Die in dieser Arbeit gemachten Untersuchungen beziehen sich nur auf die biologische Behandlungsstufe, bestehend aus der Abfolge BE I, NK I, BE II und NK II. Dabei wird die erste Stufe des Belebungsverfahrens als Stufe I und die zweite Stufe als Stufe II bezeichnet [1].

Eine schematische Darstellung der ARA zeigt Abbildung 1-1.

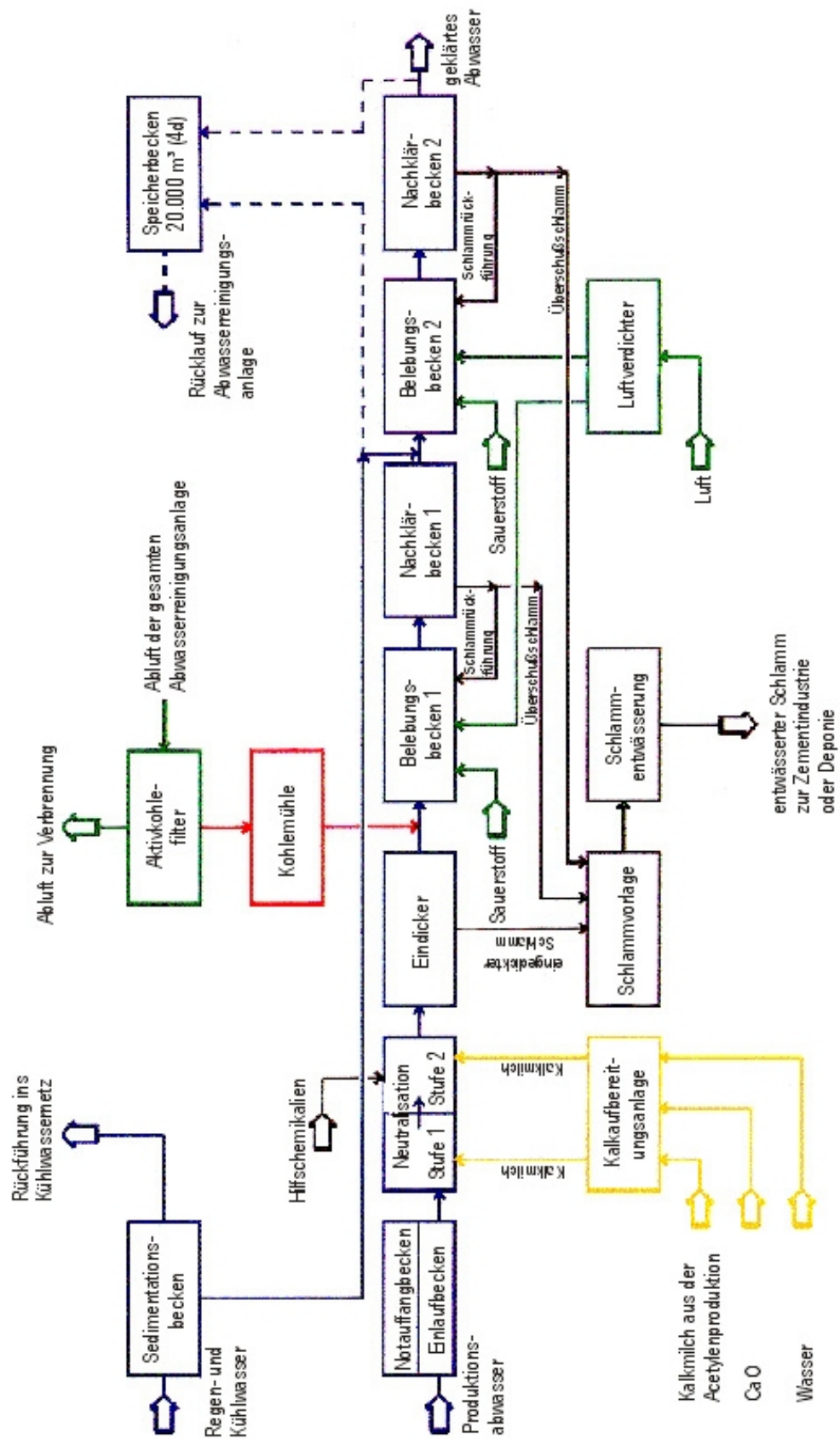


Abb. 1-1: Die betriebseigene Abwasserreinigungsanlage (ARA)

### 1.2.2 Das Belebungsverfahren

Da in dieser Arbeit nur auf die biologische Behandlungsstufe eingegangen wird, der das Belebungsverfahren zugrunde liegt, wird dieses näher beschrieben.

Unter diesem Verfahren wird die künstliche biologische Abwasserbehandlung mit belebten Flocken verstanden. Das Verfahren geht zurück auf englische Erfinder, die es „activated sludge process“, also Belebtschlammverfahren oder Schlammbelebungsverfahren nannten. Im deutschen Sprachraum hat sich der Begriff Belebungsverfahren durchgesetzt.

Das Verfahren ist gewissermaßen eine künstlich verstärkte Selbstreinigung. Die Vorgänge sind genau die gleichen wie die im natürlichen Fluss oder See. Nur sind die Lebewesen, die die Reinigung besorgen, in den Lüftungsbecken in ungeheurer Anzahl auf kleinem Raum zusammengedrängt. Ihre Oberfläche beträgt 2.000 bis 10.000 m<sup>2</sup> je m<sup>3</sup> Belüftungsraum. Durch künstliche Zufuhr von Luft wird dafür gesorgt, dass die Lebewesen trotz ihrer Anhäufung noch genügend Sauerstoff vorfinden. Das Wasser in den Becken wird auch künstlich bewegt, damit die flockige Masse sich nicht zu Boden setzen kann, wo sie infolge Sauerstoffmangels absterben müsste [2,3].

Dabei setzt sich das Belebungsverfahren aus folgenden fünf Betriebsvorgängen zusammen[4]:

- Vorklärung um die absetzbaren Stoffe zu entfernen,
- Belüftung von Abwasser und belebtem Schlamm im Belebungsbecken (BE)
- Trennung des belebten Schlammes von dem gereinigten Abwasser durch absetzen im Nachklärbecken
- Rückführung des abgesetzten, belebten Schlammes in das Belebungsbecken
- Entfernung des Zuwachses an belebtem Schlamm als Überschussschlamm

### 1.3 System-Parameter und Abbau-Größen

In dieser Arbeit wird die Arbeitsweise der ARA anhand von zwei Datenreihen untersucht, die aus verschiedenen Zeiträumen stammen.

Der Zeitraum vom 15.8. – 30.9.97 stellt einen ausgewählten Zustandsbereich der ARA dar und wird als Phase I bezeichnet. Phase II beschreibt den Zeitraum vom 1.1.98 – 10.6.99, der die ARA repräsentativer charakterisiert.

### 1.3.1 System-Parameter

Um den Betrieb der Anlage zu überwachen, wird routinemäßig eine Vielzahl von Messwerten aufgenommen.

Dabei werden folgende Betriebs-Parameter ständig gemessen:

CSB-Konzentration	Gesamt-Phosphor-Konzentration
BSB-Konzentration	Phosphat-Phosphor-Konzentration
Sauerstoffkonzentration	Schlammvolumen
Temperatur	Trockensubstanz (TS)
Phenolindex (PI) als Konzentration	Glühverlust
AOX-Konzentration	Schlammindex
Gesamt-Stickstoff-Konzentration	Wassermenge
Nitrit-Stickstoff-Konzentration	Verweilzeit (VWZ)
Nitrat-Stickstoff-Konzentration	Leuchtbakterientest
Ammonium-Stickstoff-Konzentration	

Dabei ist die Menge der Daten und auch die Vollständigkeit der Datenaufnahme in bezug auf die Messpunkte nicht bei allen Parametern gleich.

Alle Werte außer der Sauerstoffkonzentration werden einmal täglich gemessen. Die Sauerstoffwerte werden in Phase I minütlich aufgenommen, für die weitere Bearbeitung werden die Tagesmittelwerte gebildet. In Phase zwei werden die Sauerstoffkonzentrationen einmal täglich an jeweils vier Stellen gemessen, und aus diesen Messungen wird der Mittelwert gebildet.

Da die Wassermengen stark schwanken und sich das Abwasser im BE II aus drei Teilströmen zusammensetzt, ist eine Umrechnung der Konzentrationsangaben in Frachten erforderlich. Bei Sauerstoff wird diese Umrechnung nicht vorgenommen.

Für eine genaue Beschreibung sind Daten der Stoff-Parameter an allen Stellen der ARA nötig, wo es einen Stoffeintrag gibt. Dies sind Zulauf BE I, Zulauf BE II (entspricht Ablauf NK I), Zulauf Kühl- und Regenwasser und Zulauf Teilstrom direkt in BE II.

Zur Berechnung der Leistung einer Stufe benötigt man die Werte an Ablauf NK I und Ablauf NK II.

Um die entsprechenden Frachten berechnen zu können, sind außerdem die jeweiligen Wassermengen erforderlich.

Diese Daten liegen vollständig nur für die CSB- und BSB-Werte vor. Bei den anderen Stoffparametern sind nur an den Punkten Zulauf BE I und BE II und Ablauf NK I und NK II Messwerte vorhanden. Hier wird für Stufe II als Näherung die Konzentration am Zulauf BE II mit der Gesamtwassermenge in BE II multipliziert. Das geringer belastete Kühl- und Regenwasser und das stärker belastete Abwasser aus dem Direktzulauf werden also mit dem teilgereinigten Abwasser aus dem Zulauf BE II gleichgesetzt.

Für AOX und Leuchtakterien sind nur für Stufe I Berechnungen möglich.

Zu den gemessenen Größen werden zusätzlich einige Größen generiert. Dies sind die Menge schwer abbaubarer Substanz (CSB-SA) als Differenz von CSB- und BSB-Werten, das Verhältnis BSB/CSB als der Anteil leichtabbaubarer Substanz, der organische Anteil der Trockensubstanz (orgTS) als Glühverlust-Fracht und die Sauerstoffschwankungen in Phase I als Differenz von Tageshöchst- und Tiefstwert.

Danach bilden folgende Größen die untersuchten System-Parameter:

CSB-Fracht [kg]	BSB-Fracht [kg]	CSB-SA-Fracht [kg]	BSB/CSB
Leuchtakterien [GL]	Sauerstoff [mg/l]	O <sub>2</sub> -Schwankungen [mg/l]	
Gesamt-N [kg]	NO <sub>2</sub> -N [kg]	NO <sub>3</sub> -N [kg]	NH <sub>4</sub> -N [kg]
Gesamt-P [kg]	PO <sub>4</sub> -P [kg]	TS [kg]	orgTS [kg]
PI [kg]	AOX [kg]	VWZ [h]	Temperatur [°C]



### 1.3.2 Definitionen der System-Parameter

In diesem Abschnitt werden Definitionen der wichtigsten Betriebs-Parameter gegeben, die für die Untersuchungen in dieser Arbeit herangezogen werden. Dabei erfassen die hier beschriebenen Parameter für die Abwasserbeschaffenheit die organischen Verbindungen lediglich als Summe. Sie sind mit relativ geringem Aufwand zu bestimmen und dienen zum Erkennen von Belastungsschwankungen und zur Einschätzung des Ausmaßes von Stoffeinträgen. Über die einzelnen Inhaltsstoffe, die diese Werte verursachen, lassen sich anhand dieser Parameter jedoch kaum Informationen gewinnen.

**CSB:** Chemischer Sauerstoffbedarf. Menge an gelöstem Sauerstoff in mg/l oder g/m<sup>3</sup>, die zur völligen Oxidation der im Wasser enthaltenen organischen Stoffe benötigt wird. Als chemisches Oxidationsmittel wird üblicherweise Kaliumdichromat (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) verwendet. Die Bestimmung erfolgt in der homogenisierten Originalprobe des Abwassers gemäß DIN 38 409 - H 41. Der chemische Sauerstoffbedarf ist ein Maß zur Erfassung der chemisch oxidierbaren, organischen Stoffe. Er ist reproduzierbarer als der BSB und man versucht, aus einer chemischen Redoxreaktion Schlüsse auf im wesentlichen biologische Vorgänge zu ziehen. Dabei sollte man sich auch bei der Interpretation von CSB-Werten immer bewusst sein, dass es sich um eine Hilfsgröße handelt [2, 5].

**BSB:** Biochemischer Sauerstoffbedarf. Masse an gelöstem Sauerstoff in mg/l, die beim aeroben biologischen Abbau organischer Stoffe im Wasser in n Tagen (üblicherweise n = 2, n = 5) bei 20 °C benötigt wird (Kurzbezeichnung BSB2 oder BSB5). Der BSB5 gibt somit die Menge Sauerstoff in mg/l an, die die Bakterien und andere Kleinstlebewesen in einer Wasserprobe während 5 Tagen bei 20 °C beim biologischen Abbau verbrauchen [2].

**PI:** Phenolindex. Summenparameter der im Wasser enthaltenen Phenole (und aromatischen Amine). Die Bestimmung erfolgt nach DIN 38409 - H 16, Angabe in mg/l, bezogen auf Phenol [2].

**AOX:** AOX steht nach DIN 38 409 Teil 14 als Abkürzung für »Adsorbierbare organische Halogene« und ist ein Summenparameter für die nach diesem Verfahren bestimmbaren Halogene Chlor, Brom und Iod in Wasser. Organisch gebundenes Fluor

kann verfahrensbedingt nicht erfasst werden. Das »A« in »AOX« kennzeichnet die betreffenden Inhaltsstoffe als »an Aktivkohle adsorbierbar«. Das Analysenergebnis wird jeweils in Chlorid-Äquivalenten angegeben [2].

**Sauerstoff:** Die Sauerstoffgehaltsbestimmung hat lediglich eine grobe Indikatorfunktion für die im Belebungsbecken stattfindenden biochemischen Vorgänge, da die aktiven Biomassegehalte nicht bekannt sind.

**Leuchtbakterientest:** Der Leuchtbakterientest ist ein biologisches Testverfahren zum Nachweis der Giftigkeit im Wasser gelöster Stoffe - z. B. der toxischen Wirkung von Abwasser - gegenüber Leuchtbakterien als typische Vertreter der Destruenten. Dabei wird der zu untersuchende Stoff (oder das zu untersuchende Abwasser) in abgestuften Konzentrationen dem Wasser zugesetzt und die Wachstumshemmung, bezogen auf eine bestimmte Einwirkungszeit, oder der erforderliche Verdünnungsfaktor GL ermittelt (DIN 38 412 T34) [2].

**Trockensubstanz (TS):** Die Trockensubstanzkonzentration ist definiert als die Summe der im Wasser enthaltenen, nicht flüchtigen gelösten und ungelösten Stoffe, die beim Trocknen bis 110°C als Rückstand verbleiben (Angaben in g bzw. mg/l) [6].

**Glühverlust:** Der Glühverlust ist die Gewichts Differenz zwischen den Werten der abgedampften Wasserprobe und des bei 600 - 650 °C ermittelten Glührückstandes; Gewichtsangabe in g bzw. mg/l bzw. in % (DIN 38414 Teil 3). Der Glühverlust ist ein Maß für den organischen Anteil der Trockensubstanz [5, 6].

**Stickstoffverbindungen:** Stickstoffverbindungen (Ammonium, Nitrat, Nitrit) wirken ebenso wie **Phosphorverbindungen** im Gewässer eutrophierend. Sie sind abwasserabgabenrelevant [2].

### 1.3.3 Abbau-Größen und ihre Berechnung

Die Abbau-Größen sind diejenigen Größen, die die Leistungsfähigkeit der ARA charakterisieren. Der Einfluss der System-Parameter auf diese Größen wird untersucht. Es sind der CSB-Abbau, der BSB-Abbau und der Abbau schwer abbaubarer Substanzen, CSB-SA-Abbau, und zwar jeweils in Stufe I und Stufe II.

Die Output-Variablen berechnen sich für Stufe I aus:

$$\frac{\text{Parameterwert} + 1\text{Tag Ablauf NK I}}{\text{Parameterwert Zulauf BE I}} \quad (\text{Gl. 1-1})$$

Und für Stufe II aus:

$$\frac{\text{Parameterwert} + 1\text{Tag Ablauf NK II}}{\text{Parameterwert Gesamtzulauf BE II}} \quad (\text{Gl. 1-2})$$

Dabei setzt sich der Gesamtzulauf BE II aus Ablauf NK I, Zulauf BE II direkt und Zulauf Kühl- und Regenwasser zusammen.

#### **1.4 Zur Terminologie in dieser Arbeit**

Diese Arbeit beinhaltet sowohl Aspekte aus der Verfahrenstechnik als auch aus der Statistik. Beide Disziplinen haben eine eigene Fachsprache, um bestimmte Sachverhalte zu beschreiben. So kann es vorkommen, dass ein Begriff in einer Fachrichtung als eindeutig beschrieben angesehen wird, ohne dass dies für die andere Fachrichtung ebenfalls gilt. Daher wird für diese Arbeit festgelegt, dass die Begriffe System-Parameter, Einfluss-Parameter, Einfluss-Variable, Betriebs-Parameter synonym verwendet werden und für die Parameter stehen, deren Relevanz für das Abbauverhalten untersucht wird. Die Benennung als Einfluss-Parameter bzw. Einfluss-Variable erfolgt unabhängig davon, ob tatsächlich ein Einfluss besteht. Unberücksichtigt mit dieser Terminologie bleibt, dass eigentlich Messwerte untersucht werden. Ebenfalls synonym verwendet werden die Begriffe Abbaurrate und Abbauwert. Mit ihnen wird die Quantifizierung der Abbauleistung in Prozent ausgedrückt.

Mit Stufe I und Stufe II wird die jeweilige Stufe des Belebungsverfahrens, also der biologischen Behandlungsstufe, bezeichnet.

Phase I beschreibt den Zeitraum vom 15.8. – 30.9.97, der einen ausgewählten Zustandsbereich darstellt; Phase II beschreibt den Zeitraum vom 1.1.98 – 10.6.99, der die ARA repräsentativer beschreibt.

## 2 Werkzeuge zur Optimierung - Situationen und Strategien

Ein Ergebnis hängt von vielen Parametern ab. Dabei bezeichnet man eine unabhängige willkürlich einstellbare Größe, die Einfluss auf die Ziel- oder Ergebnisgröße hat, als Faktor oder Einflussgröße.

Ziel von Optimierungen ist es, einen optimalen, d. h. in bezug auf die betrachteten Systemeigenschaften besonders vorteilhaften Zustand eines Systems aufzuspüren. Damit sollen Die Leistungsfähigkeit eines Verfahrens erhöht und/oder die Kosten minimiert werden.

Es empfiehlt sich, systematisch zu verfahren, da Vorgehen nach dem trial-and-error-Prinzip nicht garantiert, dass das Optimum gefunden wird, insbesondere bei komplexeren Fragestellungen mit mehreren Faktoren und Zielgrößen.

Üblicherweise werden zur Optimierung Experimente durchgeführt, die darauf abzielen, den Einfluss der einzelnen Faktoren auf eine oder mehrere Zielgrößen zu bestimmen. Mit dieser Kenntnis ist es dann möglich, einen optimalen Betriebspunkt zu finden.

Die statistische Versuchsmethodik enthält die Instrumentarien, die für die Versuchsplanung, deren Auswertung und Optimierung erforderlich sind.

Bei nicht-experimentellen Optimierungen greift man nur auf bereits vorhandenes Datenmaterial zurück. Anhand dieser Werte versucht man auf Abhängigkeiten zu schließen und optimale Arbeitspunkte zu finden. Nicht-experimentelle Optimierungen sind anzuwenden, wenn sich im Verfahren wichtige Einflussgrößen nicht genau regeln lassen. Dies ist im Betrieb einer Abwasserreinigungsanlage der Fall. Parameter wie z.B. CSB-Belastung sind nicht steuerbar, man kann sie nicht auf einen günstigen Wert einstellen, auch wenn dieser bekannt ist.

## **2.1 Experimentelle Optimierungen - sequentiell und simultan**

Experimentelle Methoden lassen sich nochmals aufteilen in sequentielle und simultane Verfahren. Dabei beruhen simultane Methoden auf mathematischen Modellen für die Zielgröße in Abhängigkeit der Faktoren, während sequentielle Methoden Suchverfahren darstellen. Mischformen finden Verwendung, wenn z.B. zunächst erste Experimente anhand eines Versuchsplans durchgeführt werden und dann, von einem aussichtsreichen Punkt ausgehend, mit der Methode des steilsten Anstiegs die Suche nach dem Optimum fortgeführt wird.

### **2.1.1 Sequentielle Methoden**

Die sequentielle Vorgehensweise basiert auf dem Aufstellen eines minimalen Anfangsversuchsplans, für den die jeweiligen Antwortgrößen bestimmt werden. Von diesen Ergebnissen ausgehend werden dann die Einstellungen der Folgeversuche in Richtung des steilsten Anstiegs bzw. Abfalls festgelegt. Die unbekannte Antwortfläche wird systematisch nach dem Optimum abgesucht. Jedoch bleibt der mathematische Zusammenhang zwischen den untersuchten Faktoren und der Antwortgröße unbekannt. Daher erhält man keine Information über die Umgebung des entdeckten Optimums und man erfährt auch nichts über die Robustheit des Optimums bezüglich geringer Schwankungen eines Faktors. Außerdem ist die Anzahl der benötigten Experimente und damit der zu betreibende Aufwand im Voraus nicht bekannt. Man hat es somit mit Planungsunsicherheiten zu tun. Darüber hinaus ist man bei sequentiellen Optimierungsmethoden auf die Untersuchung nur einer Antwortgröße beschränkt.

Sequentielle Optimierungsmethoden sind das Simplexverfahren und Evolutionary Operation (EVOP), wobei ersteres in der Verfahrensentwicklung und EVOP bei bereits laufenden Prozessen Verwendung finden.

### 2.1.1.1 EVOP

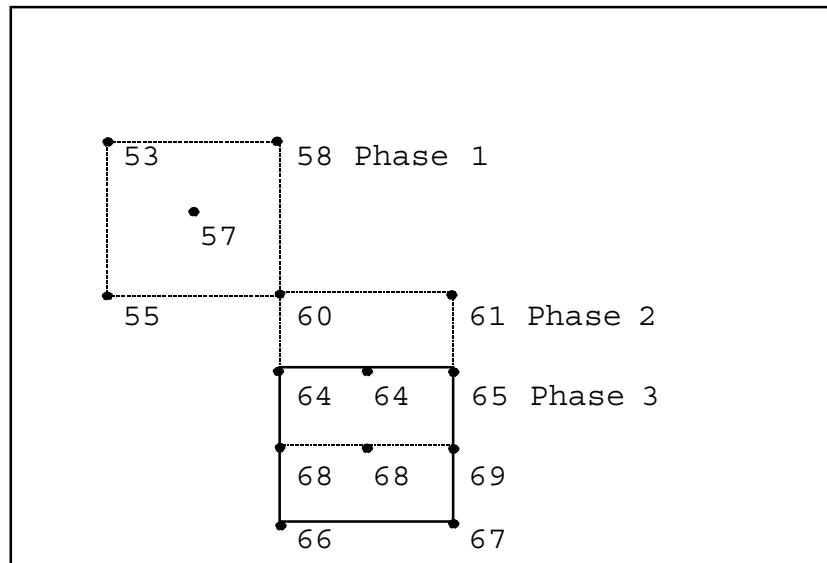
Auch bereits etablierte Prozesse laufen oft nicht unter den bestmöglichen Bedingungen ab. Als Möglichkeit zur Prozessverbesserung im laufenden Betrieb bietet sich Evolutionary Operation (EVOP) an. Diese Methode wird während des Produktionsprozesses an der normalen Betriebsanlage durchgeführt.

Ziel ist es, dass man gleichzeitig noch brauchbare Produkte oder Ergebnisse und Information über Verbesserungsmöglichkeiten erhält. Um dies zu gewährleisten, werden nur geringe Eingriffe in das Verfahren vorgenommen, d.h. die Parameteränderungen sind möglichst gering und es werden nur wenige Faktoren, meist zwei oder drei, gleichzeitig untersucht. Dabei erfolgt die Untersuchung der Faktoren anhand von Faktorplänen mit Zentralpunkt. Die einmalige Ausführung eines Faktorplans nennt man einen Zyklus. Um bei den vorgenommenen kleinen Änderungen Effekte identifizieren zu können ist es nötig, einen Versuchszyklus mehrmals zu durchlaufen, da mit jedem Zyklus das Vertrauensintervall des Mittelwerts der Ergebnisgröße kleiner wird und damit ein Effekt besser erkennbar wird.

Eine Reihe von Zyklen, die eine Kombination von Faktoreinflüssen untersucht, nennt man Phase. Ist das Ergebnis einer Phase, dass sich keine signifikante Änderung der Antwortgröße ergeben hat, bedeutet das, dass man entweder bereits am Optimum arbeitet oder dieses noch nicht erreicht hat, die Stufenweite jedoch zu klein war. Ist dies der Fall empfiehlt sich, die Stufenabstände zu vergrößern.

Stellt man eine signifikante Zielgrößenänderung fest, heißt das, dass das Optimum noch nicht erreicht ist. Man führt eine neue EVOP-Phase durch mit dem besten Versuchspunkt als neuen Startpunkt. Auf diese Weise wird fortgefahren, bis das Optimum oder ein angestrebter Zielwert erreicht wird. Die aus den Phasen resultierenden Daten dienen zur Einschätzung der Wirkungsfläche.

Parameter B



Parameter A

Abb.2-1: EVOP zur Maximierung einer Antwortgröße für die Parameter A und B. Dargestellt sind drei Phasen

Bei Verwendung der EVOP-Methode werden Verbesserungen durch viele kleine Schritte erzielt. Es ist ein kontinuierliches Verfahren, das geringe Zusatzkosten für das Experimentieren verursacht. Scale-Up Fehler werden vermieden, da die Versuche an der normalen Betriebsanlage durchgeführt werden. Allerdings hat man nur beschränkte Versuchsmöglichkeiten und man ist unter Umständen auf eine langwierige Experimentierphase angewiesen [10,11].

### 2.1.1.2 Simplex-Methode

Die Simplex-Methode ist eine Optimierungsmethode, mit der man mit relativ wenigen Experimenten nah an das Optimum heranrücken kann. Es ist seiner Natur nach ein sukzessives Verfahren, das zur Optimumsuche den steilsten Anstieg benutzt.

Betrachtet man zwei Faktoren, beginnt man bei dem Simplex-Verfahren mit drei Experimenten, allgemein bei  $n$  Faktoren mit  $n + 1$  Versuchen. Für  $n = 2$  ist das Simplex ein gleichseitiges Dreieck, für  $n = 3$  ist es ein Tetraeder usw. Jeder weitere

hinzukommende Faktor ergibt also ein Simplex mit einer zusätzlichen Ecke in einer zusätzlichen Dimension.

Das Prinzip des Verfahrens wird wegen der Anschaulichkeit anhand eines zweidimensionalen Variablenraums erläutert.

An einer geeigneten Stelle im Parameterraum wird ein Startpunkt  $x_0$  festgelegt, der gleichzeitig den Ursprung des normierten Koordinatensystems bildet. Um diesen herum wird das Startsimplex konstruiert, das die Kantenlänge 1 hat. Die Eckpunkte dieses Simplexes sind die ersten drei Versuchspunkte. Allgemein besteht ein Simplex-Start-Versuchsplan für  $n$  Faktoren aus  $n + 1$  Versuchen.

Man führt die Versuche durch und prüft, welches Ergebnis am schlechtesten ist. Beim Fortschreiten in entgegengesetzter Richtung dieses schlechtesten Resultats lassen sich bessere Ergebnisse erwarten. Man erhält den nächsten Versuchspunkt und damit das Folgesimplex, indem man den schlechtesten Wert aussondert und den Punkt an der gegenüberliegenden Dreieckskante bzw. am Schwerpunkt des um eine Dimension geschrumpften Simplexes spiegelt.

Die Koordinaten des Spiegelpunktes berechnen sich nach:

$$x_{iSp.} = 2x_{iSchwp.} - x_{iel.} \quad (\text{Gl. 2-1})$$

mit  $x_{iSp.}$  = Spiegelpunkt,  $x_{iSchwp.}$  = Schwerpunkt,  $x_{iel.}$  = eliminiertes Wert. Dabei ist

$$x_{iSchwp.} = \frac{\sum_{j=1, j \neq i.}^N x_{ij}}{N - 1} \quad (\text{Gl. 2-2})$$

mit  $N = n + 1$  als Anzahl der Simplexecken.

Der zugehörige Versuchswert wird ermittelt und erneut mit den übrigen Werten verglichen usw.

Beim Fortschreiten dieser Methode sind die Simplexe spiralförmig um den steilsten Anstieg angeordnet.

Wenn der gespiegelte Punkt im neuen Simplex zum schlechtesten Ergebnis führt, würde das Simplex wieder in das vorherige zurückgespiegelt. Dann wird anstelle des



schlechtesten Werts der zweitschlechteste aussortiert und dieser Punkt gespiegelt, um zum nächsten Versuchspunkt zu gelangen.

Dieses Vorgehen erzwingt das Kreisen in der Nähe des Optimums.

Bleibt ein Eckpunkt in mehreren aufeinander folgenden Simplexen erhalten, kreist das System um diesen Punkt. Dieses Rotieren tritt ein, wenn man den Optimalbereich erreicht hat. Um sich zu vergewissern, dass das System nicht um einen Punkt rotiert, dessen Antwortwert fälschlicherweise zu gut bestimmt worden ist, ist es sinnvoll, ihn nach einer gewissen Dauer im aktuellen Simplex neu zu bestimmen. Eine Neubestimmung empfiehlt sich, wenn der Punkt  $(n+1)$ -mal hintereinander in den Simplexen enthalten war. Wird dabei der Antwortwert bestätigt, war das Misstrauen unberechtigt, und man lässt das System sich weiter um diesen Punkt drehen. Bei  $n = 2$  Variablen gehören zu einem Umlauf sechs Simplexe, also sieben Versuche. Bei zahlreicheren Variablen ist es viel zu aufwendig, erst nach einem vollständigen Umlauf den Drehpunkt als Optimalpunkt anzuerkennen.

Ist man mit dem bisher besten Wert noch nicht zufrieden, kann man die Simplexprozedur mit stark verkleinerter Schrittweite am bisher besten Wert starten und dem Optimalwert experimentell suchen.

Es kann auch sein, dass man nur ein lokales und nicht das globale Optimum des zu untersuchenden Systems gefunden hat. Hat man einen solchen Verdacht, startet man das Simplexverfahren erneut, jedoch an einem ganz anderen Punkt im Parameterraum. Kommt man dann wieder zum gleichen Optimum, ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass es sich nur um ein lokales Optimum handelt.

In Abbildung 2-2 ist eine Versuchsreihe nach der Simplex-Methode dargestellt. Die Reihenfolge der Versuche ist mit Nummern gekennzeichnet.

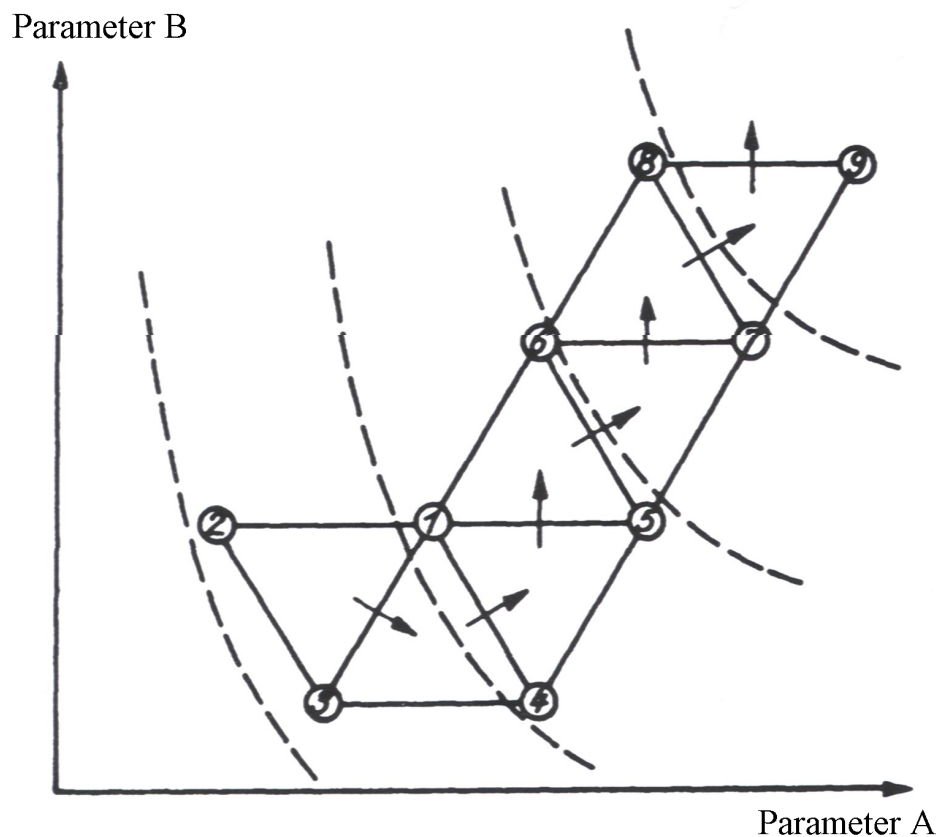


Abb. 2-2: Simplex-Methode anhand einer unbekanntem Wirkungsfläche, die Zahlen geben nacheinander durchzuführende Versuche an.

Bei sequentiellen Verfahren ist die Anzahl der benötigten Experimente im Voraus nicht bekannt, sie kann kleiner aber auch größer sein als bei simultanen Methoden. Man hat es auf jeden Fall mit Planungsunsicherheiten zu tun, da man nach jedem Versuch entscheidet, ob noch ein weiterer notwendig ist. Wird ein Optimum gefunden, weiß man nichts über den Teil der Umgebung außerhalb des letzten Simplexes. Man weiß auch nichts über die Stabilität des Optimums bezüglich geringer Schwankungen eines Faktors. Außerdem ist man bei sequenziellen Optimierungsmethoden auf die Untersuchung nur einer Antwortgröße beschränkt [10,12].

### 2.1.2 Simultane Verfahren

Bei den simultanen Methoden werden sämtliche Versuche im Voraus geplant und dann in zufälliger Reihenfolge durchgeführt. Dabei wird ein funktioneller Zusammenhang zwischen den Faktoren und der Zielgröße gebildet. Grundlage hierfür ist die Aufstellung eines adäquaten Versuchsplans. Damit lassen sich der Einfluss der einzelnen Faktoren auf die Ergebnisgröße bestimmen und somit auch komplizierte Systeme oder Prozesse charakterisieren und optimieren.

Ein Faktorenversuchsplan wird gekennzeichnet durch die Anzahl der zu untersuchenden Faktoren  $n$  und deren Stufen oder Niveaus  $k$ , nämlich als  $k^n$ -Faktorenversuchsplan. Logischerweise müssen mindestens zwei Stufen pro Faktor untersucht werden. Um den Versuchsaufwand nicht ausufern zu lassen, werden viele Faktorenversuchspläne nur auf zwei Stufen durchgeführt und die Anzahl der Faktoren wird möglichst klein gehalten. Allerdings erfasst man damit keine Nichtlinearitäten.

Um auch Nichtlinearitäten berücksichtigen zu können oder aber um viele Faktoren gleichzeitig zu untersuchen, wie es nötig ist, wenn man erst sehr wenig über das System oder den Prozess weiß, sind verkürzte Versuchspläne entwickelt worden. Central Composite Designs (CCD), Box-Behnken-Pläne oder Teilversuchspläne sind Beispiele hierfür.

#### 2.1.2.1 Prinzipien der statistischen Versuchsplanung

Allen Versuchsplänen gemein ist ihre Orthogonalität, d.h., die Versuche müssen so angeordnet sein, dass man anhand der Versuchsergebnisse Effekte bestimmen kann, die unabhängig voneinander sind, also nur den Einfluss eines Effektes oder einer Wechselwirkung wiedergeben. Bei nicht-orthogonaler Anordnung der Experimente lässt sich ein bestimmter Effekt nicht vollständig einem Faktor zuordnen, er könnte mit Anteilen eines Effektes bzw. eines anderen Faktors vermengt sein [13].

Um die Versuchsstreuung zu bestimmen, ist es nötig, mindestens einen Versuchspunkt wiederholt zu messen. Dabei lässt sich der experimentelle Fehler durch zunehmende Wiederholungen minimieren. Bei der Prüfung auf Signifikanz eines Effektes wird die Größe des jeweiligen Effektes mit der Versuchsstreuung verglichen.

Durch eine Randomisierung der Experimente gehen systematische Fehler oder Trends in die Versuchsstreuung ein und verfälschen somit nicht den zu untersuchenden Effekt. Daher ist eine Zufallsreihenfolge der Versuche anzustreben.

Unkontrollierbare Faktoren wie Chargenuneinheitlichkeit oder Trends gehen durch Blockbildung weder in die zu untersuchenden Effekte noch in die Versuchsstreuung ein, sondern werden separat als Blockeffekt erfasst. Dabei geht man bei der Blockbildung davon aus, dass innerhalb eines Blocks die Versuchsbedingungen einheitlicher sind als von Block zu Block. Blockbildung erhöht jedoch entweder die Anzahl der Versuche oder die Unsicherheit des Ergebnisses. Andererseits jedoch verringert sie die Gefahr von Fehlern, vor allen 2. Art. Beim Fehler 2. Art werden fälschlicherweise Unterschiede ermittelt.

Um die Versuchsanzahl zu verringern, vermengt man Effekte, d.h. es werden systematisch wesentliche Effekte und Nebeneffekte, wie Vierfachwechselwirkungen, überlagert [10].

### **2.1.2.2 Zweistufiger Faktorenversuchsplan**

Zweistufige Faktorenversuchspläne sind am einfachsten und am anschaulichsten. Um allgemeine Grundzüge und den Hergang der Auswertung zu veranschaulichen, wird auf diese näher eingegangen. Das meiste hiervon lässt sich auf andere Versuchspläne übertragen.

Der Plan ist so aufgebaut, dass für jedes Niveau eines Faktors beide Niveaus aller anderen Faktoren untersucht werden. Das niedrige Niveau wird mit -1 bezeichnet, das hohe Niveau mit +1. Dadurch erhält man Versuchsergebnisse bei allen möglichen Kombinationen der untersuchten Faktorstufen. Einen solchen Plan nennt man einen vollständigen  $2^n$ -Faktorenversuchsplan. Die zugehörige Versuchsmatrix ist der Tabelle 2-1 angegeben.

Tab. 2-1: Vollständiger faktorieller Versuchsplan auf zwei Stufen,  $2^3$ -Plan [12]

Experiment	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Zielgröße
1	-1	-1	-1	$y_1$
2	+1	-1	-1	$y_2$
3	-1	+1	-1	$y_3$
4	+1	+1	-1	$y_4$
5	-1	-1	+1	$y_5$
6	+1	-1	+1	$y_6$
7	-1	+1	+1	$y_7$
8	+1	+1	+1	$y_8$

Die räumliche Anordnung für einen solchen Versuchsplan wird in Abbildung 2-3 dargestellt.

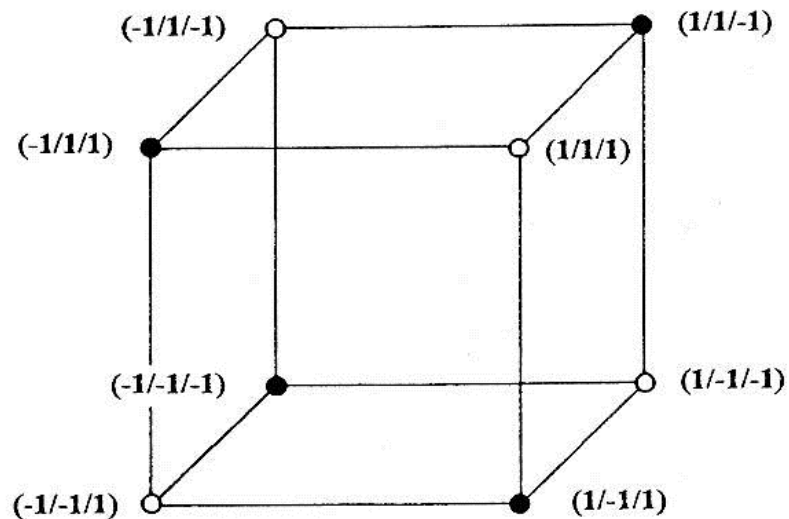


Abb. 2-3: vollständiger  $2^3$ -Versuchsplan[14]

Man erkennt die Orthogonalität des Versuchsplans. Der Unterschied der Messwerte  $y_1$  und  $y_2$  beruht nur auf dem Faktor A und ist unabhängig von den Faktoren B und C.

Die Durchführung eines  $2^n$ -Versuchsplans liefert  $2^n$  Messergebnisse je Zielgröße. Aus diesen Werten soll abgeleitet werden, welche Faktoren allein einen Einfluss auf die Zielgröße haben und zwischen welchen Faktoren eine Wechselwirkung besteht. Bei der Auswertung zur Bestimmung der Effekte oder Wirkungen werden Ergebnispaaire gebildet, die sich nur in der Einstellung z.B. des Faktors A unterscheiden. Das heißt,

dass die Änderung der Zielgröße nur auf die Wirkung des Faktors A zurückzuführen ist. Es können  $m/2$  Ergebnispaaire gebildet werden, mit  $m$  als Anzahl der Messungen. Effekte werden dann als die Hälfte des Mittelwerts der Unterschiede definiert. Analoges erhält man, wenn alle Versuchsergebnisse mit dem entsprechenden Parameter auf hohem Niveau von denen mit dem Parameter auf niedrigem Niveau abgezogen werden:

$$W_j = \frac{\sum y_i^+ - \sum y_i^-}{m} \quad (\text{Gl. 2-3})$$

Der so definierte Effekt gibt an, wie sich die Zielgröße ändert, wenn der zugehörige Faktor von einem mittleren auf das höhere Niveau geändert wird.

In einigen Literaturstellen (vgl. [13]) wird Effekt als Unterschied der Messgröße zwischen hoher und niedriger Stufe definiert. Für den weiteren Hergang, insbesondere für die Bestimmung der Koeffizienten der Modellgleichung, bietet sich jedoch erstere Definition an.

Anhand von Gleichung 2-3 lässt sich erkennen, dass für die Beurteilung eines jeden Faktors jeweils alle Messergebnisse herangezogen werden, und je mehr Versuche man zur Untersuchung eines Zusammenhanges hat, um so zuverlässiger wird, nach dem Prinzip der Mittelwertbildung, die Aussage. Das ist ein Vorteil der Faktorenversuchspläne gegenüber herkömmlichen Ein-Faktor-zur-Zeit-Betrachtungen (OFAT).

Die Beeinflussung der Wirkung eines Faktors durch die Einstellung eines oder mehrerer anderer Faktoren bezeichnet man als Wechselwirkung. Eine Wechselwirkung AB wird durch den Unterschied in der A-Wirkung bei B auf hoher und der Wirkung von A bei B auf niedriger Stufe gemessen. Sie beträgt die Hälfte dieses Unterschieds, also:

$$WW_{AB} = \frac{[(y_4 - y_3) + (y_8 - y_7) - (y_2 - y_1 + y_6 - y_5)]}{m} \quad (\text{Gl. 2-4})$$

Dabei tritt die Wechselwirkung  $W_{AB}$  zusätzlich zu den Hauptwirkungen  $W_A$  und  $W_B$  auf. Je nach Vorzeichen kann die Wechselwirkung die Hauptwirkung verstärken oder ihr entgegen wirken.

Die berechneten Werte der Wirkungen erlauben einen Vergleich der Effekte untereinander. Je größer der Effekt, desto größer ist der Einfluss des entsprechenden

Parameters. Dieser direkt Vergleich ist möglich, da die Faktoreinstellungen mit -1 und +1 normiert sind [13].

Ob ein Effekt jedoch wirklich messbar ist, hängt unter anderem von der Versuchsstreuung ab. Die Maßzahlen der Effekte müssen also Signifikanztests unterworfen werden. Als Maß für die Signifikanz wird die Varianz der Messgröße verwendet. Ist diese nicht bekannt, muss eine Schätzung aus den Ergebnissen des Faktorexperiments erfolgen. Dabei ist die Varianzschätzung lediglich ein Maß für die Reproduzierbarkeit der Messmethode, also für die Präzision. Aussagen bezüglich der Richtigkeit, also über einen systematischen Fehler, können nicht gemacht werden. Üblicherweise wird die Versuchsstreuung durch mehrfache Wiederholung des gleichen Versuchs bestimmt. Analog kann bei einem Faktorexperiment vorgegangen werden, indem an einem Versuchspunkt Wiederholmessungen durchgeführt werden. Dabei wird die Schätzung der Varianz bestimmt nach:

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{m-1} \quad (\text{Gl. 2-4a})$$

mit

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_i^m x_i \quad (\text{Gl. 2-4b})$$

wobei  $m$  = Anzahl der Versuche und  $m-1$  = Anzahl der Freiheitsgrade ist.

Die Varianz benutzt man dann für die eigentliche Auswertung des Faktorexperiments. Da alle Messwerte mit derselben Apparatur gemessen wurden, können auch die Varianzen der Messergebnisse als gleich angenommen werden. Da zudem die Effekte und Wechselwirkungen stets aus allen Versuchen berechnet werden, berechnet sich die Varianz eines Effektes nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung aus den Varianzen der Messungen zu:

$$s_{\text{Effekt}}^2 = \frac{1}{2^n} s_{\text{Messung}}^2 \quad (\text{Gl. 2-5})$$

Daraus ergibt sich außerdem, dass nicht nur die Varianzen aller Messungen sondern auch die Varianzen aller Effekte und Wechselwirkungen gleich sind oder besser gesagt als gleich unterstellt werden.

Nachdem eine Schätzung der Varianz vorliegt, muss untersucht werden, ob ein Effekt signifikant ist oder nur infolge der Versuchsstreuung gefunden wurde. Das geschieht mit dem t-Test. Dabei wird zuerst eine Nullhypothese  $H_0$  aufgestellt, die postuliert, dass ein Effekt nur auf der Versuchsstreuung beruht, in Wirklichkeit also null ist. In einem zweiten Schritt wird festgelegt, mit welcher statistischer Sicherheit man über Annahme oder Ablehnung dieser Hypothese entscheiden will. Meistens wird das Signifikanzniveau 95% gewählt. Dann bildet man den t-Wert. Dieser ist definiert als

$$t = \frac{\text{Prüfwert} - \text{Sollwert}}{\text{Standardabweichung des Prüfwerts}} \quad (\text{Gl. 2-6})$$

Dabei berechnet sich die Standardabweichung des Effektes, also des Prüfwerts zu

$$s_{\text{Effekt}} = \sqrt{\frac{1}{2^n} \cdot s^2} \quad (\text{Gl. 2-7})$$

Schließlich wird die Signifikanzgrenze bei gewähltem Signifikanzniveau aus einer Tabelle der t-Verteilung abgelesen und mit dem berechneten t-Wert verglichen. Ist der berechnete t-Wert größer als der Wert der Signifikanzgrenze, muss die Nullhypothese  $H_0$  abgelehnt werden, d.h. der entsprechende Effekt beruht nicht auf der Versuchsstreuung. Er ist signifikant auf dem gewählten Signifikanzniveau. Liegt hingegen die Signifikanzgrenze über dem berechneten t-Wert, lässt sich nicht entscheiden, ob eine Wirkung vorliegt, diese sich aber nicht signifikant von der Versuchsstreuung unterscheiden lässt, oder ob keine vorliegt [12,13]. Verträglichkeit mit der Nullhypothese bedeutet, dass ein vorhandener Effekt jedenfalls kleiner als die Signifikanzschränke sein muss.

Wenn bei einem Faktorenversuchsplan kein Versuch zur Schätzung der Varianz wiederholt wurde, muss man bei der Untersuchung der Signifikanz von Effekten anders vorgehen. Dabei beschafft man sich die Schätzung der Varianz aus dem Versuch selbst. Dazu werden zunächst die sogenannten formalen Varianzen bestimmt. Sie betragen bei



$2^n$ -Versuchsplänen jeweils das Quadrat eines Effekts. Wenn ein Effekt nun nicht signifikant ist, ist das Quadrat dieses Effektes also eine Schätzung der Versuchsstreuung des Effektes um seinen Mittelwert null. Das  $2^n$ -fache dieses Effektquadrates ist dann nach Gleichung 2-5 eine Schätzung für die Varianz der Messgröße, wenn dieser Effekt nicht existiert, also für die Versuchsstreuung. Zunächst muss theoretisch überlegt werden, welche Effekte nicht auftreten und somit null sein müssten. Dies sind meist Dreifach- oder noch höhere Wechselwirkungen. Aus dem  $2^n$ -fachen des Durchschnitts dieser Effektquadrates, denen der Annahme zufolge kein realer Effekt zugrunde liegt, berechnet sich dann die Schätzung der Versuchsvarianz. Im Zähler der Gleichung 2-6 sind also nur die nicht-signifikanten Effekte aufgeführt, d.h. Effekte die Null sind.

$$s_{\text{Messung}}^2 = 2^n \frac{\text{Effekt}_1^2 + \dots + \text{Effekt}_p^2}{\text{Anzahl der als nichtsignifikant angenommenen Effekte}} \quad (\text{Gl. 2-6})$$

Die Signifikanzgrenze  $c$ ,  $c = F(p; f_1; f_2)$ , bei festgelegtem Signifikanzniveau  $p$  wird dann mit den Freiheitsgraden  $f_1, f_2$  aus einer F-Tabelle entnommen. Damit ein Effekt dann als signifikant gelten kann, muss gelten [13]:

$$\text{Effekt}_i^2 > \frac{c \cdot s_{\text{Messung}}^2}{2^n} \quad (\text{Gl. 2-7})$$

Als Endergebnis eines Faktorenversuchsplans kann dann eine Modellgleichung aufgestellt werden, die anhand der signifikanten Effekte einen funktionellen Zusammenhang zwischen den variierten Faktoren (A, B, C...) und der Zielgröße  $y$  herstellt.

Für einen  $2^3$ -Faktorenversuchsplan hat die Modellgleichung die allgemeine Form:

$$(A,B,C) = \beta_0 + \beta_{AA} + \beta_{BB} + \beta_{CC} + \beta_{AB}AB + \beta_{AC}AC + \beta_{BC}BC + \beta_{ABC}ABC \quad (\text{Gl. 2-8})$$

Die acht Koeffizienten  $\beta_i$  lassen sich aus den acht Versuchsergebnissen bestimmen. Dabei ist  $\beta_0$  der Mittelwert aller Messungen und gibt somit den Messwert bei mittleren Faktoreinstellungen wieder.

Sind die Faktoren in ihrer codierten Form angegeben, also mit -1 und +1, entsprechen die Koeffizienten genau den Effekten. Als Maß für den Einfluss der jeweiligen Faktoren

können sie so direkt miteinander verglichen werden. Die codierte kann in die uncodierte Modellgleichung transformiert werden. Da bei der uncodierten Gleichung die tatsächlichen Faktorwerte in die Berechnung der Koeffizienten mit eingehen, kann man hierbei nicht unmittelbar von der Größe eines Koeffizienten auf die Stärke des Einflusses des zugehörigen Faktors bzw. der Wechselwirkung schließen [13,15].

Die Modellgleichung enthält nur diejenigen Terme, die signifikante Faktoren beinhalten. Sie sind nur für den Parameterraum gültig, in dem sie erstellt wurden. Es kann also nicht extrapoliert werden. Je nach Güte des Modells lassen sich die Zielgrößen im untersuchten Parameterraum bei beliebigen Faktoreinstellungen mit hoher Genauigkeit berechnen.

### 2.1.2.3 Faktorielle Teilversuchspläne

Da bei vollständigen Faktorenversuchsplänen die Anzahl der Experimente mit zunehmender Anzahl der Faktoren exponentiell zunimmt, wird der Versuchsaufwand schnell unpraktikabel hoch. So sind bei sieben Faktoren schon  $2^7 = 128$  Versuche durchzuführen. Sollen jedoch viele Faktoren gleichzeitig untersucht werden, lässt sich die Versuchsanzahl durch faktorielle Teilversuchspläne enorm reduzieren.

Das Prinzip dieser verkürzten Faktorenversuchspläne ist, dass Effekte mit denjenigen Wechselwirkungen, von denen man annehmen kann, dass sie faktisch gar nicht existieren, vermengt werden, so dass der Fehler, den man durch die Vermengung macht, möglichst gering ist. Diese vermengten Wechselwirkungen werden Aliases genannt und sind im allgemeinen nur höhere, mindestens dreifache Wechselwirkungen. Bei der Auswertung gibt es dann keine Möglichkeit, den Effekt von der damit vermengten Wechselwirkung zu unterscheiden. Auch muss man dadurch eine geringere Aussageschärfe in Kauf nehmen, da jeder Faktor durch seine Aliases gestört wird.

Allgemein ist für  $k$  Faktoren, von denen  $p$  Faktoren durch Vermengen zusätzlich eingeführt wurden, die Anzahl der Versuchspunkte  $2^{k-p}$ . Da nur  $1/2^p$  Versuche des vollständigen Faktorenversuchsplan ausgeführt werden, nennt man sie auch  $1/2^p$ -Teilfaktorenpläne. Ist  $p = 1$ , liegen sogenannte Halbzellenpläne vor. In einem  $2^{4-1}$ -Teilfaktorenplan werden vier Faktoren durch Vermengen des Effekts D mit der Wechselwirkung ABC anhand von acht Versuchen untersucht.

Schließlich lassen sich Faktorenversuchspläne, bei entsprechenden Einbußen bei der Genauigkeit der Effekte, soweit reduzieren, bis sie nur noch Auskunft über die Haupteffekte geben. So lassen sich nach einem Plackett-Burman-Plan mit  $m$  Versuchen die Hauptwirkungen von  $k = m - 1$  Faktoren bestimmen [10,16].

Allerdings lassen sich die Faktorenversuchspläne nicht beliebig reduzieren. Zur Bestimmung der unabhängigen Effekte muss Orthogonalität der Pläne gegeben sein [17].

Haupteinsatzgebiet von faktoriellen Teilversuchsplänen ist das Screening, die Untersuchung einer relativ großen Anzahl von Faktoren in einer relativ kleinen Anzahl von Versuchsläufen.

#### **2.1.2.4 Central Composite Design (CCD)**

Diese Klasse von Versuchsplänen wurde von Box und Wilson entwickelt und setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Anhand eines vollständigen oder verkürzten 2-Stufen-Plans werden die linearen Beziehungen und die Wechselwirkungen bestimmt. Nichtlinearitäten werden durch einen Sternplan mit Mittelpunkt erfasst. Die minimale Anzahl der Experimente ist gegeben als

$$m = 2^n + 2n + n_0 \quad (\text{Gl. 2-9})$$

mit  $n_0$  als Zentripunktversuch

Der Abstand der Sternpunkte vom Mittelpunkt wird mit  $\alpha$  bezeichnet und ist so zu wählen, dass der Versuchsplan orthogonal und punktsymmetrisch ist. So ist der Wert von  $\alpha$  von der Zahl der Faktoren und der Anzahl der Wiederholmessungen des Mittelpunkts  $n_0$  abhängig [17].

Ein CCD mit drei Faktoren ergibt folgende Messpunkte:

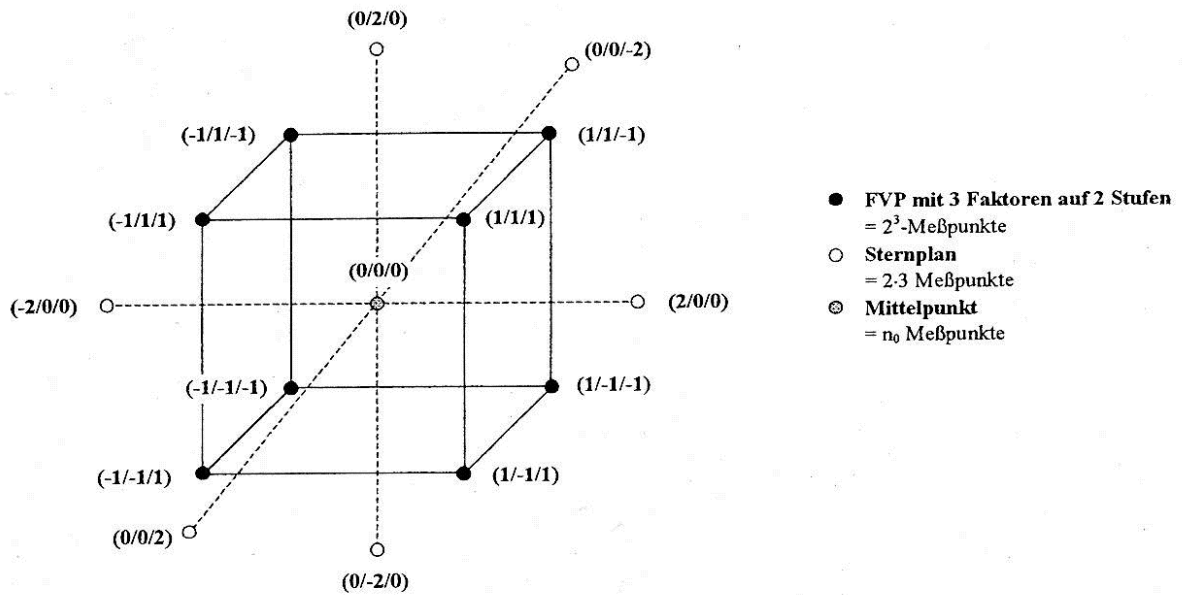


Abb. 2-4: Central Composite Design für drei Faktoren und fünfmalige Wiederholmessung des Zentralpunkts. Die Koordinaten entsprechen den kodierten Faktoreinstellungen [14].

Die Auswertung erfolgt im Prinzip analog zum  $2^n$ -Faktorenversuchsplan. Aufgrund der Komplexität des CCDs wird die Berechnung Effekte und Wechselwirkungen sowie die Erstellung der Modellgleichung mittels Computer durchgeführt [12, 18].

### 2.1.2.5 Vollständiger $3^n$ -Faktorenversuchsplan

Bei einem Faktorenversuchsplan auf drei Stufen ist schnell eine sehr große Versuchsanzahl erreicht, so dass vollständige Pläne mit mehr als vier Faktoren in der Praxis keine Rolle spielen. Er ist wie ein zweistufiger Faktorenversuchsplan aufgebaut, jedoch mit dem zusätzlichen mittleren Niveau 0. Das führt dazu, dass sich die Effekte nicht so einfach aus den Faktoreinstellungen berechnen lassen. So wird ein Effekt unterteilt in lineare, quadratische und gegebenenfalls kubische Komponenten. Für nähere Details sei auf die Literatur verwiesen (vgl. [18,19]).

### 2.1.2.6 Versuchsplan nach Box-Behnken

Dieser Plan stellt eine Art verkürzten 3-Stufen-Faktorenversuchsplan dar und ist eine der wenigen verkürzten Versuchsanordnungen auf drei Niveaus, bei denen die Orthogonalität aufrecht erhalten ist. Dabei befinden sich jeweils zwei Faktoren auf hoher oder niedriger Stufe, während die übrigen auf das mittlere Niveau eingestellt werden. Zusätzlich wird der Zentralpunkt gemessen. Im Gegensatz zum CCD wird hier tatsächlich nur auf drei Stufen gemessen und es sind in der Regel weniger Experimente nötig. Allerdings liegen beim Versuchsplan nach Box-Behnken keine Messpunkte auf den Ecken des Würfels bzw. Hyperwürfels. Die Zielgrößen-Werte, bei der alle Faktoren niedrig oder hoch eingestellt sind, müssen aus der Modellgleichung berechnet werden, was bei einer schlechten Modellanpassung zu Fehlinterpretationen führen kann. Die Auswertung ist analog der des CCDs [20].

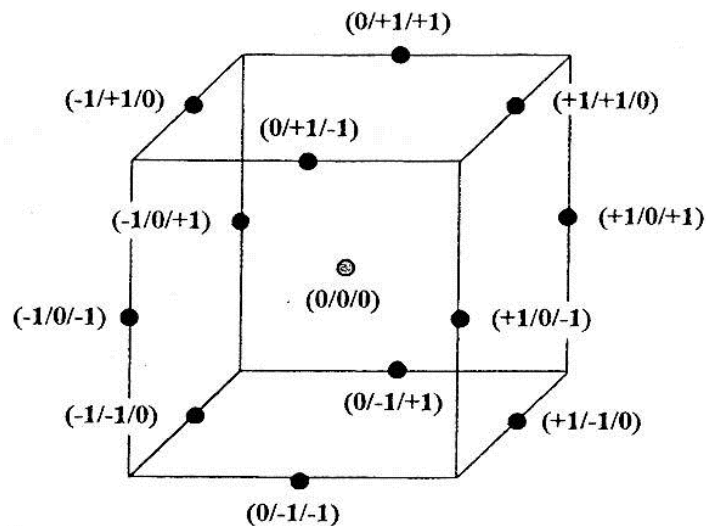


Abb. 2-5: Box-Behnken Plan für drei Faktoren mit codierten Faktoreinstellungen [14].

## 2.2 Nicht-experimentelle Optimierungen

Um den Betrieb einer Anlage zu überwachen, wird routinemäßig eine Vielzahl von Messwerten aufgenommen. Damit soll gewährleistet werden, dass gegebene Grenzwerte nach Möglichkeit nicht über- oder unterschritten werden oder dass sofort gehandelt werden kann, falls es doch mal zu zu großen Abweichungen kommt.

Dies geschieht auch bei der in dieser Arbeit untersuchten Abwasserreinigungsanlage. Die Messwerte werden gesammelt und nicht weiter ausgewertet.

Um aber Informationen über das System Abwasserreinigungsanlage zu erhalten, lassen sich mit diesen Daten statistische Parameteruntersuchungen durchführen. Dabei kann unter anderem eine Charakterisierung ausgewählter Parameter hinsichtlich ihrer Relevanz bezüglich des Abbauverhaltens erfolgen. Dabei können die Zusammenhänge zwischen den Betriebsparametern und der Abbauleistung als Grundlage für die Verbesserung der Leistung und Robustheit der Anlage dienen.

Bei einer solchen Vorgehensweise, bei der im Zuge der Optimumsuche keine Versuche durchgeführt werden, spricht man von nicht-experimenteller Optimierung.

Die statistischen Größen, anhand derer sich ein Parameter beschreiben lässt und die Werkzeuge, mit denen verschiedene Größen verglichen oder in Relation zueinander gesetzt werden, werden im Folgendem kurz vorgestellt.

### 2.2.1 Test auf Normalverteilung

Messwerte sind immer mit Fehlern behaftet und daher ungenau. Führt man eine Wiederholmessung ausreichend oft durch, erhält man eine Verteilung der Werte um ihren Mittelwert. Die wichtigste Verteilung, auf der auch der größte Teil der beschreibenden Statistik beruht, ist die Normal- oder Gauß-Verteilung. Sie lässt sich für unendlich viele Messwerte beschreiben als

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{Gl. 2-10})$$

mit  $f(x)$  als Häufigkeits- oder Wahrscheinlichkeitsdichte,  $\sigma$  als Standardabweichung,  $\mu$  als Mittelwert und  $x$  als Variable [12].

Für den test Berechnet man zunächst aus den vorliegenden Daten den Mittelwert  $\bar{x}$  und die Standardabweichung nach der Normalverteilung. Daraus generiert man eine berechnete Häufigkeitskurve und prüft, ob die Häufigkeitsverteilung der Daten mit dieser verträglich ist. Dies geschieht, indem die Hypothese aufgestellt wird, dass die Messwerte normalverteilt sind. Ist dann der p-Wert des Tests, der nach Anderson-Darling [21, 22] durchgeführt wird, kleiner als das gewählte Irrtumsrisiko  $\alpha$ , ist die Hypothese zu verwerfen und es liegt keine Normalverteilung der Daten vor; ist er größer, sind die Werte normalverteilt [23].

### 2.2.2 Mittelwert

Der Mittelwert von  $n$  Messungen einer Größe  $x$  ist gegeben als

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Gl. 2-11})$$

Man sieht anhand der Gleichung, dass der Mittelwert stark durch extreme Werte beeinflusst wird [12].

### 2.2.3 Standardabweichung und Varianz

Standardabweichung und Varianz sind ein Maß für die Streuung. Dabei ist die Standardabweichung  $s$  (bzw.  $\sigma$ ) definiert als

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{Gl.2-12})$$

Die Varianz erhält man als Quadrat der Standardabweichung [12].

### 2.2.4 Vertrauensintervall

Jede Standardabweichung ist als eine Zufallsgröße anzusehen. Das Vertrauens- oder Konfidenzintervall beschreibt daher den Bereich um den Mittelwert einer Zufallsgröße, in dem ein Messwert mit der Wahrscheinlichkeit  $p$  bzw. der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 1 - p$  erwartet werden kann. Als statistischen Faktor verwendet man einen tabellierten  $t$ -Wert der Student-Verteilung. Das Vertrauensintervall  $\Delta \bar{x}$  für einen Mittelwert  $\bar{x}$  aus  $n$  Wiederholmessungen berechnet sich für  $f = n - 1$  Freiheitsgrade zu [12]:

$$\Delta \bar{x} = t(p; f) \cdot s_x \quad (\text{Gl. 2-13})$$

und nach Einsetzen der Standardabweichung für den Mittelwert zu

$$\Delta \bar{x} = \frac{t(p; f) \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (\text{Gl.2-14})$$

### 2.2.5 F-Test

Anhand eines F-Tests werden die zwei Varianzen miteinander verglichen, beispielsweise aus zwei Messreihen. Es wird die Nullhypothese aufgestellt, dass sich beide Varianzen, und damit auch die beiden Messreihen nicht unterscheiden, dass sie also der gleichen Grundgesamtheit angehören. Ein Irrtumsrisiko  $\alpha$  wird festgelegt. Dann wird die Testgröße  $F$  als Quotient beider Varianzen gebildet, wobei die größere Varianz im Zähler steht.

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad \text{mit } s_1^2 > s_2^2 \quad (\text{Gl. 2-15})$$

Der Prüfwert  $F$  wird dann mit dem nach Freiheitsgraden  $f_i$  tabellierten Wert der  $F$ -Verteilung  $F_{(p; f_1; f_2)}$  verglichen. Dabei bildet der entsprechende Wert aus der Tabelle die Signifikanzgrenze  $c$ . Ist  $F$  größer als  $c$ , wird die Nullhypothese verworfen, beide Varianzen gehören nicht einer Grundgesamtheit an. Umgekehrtes gilt für  $F < c$ .



### 2.2.6 t-Test

Betrachtet werden zwei Mittelwerte  $\bar{x}_1$  und  $\bar{x}_2$  aus zwei unabhängigen Messreihen  $n_1$  und  $n_2$ . Es ist zu prüfen, ob zwischen den beiden Werten mit der Wahrscheinlichkeit  $p$  ein zufälliger oder ein systematischer Unterschied vorliegt. Dazu wird zunächst gemäß Gleichung 2-14 ein F-Test durchgeführt. Ergibt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Varianzen, berechnet man die Standardabweichung für die Differenz der beiden Mittelwerte:

$$s_{x_1-x_2} = s \cdot \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}} \quad (\text{Gl. 2-16})$$

mit  $f = n_1 + n_2 - 2$  Freiheitsgraden.

Aus Gleichung 2-15 lässt sich die Formel zur Berechnung des Prüfwertes  $t$  ableiten:

$$t = \frac{|x_1 - x_2|}{s} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} \quad (\text{Gl. 2-17})$$

Der berechnete Prüfwert  $t$  wird dann mit dem entsprechenden Wert aus der t-Verteilung verglichen. Ist  $t > t(p; f)$ , so besteht mit der Wahrscheinlichkeit  $p$  ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Mittelwerten, ist  $t < t(p; f)$ , gehören  $\bar{x}_1$  und  $\bar{x}_2$  der gleichen Grundgesamtheit an. Der Unterschied zwischen beiden Werten beruht auf Streuung. Für den Fall, dass  $n_1 = n_2$  ist, vereinfacht sich die Berechnung des Prüfwerts  $t$  zu:

$$t = \frac{|x_1 - x_2|}{s} \cdot \sqrt{\frac{n}{2}} \quad (\text{Gl. 2-18})$$

mit  $f = 2(n - 1)$  Freiheitsgraden

### 2.2.7 Korrelation

Mit der Korrelationsanalyse wird untersucht, ob zwischen zwei Variablen eine Abhängigkeit besteht. Dabei gibt der Korrelationskoeffizient den Grad der linearen Abhängigkeit an. Dieser kann Werte zwischen +1 und -1 einnehmen, wobei das Vorzeichen positiv ist, wenn die Zunahme der einen Variablen auch zu einer Zunahme der anderen führt. Geht die Zunahme der einen Variablen einher mit der Abnahme der zweiten, ist der Korrelationskoeffizient negativ.

Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten ergibt sich zu

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} \quad (\text{Gl. 2-19})$$

mit  $\bar{x}$  und  $s_x$  als Mittelwert und Standardabweichung der einen Variablen und  $\bar{y}$  und  $s_y$  als Mittelwert und Standardabweichung der anderen Variablen.

Für einen Test auf Korrelation wird auf Erfüllung der Nullhypothese "es besteht keine Korrelation" geprüft. Bei einem p-Wert unter der angenommenen Unsicherheit  $\alpha$  wird die Nullhypothese verworfen und Korrelation angenommen.

Kann Korrelation angenommen werden, heißt das jedoch nicht automatisch, dass auch tatsächlich ein Zusammenhang zwischen beiden Größen besteht. Korrelation bedingt nicht automatisch Kausalität. So ist jedes Mal, wenn die Yankees in einem Wahljahr nach dem zweiten Weltkrieg im Baseball die Meisterschaft gewonnen haben, ein republikanischer Präsident ins Weiße Haus eingezogen. Eine Kausalität ist jedoch nicht gegeben [24].

### 2.2.8 Best-Subsets-Regression

Die Best-Subsets-Regression generiert Regressionsmodelle unter Anwendung des  $R^2$ -Kriteriums.

$R^2$  wird Bestimmtheitskoeffizient genannt und ist ein Maß für die Stärke der Streuung derjenigen abhängigen Größe, deren Abhängigkeit durch das Regressionsmodell erklärt wird. Der Wert liegt immer zwischen 0 und 1 (0% bis 100%). Je höher dieser ist, desto

größer ist das Vertrauen in das Modell. Anders ausgedrückt gibt der Wert von  $R^2$  an, welcher Prozentsatz der Streuung von  $y$  durch die Streuung von  $x$  erklärt werden kann.

$R^2$  erhält man aus

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{(\text{Fehler})}}{SS_{(\text{gesamt})}} \quad (\text{Gl. 2-20})$$

mit  $SS_{(\text{Fehler})}$  als Summe der Abstandsquadrate des Fehlers und  $SS_{(\text{gesamt})}$  als Gesamtsumme der Quadrate [23].

Bei der Best-Subsets-Regression werden zuerst alle Ein-Parameter-Regressionen durchgeführt und anhand ihrer  $R^2$ -Werte sortiert. Dann werden alle Zwei-Parameter-Regressionen durchgeführt usw., bis zum Modell, das alle Parameter enthält.

Mit ansteigender Parameteranzahl führt jede zusätzlich eingefügte Variable immer weniger zur Verbesserung des Modells. Es reicht daher ein Modell mit nur einigen Parametern aus, um das Verhalten der Outputvariablen zu beschreiben [23, 24].

### 2.2.9 Varianzanalyse - ANOVA

Varianzanalyse ist insofern ähnlich der Regression, als dass sie benutzt wird, um Abhängigkeiten zwischen einer Antwortgröße und einem oder mehreren Faktoren zu entdecken. Allerdings unterscheidet sich die Varianzanalyse von der Regression unter anderem darin, dass Faktoren auch qualitativer Natur sein können. Die ANOVA erweitert den t-Test über die Gleichheit zweier Populationsmittelwerte zu einer generellen Nullhypothese, dass alle Untergruppen gleich sind. Gegen diese wird getestet. Die Varianzanalyse testet also die Gleichheit von Untergruppenmittelwerten einer Variablen. Die aufgeteilte Variable hat gewöhnlich drei oder mehr Stufen, wobei bei qualitativen Größen eine Stufe z.B. das jeweils angewendete Verfahren darstellt.

### 2.2.10 Der $\epsilon^2$ -Wert

Haben mehrere Faktoren Einfluss auf eine Zielgröße, sind die Beiträge der einzelnen Faktoren an der Gesamtwirkung üblicherweise verschieden groß. Um den praktischen Einfluss eines Faktors auf die Zielgröße zu bestimmen, z.B. den Einfluss der Temperatur auf die BSB-Abbauraten, kann der  $\epsilon^2$ -Wert bestimmt werden. Es ist der Quotient aus der Summe der Quadrate ( $SS_{\text{Faktor } i}$ ) für den betrachteten Faktor und der Gesamtsumme der Quadrate ( $SS_{\text{ges.}}$ ) ( vgl. Kap 3.2.3).

$$\epsilon^2 = \frac{SS_{\text{Faktor } i}}{SS_{\text{ges.}}} \quad (\text{Gl. 2-21})$$

$$SS = \sum_{i=1}^i (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{Gl. 2-22})$$

Der  $\epsilon^2$ -Wert gibt an, welcher Anteil der Gesamtstreuung sich durch die Streuung des betrachteten Faktors erklären lässt. Die Bestimmung des  $\epsilon^2$ -Werts ist innerhalb der Statistik umstritten, er gibt jedoch einen guten Hinweis auf die praktische Signifikanz einer Auswirkung [24].

### 3 Angewandte statistische Verfahren

In diesem Kapitel werden die mathematischen Verfahren vorgestellt, die zur Charakterisierung der Kläranlage verwendet wurden, sowie diejenigen, mit denen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Betriebsparametern und der Abbauleistung aufgezeigt wurden. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge dient als Grundlage zur Identifizierung der Betriebsbedingungen, die zu hohen und stabilen Abbauleistungen führen bzw. erlaubt Aussagen hinsichtlich kritischer Parameter und Parameterbereiche. Mit diesem Wissen ist es dann möglich, die Leistung und Robustheit der Anlage zu verbessern.

Zunächst wird auf die Eigenschaften der Datenreihen und die Verteilung der Antwortgrößen eingegangen. Die beschreibende Statistik und die Notwendigkeit ihrer Anwendung wird erläutert.

Dann werden die zur Anwendung gekommenen statistischen Verfahren exemplarisch erläutert und die Grenzen ihrer Aussagekraft bezüglich der realen Bedingungen gegenübergestellt.

Da die Ergebnisse für die einzelnen Abbau-Größen nicht unbedingt konform sein müssen, wird abschließend auf die Behandlung der Ergebnisse der verschiedenen Abbau-Größen eingegangen.

Alle statistischen Untersuchungen werden mit MINITAB<sup>®</sup> Statistical Software, Version 12 durchgeführt [27].

#### 3.1 Statistische Verfahren zur Charakterisierung der Anlage und die Notwendigkeit ihrer Anwendung

Um den Zustand der Abwasserreinigungsanlage (ARA) zu beschreiben, braucht man zunächst Informationen über die Wertebereiche, über die sich die einzelnen Betriebsparameter sowie die Abbauwerte erstrecken. Außerdem benötigt man Kenntnis über die Verteilung der Datenreihen der einzelnen Antwortgrößen, da die Anwendung

einiger statistischer Werkzeuge, wie die Varianzanalyse, von einer Normalverteilung der Ergebnisgrößen, also der Abbauwerte, ausgeht.

Man bedient sich hierbei der beschreibenden Statistik. Es wird der Minimal- und Maximalwert einer jeden Datenreihe berechnet, um die Streubreite der einzelnen Betriebsparameter aufzuzeigen. Der Medianwert, der als 50%-Quantil einer geordneten Datenreihe unempfindlicher gegenüber Ausreißern ist als der Mittelwert, wird berechnet, um durch Vergleich mit dem Mittelwert Informationen bezüglich Vorhandensein von Ausreißern und Symmetrie der Verteilung zu bekommen. Liegen Mittelwert und Median nah beieinander, hat man ein Indiz dafür, dass die Verteilung symmetrisch ist und die Anzahl der Ausreißer klein ist oder dass sich ihr Einfluss gegenseitig aufhebt.

Darüber hinaus wird für jede Ergebnisgröße ein Test auf Normalverteilung durchgeführt, da zahlreiche statistische Tests streng genommen nur anwendbar sind, wenn die Antwortgröße normalverteilt ist[10]. Sind die Werte einer Datenreihe nicht normalverteilt und das Histogramm, die graphische Darstellung der Häufigkeit für das Auftreten der Messwerte [12], lässt eine logarithmisch-normale Verteilung vermuten, werden die Werte entsprechend transformiert und anschließend deren Logarithmen auf Normalverteilung getestet.

Zudem ist es wichtig, die Streubereiche der Einfluss-Parameter zu kennen, da alle Aussagen in bezug auf Korrelation und Einfluss auf die Abbauwerte nur für das jeweils betrachtete Intervall gelten. Findet man z.B. keine Korrelation zwischen der Phosphat-P-Fracht und den CSB-Abbauwerten, heißt das lediglich, dass sich bei einem Phosphat-P-Gehalt zwischen 0,7 und 102 kg, wie im Zeitraum vom 15.8. – 30.9.97 in Stufe II beobachtet, keine lineare Abhängigkeit zum CSB-Abbau finden lässt. Es jedoch nicht der Schluss zu ziehen, dass die Phosphat-Fracht grundsätzlich keinen Einfluss auf den CSB-Abbau hat. Ist das Ergebnis der ANOVA, dass z.B. der CSB-Abbau mit steigendem Verhältnis BSB/CSB zunimmt, gilt auch das nur für den in die Varianzanalyse einbezogenen Wertebereich. Eine Extrapolation gemäß „je höher desto besser“ ist nicht erlaubt.

Außerdem ist die Kenntnis der Streubereiche für Vergleiche zwischen den beiden biologischen Abbaustufen innerhalb einer Phase bzw. zwischen beiden Phasen

unerlässlich. Letzteres bezieht sich auf die Verallgemeinerung der Ergebnisse. Erhält man für beide Phasen die gleichen Ergebnisse, also die gleichen Abhängigkeiten der Abbauwerte von den Betriebsparametern, kann das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren als erfolgversprechend zur Charakterisierung und zur Optimierung der Leistungsfähigkeit der ARA angesehen werden. Doch auch hier lässt sich nur gleiches mit gleichem vergleichen. So erhält man für die Stufe I der Phase I, die einen relativ kurzen Zeitraum im Sommer erfasst, keine Abhängigkeit des Abbauverhaltens von der Temperatur, wobei die Temperatur zwischen 27,3 und 33,4°C schwankte. Für die Stufe I der Phase II, die einen Zeitraum von anderthalb Jahren erfasst, sieht das anders aus. Man erhält einen signifikanten Einfluss der Temperatur, die hier im Bereich von 19,8 bis 32,2°C liegt. Es leuchtet ein, dass man hier von der Verschiedenartigkeit der Ergebnisse, kein signifikanter Einfluss - signifikanter Einfluss, nicht auf Nicht-Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und damit auf eine Nicht-Anwendbarkeit der Methode schließen kann.

Prüft man auf Gleichheit der Ergebnisse der beiden Phasen, ist es also unerlässlich, die jeweiligen Schwankungsbreiten der Einfluss-Parameter zu beachten. Darüber hinaus ist auch der Umfang des Datenmaterials zu berücksichtigen, da davon die Anzahl der Freiheitsgrade abhängt.

Der Test auf Normalverteilung ist wichtig, da die vorgestellte Methode die Varianzanalyse beinhaltet. Sie geht von einer Normalverteilung der Daten aus. Ist diese nicht gegeben, sind die Aussagen, die man machen kann, weniger scharf bzw. die Entscheidungen bei gegebener Datenlage sind riskanter [28]. In diesem Fall sind die Ergebnisse nach statistischer Auswertung besonders zu begutachten und bezüglich ihrer Richtigkeit zu prüfen. Sind die Datenreihen logarithmisch-normal verteilt, wie es oft bei Messungen nahe einer Grenze der Fall ist, bietet sich alternativ an, die Datenreihe zu transformieren, mit den logarithmierten Werten die Varianzanalyse durchzuführen und dann die Werte wieder zurück zu transformieren. Die Transformation führt zu einer Lageverschiebung des Mittelwerts sowie zu unsymmetrischen Vertrauensintervallen.

Auch durch Eliminieren von Ausreißern kann man versuchen, eine Normalverteilung zu erreichen oder dieser näher zu kommen. Hierbei wird die Standardabweichung der Verteilung verringert.

Eine Reihe von Tests, so auch der F-Test, der bei der Varianzanalyse angewendet wird, ist robust gegenüber Abweichungen von der Normalverteilung, d.h. es ergibt sich oft kein Schaden, wenn keine Normalverteilung vorliegt [10]. Allerdings ist das nicht unbegrenzt der Fall. So kann sich eine Datentransformation oder die Eliminierung von extremen Werten durchaus als sinnvoll erweisen.

Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch einen Test auf Normalverteilung, einmal für die CSB-Frachten in Stufe I der Phase II und einmal für die logarithmierten Werte. Dabei zeigt die Kurve die aus Mittelwert und Standardabweichung der Messwerte berechnete Normalverteilung. Das Histogramm zeigt die Häufigkeitsverteilung der Messwerte. Die Messwerte sind mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95% normalverteilt, wenn der angegebene p-Wert höher als 0,05 ist.

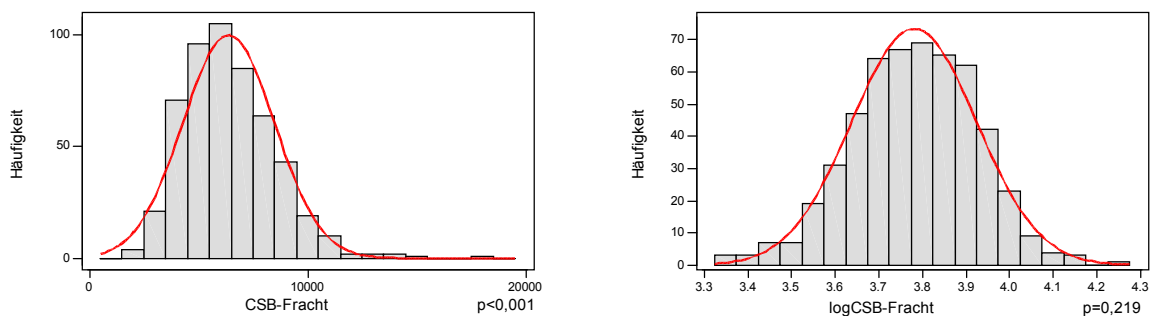


Abb. 3-1: Test auf Normalverteilung die CSB-Fracht in Stufe I der Phase II für a) die ursprünglichen Werte mit  $p < 0,001$  und b) die logarithmierten Werte mit  $p = 0,219$

### 3.2 Statistische Verfahren zur Identifizierung abbaurelevanter Parameter und zur Bestimmung kritischer bzw. unkritischer Parameter-Bereiche

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, Zusammenhänge zwischen den einzelnen Betriebsparametern und der Abbauleistung aufzuzeigen.

Da routinemäßig sehr viele Parameter erfasst werden, erscheint es zunächst sinnvoll, die Anzahl der Parameter einzuschränken, wobei solche mit großer Wirkung auf das Abbauverhalten von denen mit nur untergeordnetem Einfluss unterschieden werden



sollen. Daraufhin werden die einzelnen Niveaus der verbleibenden Einfluss-Parameter auf ihre Wirkung hinsichtlich der Abbauwerte untersucht. Damit sollen stabile und anfällige Bereiche sowie solche mit maximaler Leistung identifiziert werden. Darüber hinaus ist es wünschenswert, den jeweiligen Einfluss zu quantifizieren.

Für diese Aufgabenstellung brauchbar erscheint ein dreistufiges Verfahren., welches die Schritte Korrelationsanalyse zur Reduzierung der Anzahl der Parameter, multiple Regressionsanalyse zur weiteren Verminderung der Parameteranzahl und gleichzeitiger Modellbildung sowie Varianzanalyse zur Untersuchung der Einfluss-Parameter auf verschiedenen Stufen beinhaltet.

### 3.2.1 Korrelationsanalyse

Durch die Korrelationsanalyse wird zunächst geprüft, ob es einen mathematischen linearen Zusammenhang zwischen der Parametereinstellung und der Abbauleistung gibt. Ist dieser gegeben, wird der Parameter beibehalten, ist dieser nicht gegeben, wird der entsprechende Parameter verworfen. Dadurch werden Parameter ohne Einfluss auf die Abbauraten und solche mit großer Wirkung identifiziert, und die Anzahl der noch zu untersuchenden Parameter wird so vermindert.

Dafür werden sämtliche Korrelationskoeffizienten mit dazugehörigen p-Werten bestimmt. Es wird ein Signifikanzniveau von 95% gewählt. Also wird bei einem p-Wert unter 0,05 die Nullhypothese verworfen und Korrelation angenommen. Das entspricht einer Wahrscheinlichkeit von über 95%, dass die Nullhypothese "es besteht keine Korrelation" falsch ist.

Allerdings bleibt zu berücksichtigen, dass durch Korrelation hier nur auf lineare Abhängigkeiten getestet wird. Es sind aber auch andere Verläufe denkbar, wie z.B. ein quadratischer Zusammenhang mit Maximum bzw. Minimum; diese Abhängigkeit wird durch die Korrelationsanalyse nicht entdeckt. Die folgende Abbildung (Abb. 3-2) zeigt einige denkbare Zusammenhänge zwischen den Abbauwerten  $y$  und der Größe der Einfluss-Parameter  $x$ . Dabei hängt bei a) das Abbauverhalten nicht vom Parameter  $x$  ab, es wird keine Korrelation gefunden. Bei b) hängen die Abbauwerte linear vom Parameter  $x$  ab, es wird Korrelation gefunden. Ein quadratischer Zusammenhang zwischen  $x$  und  $y$  besteht bei c), es wird keine Korrelation gefunden. Bei d) besteht bis

zu einem bestimmten Wert des Parameters  $x$  ein linearer Zusammenhang zwischen Abbauverhalten und Einflussgröße, darüber hinaus hat  $x$  keine Wirkung auf  $y$ , unter Umständen wird auch hier keine Korrelation gefunden.

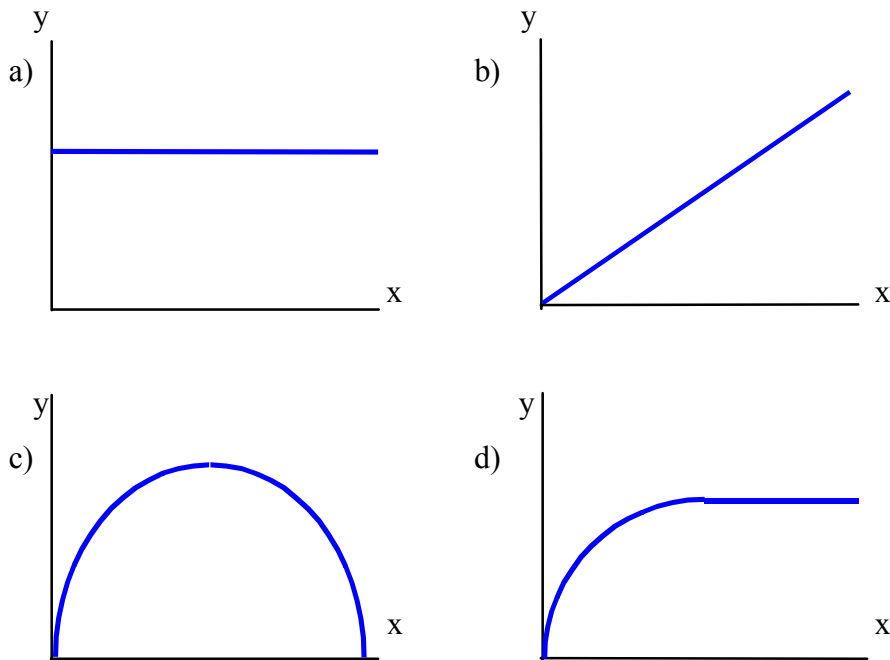


Abb. 3-2: mögliche Abhängigkeiten der Abbauwerte  $y$  von der Größe der Einfluss-Parameter  $x$

### 3.2.2 Best-Subsets-Regressionen

Um die Anzahl der Einfluss-Parameter weiter zu verringern, werden mit den laut Korrelationskoeffizient signifikanten Parametern und den einzelnen Ergebnis-Variablen für das Abbauverhalten Best-Subsets-Regressionen, also multiple Regressionsanalysen, durchgeführt. Hierbei werden durch Modellbildung mehrere relevante Parameter miteinander verknüpft.

Ein Beispiel soll das Prinzip der Best-Subsets-Regressionen veranschaulichen:

Ergebnis-Variable ist CSB-Abbau

45 cases used

Vars	R-Sq	S	C	B	S	b	s	w	a	e	u	i	n	r	z	3	s	h	
1	48.1	10.619																	X
1	46.3	10.795	X																
2	57.2	9.7589		X															X
2	55.8	9.9102		X															X
3	59.7	9.5756			X														X X
3	59.6	9.5881			X														X X
4	62.6	9.3478		X															X X X
4	62.2	9.3984		X															X X X
4	61.8	9.4413	X	X															X X X
4	61.6	9.4693		X	X														X X X
4	61.4	9.4964	X	X															X X X
5	63.2	9.3866	X	X															X X X X
5	62.9	9.4197		X	X														X X X X
6	63.5	9.4769	X	X															X X X X X
6	63.3	9.4911	X	X	X														X X X X X
7	63.5	9.5922	X	X	X														X X X X X
7	63.5	9.5960	X	X	X	X													X X X X X
8	63.6	9.7165	X	X	X	X	X												X X X X X

Abb. 3-3: Best-Subsets-Regression für CSB-Abbau Stufe II. Vars gibt die Anzahl der Variablen in dem jeweiligem Modell an, R-sq ist der Bestimmtheitskoeffizient, s die Standardabweichung und oben links sind die Faktoren aufgeführt, die für die Modellbildung zur Verfügung stehen. Ein X bedeutet, dass der entsprechende Faktor im Modell berücksichtigt wurde.

Dargestellt ist das Ergebnis der Best-Subsets-Regression für den CSB-Abbau der Stufe II in Phase I, und zwar mit den nach Korrelationsanalyse signifikanten Einflussparametern. Diese sind oben rechts in der Abbildung 3-3 aufgeführt. Jede Zeile repräsentiert ein Modell. Die erste Spalte (Vars) gibt die Anzahl der Variablen an, die im Modell berücksichtigt wurden. In der zweiten (R-sq) und dritten Spalte (s) sind der Bestimmtheitskoeffizient  $R^2$  und die entsprechende Standardabweichung s angegeben, die ein Maß für die Güte des jeweiligen Modells sind. Durch X werden die im Modell berücksichtigten Parameter gekennzeichnet. Es sind jeweils die beiden besten Modelle

mit 1, 2, 3 usw. Parametern aufgeführt.

Es fällt auf, dass mit ansteigender Parameteranzahl jeder zusätzlich eingefügte Parameter immer weniger zur Verbesserung des Modells beiträgt, so dass sich eine „optimale“ Anzahl der Parameter bestimmen lässt.

Auf den Informationsgewinn durch die Anwendung dieses statistischen Werkzeuges wird im nächsten Kapitel eingegangen.

### 3.2.3 Varianzanalyse (ANOVA)

Um die einflussreichen Parameter detaillierter zu untersuchen, wird eine Varianzanalyse durchgeführt. Dafür werden die Werte jeder Inputvariablen in fünf Untergruppen aufgeteilt. Die einzelnen Untergruppen werden nach Fisher paarweise verglichen. Dabei wird untersucht, ob jeweils zwei Untergruppen der gleichen Grundgesamtheit angehören oder nicht. So sollen jeweils diejenigen Wertebereiche bestimmt werden, die zu einer Veränderung der Outputvariablen, also der Abbauleistungen, führen. Dadurch werden stabile und anfällige Bereiche sowie solche mit maximaler Leistung identifiziert. Der jeweilige Einfluss kann durch Vergleich der Mittelwerte der einzelnen Untergruppen sowie durch die Berechnung von  $\varepsilon^2$  quantifiziert werden.

Die Einteilung der Parameterwerte in verschiedene Untergruppen kann auf zwei Arten erfolgen. Zum einen so, dass der Streubereich in gleich große Intervalle zerlegt wird, jeder Unterbereich also gleich groß ist und zum anderen so, dass jede Untergruppe gleich stark besetzt ist. Aufgrund der Zufälligkeit der einzelnen Werte (und der Fragestellung hinsichtlich maximalen Leistungsfähigkeit der ARA) erscheint es sinnvoll, den Wertebereich in gleich große Segmente aufzuteilen. Die Untergruppen eines Parameters sind dann einheitlich, untereinander vergleichbar und besser handhabbar bei Nachtrag weiterer Werte. Da jedes Intervall verschieden stark besetzt ist, bekommt man noch Informationen über den Teil des gesamten Streubereichs, in dem sich die Mehrheit der Messwerte befindet, was einer weitergehenden Charakterisierung des Zustands der ARA entspricht. Gleich große Intervalle wichten einen Bereich mit wenigen und vielen Messwerten in gleichem Maße. Daher bietet sich diese Vorgehensweise an, wenn man Aussagen über besonders hohe oder besonders niedrige Parameterwerte, die in der Regel nicht so häufig auftreten, machen will.

Allerdings geschieht dies um den Preis hoher Standardabweichungen, die eventuell statistisch abgesicherte Aussagen unmöglich machen können. Abbildung 3-4c) zeigt eine solche Unterteilung.

Erfolgt die Untergliederung so, dass die einzelnen Untergruppen gleich stark besetzt werden, besitzt jede Untergruppe gleich große Vertrauensintervalle basierend auf der gebündelten Standardabweichung. Die Größe des Vertrauensintervalls hängt von der Besetzung der Untergruppe ab. Eine schwache Besetzung führt zu einem großen Vertrauensintervall und je größer das Vertrauensintervall ist, um so größer muss der Unterschied der Mittelwerte zweier Untergruppen sein, damit die zwei Untergruppen signifikant verschieden sind. So scheinen gleich große Vertrauensintervalle geeignet, um Unterschiede zwischen Untergruppen unter gleichen Bedingungen zu ermitteln.

Darüber hinaus lassen sich aufgrund der gleichen Besetzungsdichte der Untergruppen die Standardabweichungen der Ergebnisgrößen in den einzelnen Untergruppen direkt miteinander vergleichen. Eine Verringerung der Standardabweichung kann hier gleichgesetzt werden mit einem stabileren Betriebsbereich des entsprechenden Parameters.

Gleich starke Besetzung der Untergruppen führt dazu, dass in dem Bereich, in dem die meisten Parameterwerte liegen, die Intervalle kleiner sind als in den Bereichen geringer Wertedichte. Das führt zu detaillierteren Ergebnissen im Bereich hoher Wertedichten.

Das Ergebnis einer solchen Unterteilung ist in Abbildung 3-4b) dargestellt.

Je nach Art der Unterteilung, lassen sich also verschiedene Informationen gewinnen. In dieser Arbeit werden beide Arten durchgeführt und zur Auswertung herangezogen.

Ausschlaggebend bei der Auswertung der ANOVA ist der p-Wert. Er gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass alle Untergruppen einer Grundgesamtheit angehören. Es wird ein Signifikanzniveau von 95% angenommen, d.h. bei einem p-Wert unterhalb von 0,05 gehört mit 95%iger Wahrscheinlichkeit mindestens eine Untergruppe einer anderen Grundgesamtheit an.

Als weitere Größe wird der  $\varepsilon^2$ -Wert gebildet. Es ist der Quotient aus der Summe der Quadrate (SS) für den betrachteten Faktor und der Gesamt-Summe der Quadrate (TotalSS). Der  $\varepsilon^2$ -Wert gibt an, wie viel Prozent der Gesamtstreuung sich durch die Streuung des betrachteten Faktors erklären lässt.

Als Beispiel wird die Varianzanalyse des BSB-Abbaus in Stufe II mit dem Parameter orgTS gezeigt. Der Teil b) zeigt den Untergruppenvergleich bei Unterteilung des Streubereichs in Intervalle mit gleich starker Besetzung, Teil c) bei Unterteilung in gleich große Segmente.

a)

Source	DF	SS	MS	F	P
orgTS	4	184,17	46,04	5,16	0,002
Error	40	356,84	8,92		
Total	44	541,01			

mit DF als Anzahl der Freiheitsgrade, SS als Summe der Quadrate, MS als mittlere Summe der Quadrate, F als F-Wert und p als p-Wert.

b)

				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev			
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----			
1	9	91,823	4,228	(-----*-----)			
2	9	95,348	4,112		(-----*-----)		
3	9	96,918	1,557			(-----*-----)	
4	9	97,270	0,870			(-----*-----)	
5	9	96,871	2,576			(-----*-----)	
Pooled StDev = 2,987				90,0	93,0	96,0	99,0

c)

				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev			
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----			
1	7	90,57	3,87	(---*---)			
2	8	94,77	4,18		(---*---)		
3	21	97,15	1,20			(---*---)	
4	8	96,73	2,72			(---*---)	
5	1	97,98	0,00			(-----*-----)	
Pooled StDev = 2,70				90,0	95,0	100,0	105,0

Unter Level sind die einzelnen Untergruppen aufgeführt, N gibt die Anzahl der Meßwerte je Untergruppe an, Mean gibt den Mittelwert der Ergebnis-Größe der Untergruppen an, StDev die jeweilige Standardabweichung. Daneben sind die Vertrauensintervalle der einzelnen Untergruppen dargestellt.

Fortsetzung folgt auf nächster Seite

d)

Fisher's pairwise comparisons

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	1	2	3	4
2	-6,371 -0,680			
3	-7,941 -2,250	-4,415 1,276		
4	-8,293 -2,602	-4,768 0,923	-3,198 2,493	
5	-7,894 -2,203	-4,368 1,323	-2,798 2,893	-2,446 3,245

Abb.3-4: Varianzanalyse von orgTS für den BSB-Abbau Stufe II in Phase I mit Fisher-Vergleich; a), b) und d) bezieht sich auf eine Einteilung gemäß gleich starker Besetzung der Untergruppen, bei c) liegen gleich große Intervalle vor

Man erkennt in Abb. 3-4a am p-Wert von 0,002, dass der Parameter orgTS die BSB-Abbauleistung signifikant beeinflusst. Dabei berechnet Minitab die Wahrscheinlichkeit  $p$ , dass der betrachtete Unterschied nicht signifikant ist und die Nullhypothese somit aufrecht erhalten werden kann; d.h., wenn  $p = 0,1$ , dann hat man nur 10% Sicherheit für die Aufrechterhaltung der Nullhypothese, der Unterschied mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% signifikant.

Der  $\epsilon^2$ -Wert berechnet sich als Quotient der Faktorstreuung und der Gesamtstreuung, die als Summe der Quadrate (SS) angegeben ist. In diesem Fall berechnet sich der  $\epsilon^2$ -Wert aus den Werten 184,17 und 541 und beträgt somit 34,0%, was hieße, es liegt zu 34% an dem Parameter orgTS, dass man verschiedene BSB-Abbauwerte hat. Da alle Inputvariablen nicht unabhängig voneinander sind, ist die Höhe des  $\epsilon^2$ -Werts eher als Richtwert zu betrachten; so ist die Summe aller  $\epsilon^2$ -Werte auch deutlich über 100%.

In den Abbildungen 3-4b und 3-4c sind die Besetzung der einzelnen Untergruppen, deren Mittelwerte und Standardabweichungen aufgeführt. Ferner sieht man die Erstreckungsbereiche der einzelnen Untergruppen entsprechend ihrer Vertrauensintervalle.

Im Fisher-Vergleich (Abb. 3-4d) gehören zwei Untergruppen der gleichen Grundgesamtheit an, wenn das jeweilige Wertepaar verschiedene Vorzeichen hat. Hier lässt sich demnach sagen, dass sich die Untergruppe 1 von allen anderen signifikant unterscheidet, während alle anderen Untergruppen der gleichen Grundgesamtheit angehören. Beim Vergleich der Standardabweichungen dieser Untergruppen in Abbildung 3-4b sieht man, dass Untergruppe 2 eine höhere Standardabweichung aufweist als die Untergruppen 3 – 5. Man erhält also eine Verbesserung, wenn man den Parameter orgTS so einstellt, dass er über dem oberen Grenzwert von Untergruppe 2 liegt.

Dies hätte eine Verbesserung der BSB-Abbaurrate im Vergleich mit orgTS-Massen unterhalb des unteren Grenzwertes der Untergruppe um gut 4% zur Folge, wie der Vergleich der Mittelwerte von Untergruppe 1 und Untergruppen 2 – 5 in Abbildung 4-3b zeigt.

Außerdem nimmt die Streuung auf ungefähr die Hälfte im Vergleich zu orgTS-Werten unterhalb von Level 3 ab. Damit steigt der Anteil der Werte nahe des Mittelwerts. Eine Graphik, die die Messwertverteilung innerhalb der einzelnen Untergruppen zeigt, möge dies nochmals veranschaulichen:

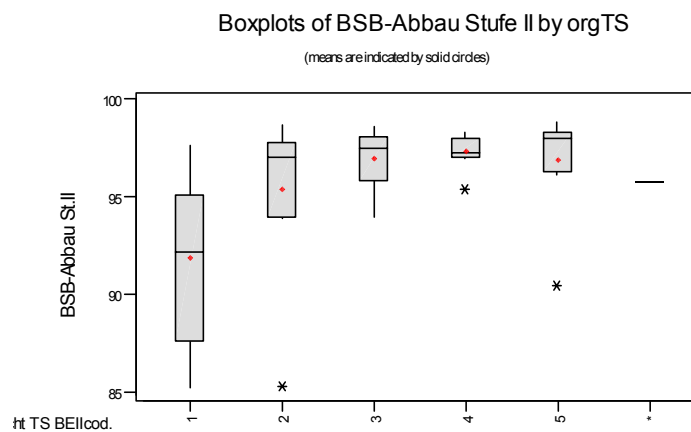


Abb. 3-5: Boxplot des Parameters orgTS für den BSB-Abbau in Stufe II

Wie schon erwähnt, geht die Anzahl der Messungen in die Berechnung der Standardabweichung und damit auch in die Berechnung des Vertrauensintervalls ein. Je



höher die Anzahl der Messungen, desto geringer wird die Standardabweichung und desto kleiner wird das Vertrauensintervall. Bei einer Vielzahl von Messwerten lassen sich also Änderungen als signifikant nachweisen, die bei einer geringeren Anzahl von Werten nicht als signifikant entdeckt wurden. Dies ist bei dem Vergleich der Ergebnisse aus Phase I, der 45 Messwerte zu Grunde liegen, und Phase II, mit 526 Werten, zu berücksichtigen (vgl. Kap. 6.1 und 6.4.2).

Bei der Auswertung der Phase I ist es, im Gegensatz zu Phase II, wahrscheinlicher, dass Effekte nicht erkannt werden, weil sie zu klein sind. Umgekehrt dazu ist in Phase II das Auftreten von Artefakten wahrscheinlicher, d.h. man weist statistisch Unterschiede nach, die wahrscheinlich gar nicht existieren (vgl. Kap. 6.4.2).

Um das oben vorgestellte Konzept, bestehend aus Korrelationsanalyse, multipler Regressionsanalyse und Varianzanalyse, auf Gebrauchstauglichkeit zu prüfen, wird die ANOVA mit allen Parametern durchgeführt. So wird geprüft, ob durch die vorhergehenden Schritte ein Parameter verworfen worden ist, der die Abbauleistung doch signifikant beeinflusst (vgl. Kap. 6.5).

### 3.3 Behandlung der Ergebnisse

Als Ergebnis der Varianzanalyse erhält man Auskunft über das Verhalten eines Einfluss-Parameters hinsichtlich nur einer Ergebnisgröße. Da jede Einfluss-Größe auf ihre Wirkung auf drei Abbau-Kennzahlen untersucht wird, sind verschiedene Szenarien möglich.

Zum einen können alle Ergebnisse übereinstimmen. Man ermittelt beispielsweise, dass sich eine bestimmte Mindestmenge CSB-Fracht sowohl für den CSB-Abbau als auch für die BSB- und CSB-SA-Abbauraten positiv auswirkt. Zum anderen können die Ergebnisse unterschiedlich sein, ohne sich gegenseitig zu beeinträchtigen. So kann z.B. die CSB-Abbauraten kontinuierlich mit zunehmender Menge an TS steigen, während sich ein Anstieg beim BSB-Abbau nur bis zu einem bestimmten Wert abbaufördernd auswirkt und darüber hinaus keine Wirkung mehr zeigt. Beide Szenarien sind unproblematisch. Anders sieht es bei gegenläufigen Ergebnissen aus, wenn die Zunahme eines Parameters zur Zunahme einer Abbau-Größe und zur Abnahme einer

anderen führt. Ist dies der Fall, muss gegeneinander abgewogen und ein Kompromiss gefunden werden.

Der Vergleich der einzelnen Ergebnisse erfolgt visuell, indem man die Untergruppenvergleiche eines System-Parameters (vgl. Abb. 3-2b) für die drei Abbauarten CSB-Abbau, BSB-Abbau und CSB-SA-Abbau gegenüberstellt und vergleicht. Man sucht dabei nach einem Wertebereich des System-Parameters, der sich für alle drei Abbauarten als günstig erweist.

## 4 Untersuchungen am vereinfachten System

In diesem Kapitel wird die Phase I analysiert, also der Zeitraum vom 15.8. bis 30.9.97. Dieser Zeitraum wurde gewählt, da hier durch die verantwortlichen Betreiber der Anlage eine „konstante Biologie“, d.h. eine gleichbleibende Aktivität der abbauenden Mikroorganismen, angenommen wurde und auch darüber hinaus die ARA „gut“ arbeitete.

Dieser stabile Betriebszustand lässt eine vernünftige Interpretierbarkeit der Daten erwarten.

Außerdem ist für eine Methodenentwicklung, wo viel herumprobiert wird, ein kleinerer Datensatz besser zu handhaben.

Zusätzlich wird der Parameter Temperatur über den Zeitraum vom 27.1. bis 30.10.97 untersucht.

In Kapitel 5 wird dann ein größerer Zeitraum, nämlich der vom 1.1.98 bis 10.6.99, untersucht. Bei der Auswertung dieser Phase II werden die Ergebnisse bezüglich der Methodik aus Phase I berücksichtigt. Schließlich werden die Ergebnisse hinsichtlich der Relevanz einzelner Betriebs-Parameter auf das Abbauverhalten in beiden Stufen innerhalb einer Phase sowie aus Phase I und II in Kapitel 6 gegenübergestellt und miteinander verglichen. Auf diese Weise wird auf Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und damit auf Gebrauchstauglichkeit der Methodik geprüft.

## 4.1 Charakterisierung der Betriebsparameter und Abbaugrößen

### 4.1.1 Betriebsparameter

Für den Zeitraum 15.8. – 30.9.97 ergeben sich für jeden Parameter bei vollständiger Datenaufnahme 47 Werte. Die Messdaten der Tage 16.9. und 17.9.97 werden nicht berücksichtigt, da hier eine Störung in der ARA vorlag, so dass sich Datenreihen mit maximal 45 Werten ergeben. Dabei wurden die Stoff-Parameter, die als Konzentrationen gemessen wurden, in die entsprechenden Frachten umgerechnet.

Auf ihre Relevanz bezüglich der den Abbau kennzeichnenden Größen CSB-Abbau, BSB-Abbau und CSB-SA-Abbau wurden die in Tabelle 4-1 aufgeführten Einfluss-Parameter untersucht.

Tab. 4-1: Einfluss-Parameter

CSB-Fracht [kg]	BSB-Fracht [kg]	CSB-SA-Fracht [kg]	BSB/CSB
PI [kg]	AOX [kg]	Leuchtbakterien [GL]	VWZ [h]
Gesamt-N [kg]	NO <sub>2</sub> -N [kg]	NO <sub>3</sub> -N [kg]	NH <sub>4</sub> -N [kg]
Gesamt-P [kg]	PO <sub>4</sub> -P [kg]	Sauerstoff [mg/l]	O <sub>2</sub> -Schwankung [mg/l]
TS [kg]	orgTS[kg]	Temperatur [°C]	

Die Werte der Einfluss-Parameter weisen eine große Bandbreite auf. Die Wertebereiche der einzelnen Betriebs-Parameter in beiden biologischen Stufen sind in Tabelle 4-2 aufgeführt.

Tab. 4-2: Streubereich der Daten der einzelnen Einfluss-Parameter

	STUFE I		STUFE II	
	MIN	MAX	MIN	MAX
CSB-Fracht [kg]	2611,44	8936,04	1235,3	4640,55
BSB-Fracht [kg]	1707,48	5916,93	490,65	2766,63
CSB-SA-Fracht [kg]	285,88	3173,76	465,23	1873,92
BSB/CSB [kg]	0,550725	0,919220	0,364831	0,737075
PI [kg]	3,8544	50,6619	1,9968	48,3135
VWZ [h]	17,0142	36,4774	18,1265	34,9515
AOX [kg]	3,7328	58,6434		
Leuchtbakterien [GL]	23	440		
Sauerstoff [mg/l]	0,05548	2,66894	1,81788	5,09104
O <sub>2</sub> -Schwankungen [mg/l]	0,09978	6,62622	0,82715	9,90528
Gesamt-N [kg]	34,112	338,874	11,948	248,112
NO <sub>2</sub> -N [kg]	0,210	199,577	0,1073	75,9150
NO <sub>3</sub> -N [kg]	0,611	118,932	1,0390	24,4615
NH <sub>4</sub> -N [kg]	20,365	180,340	10,390	245,340
Gesamt-P [kg]	0,9222	43,9756	2,496	106,991
PO <sub>4</sub> -P [kg]	0,4392	33,680	0,707	102,438
TS [kg]	8336,5	37597,9	10450,7	51294,9
orgTS [kg]	3868,1	25679,4	7200,5	32777,4
Temperatur [°C]	27,3	33,4	28,0	37,0

Aus Tabelle 4-2 geht hervor, dass sich die Bereiche der Parameter in Stufe I und Stufe II mitunter stark voneinander unterscheiden. Dies ist bei dem späteren Vergleich der Ergebnisse beider Stufen zu beachten. So lassen sich die Ergebnisse der einen Stufe nicht einfach auf die zweite Stufe übertragen. Zunächst sind also beide Stufen als individuelle Systeme anzusehen. Es gibt jedoch bei allen Betriebsparametern Überschneidungsbereiche. Bei den Überschneidungsgebieten lassen sich die Ergebnisse

beider Stufen gegenüberstellen. Dadurch lässt sich herausfinden, ob trotz verschiedener Einzelstoffzusammensetzung beide Stufen analog reagieren.

Betrachtet man Summen-Parameter wie CSB- und BSB-Fracht, erkennt man, dass in Stufe I die Werte um den Faktor 3 variieren, in Stufe II erhöht sich dieser Wert auf 4-5. Bei spezifischeren Größen wie dem Phenolindex PI oder dem Phosphat-Gehalt ist die Spannweite noch viel größer. Außerdem lässt sich ablesen, dass in Stufe II im Mittel für weniger abzubauen Fracht mehr Biomasse, ausgedrückt in TS und orgTS, zur Verfügung steht.

Um Informationen darüber zu erhalten, wie die Einfluss-Größen verteilt sind, werden jeweils die Mittel- und Median-Werte gebildet und miteinander verglichen. Liegen beide Werte nah beieinander, ist von einer symmetrischen Verteilung um den Mittelwert auszugehen. Ist der Median viel größer oder kleiner als der Mittelwert, heißt das, dass die Mehrheit der Messwerte höher bzw. niedriger als der Mittelwert ist und dass es einige Extremwerte am Rand des Streubereichs gibt. Dieses hat Auswirkungen auf die Informationen, die man durch die ANOVA erhält und wird später diskutiert. Tabelle 4-3 zeigt den Vergleich der Mittelwerte mit dem Median.

Tab. 4-3: Mittelwerte und Mediane der einzelnen Einfluss-Parameter

	STUFE I		STUFE II	
	Mittelwert	Median	Mittelwert	Median
CSB-Fracht [kg]	5202	5139	2353	2330
BSB-Fracht [kg]	3758	3702	1269	1304
CSB-SA-Fracht [kg]	1444	1348	1083	1042
BSB/CSB [kg]	0,724	0,720	0,528	0,539
PI [kg]	22,12	20,03	10,3	8,2
VWZ [h]	23,0	21,8	25,9	25,3
AOX [kg]	17,7	15,1		
Leuchtbakterien [GL]	103	90		
Sauerstoff [mg/l]	1,2	1,0	2,8	2,7
O <sub>2</sub> -Schwankungen [mg/l]	2,4	2,6		
Gesamt-N [kg]	133	140	77,9	60,6
NO <sub>2</sub> -N [kg]	25,2	17,4	2,6	0,4
NO <sub>3</sub> -N [kg]	25,1	14,1	3,5	2,7
NH <sub>4</sub> -N [kg]	21,9	20,3	71,8	55,3
Gesamt-P [kg]	19,4	21,8	19,6	17,1
PO <sub>4</sub> -P [kg]	3,5	2,3	12,0	10,6
TS [kg]	17305	16611	29485	31450
orgTS [kg]	10135	10077	18300	19578
Temperatur [°C]	31,0	31,8	33,4	34,0

Anhand Tabelle 4-3 zeigt sich, dass die Mittelwerte und die entsprechenden Median-Werte bei vielen Parametern, insbesondere den Summen-Parametern, nur wenig voneinander abweichen. So beträgt beispielsweise der Unterschied beider Werte für die CSB-Frachten in Stufe II nur 23 kg oder anders ausgedrückt 1%. Auch für die meisten anderen Parameter bewegen sich die relativen Unterschiede im einstelligen Prozentbereich. Nur für die Einzelstoff-Parameter wie die Stickstoff- oder Phosphor-Werte treten erhebliche Abweichungen der Medianwerte von den arithmetischen

Mitteln auf, wie bei  $\text{NH}_4\text{-N}$  in Stufe II, wo die Differenz 30% bezogen auf den Median ausmacht. Da der Median unempfindlich gegenüber extremen Werten ist, bedeutet das, dass einige sehr hohe  $\text{NH}_4$ -Werte vorliegen; die Mehrheit der Messwerte jedoch im unteren Wertebereich liegt.

#### 4.1.2 Abbau-Größen

Um die Leistungsfähigkeit der ARA zu beschreiben, wird der Einfluss der Betriebsparameter auf die Abbaukennzahlen CSB-Abbau, BSB-Abbau und CSB-SA-Abbau untersucht. Diese sind ein Maß für die Leistungsfähigkeit der Anlage.

Auch die Abbauwerte erstrecken sich über einen gewissen Bereich. Dieser ist in Tabelle 4-4 dargestellt.

Tab. 4-4: Streubereich der Daten der einzelnen Abbau-Kenngrößen

	Stufe I		Stufe II	
	Minimum [%]	Maximum [%]	Minimum [%]	Maximum [%]
CSB-Abbau	71,1	91,8	10,3	82,5
BSB-Abbau	83,6	99,4	85,2	98,8
CSB-SA-Abbau	-16,31	84,1	-33,7	65,2

Man erkennt, dass die Abbauraten im Schnitt in Stufe I höher sind als in Stufe II.

Besonders niedrige Abbauraten findet man in beiden Stufen für den CSB-SA-Abbau. Dabei lassen sich auch negative Abbauwerte beobachten. Diese tauchen an 2 Tagen auf und lassen sich mit der Bildung schwer abbaubarer Substanzen erklären und könnten beim Metabolismus der Bakterien entstehen.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass der BSB-Abbau unproblematisch verläuft. Dies drückt sich durch die hohen Abbauraten in beiden Stufen und den relativ kleinem Streubereich aus.

Der CSB- und der CSB-SA-Abbau hingegen weisen insgesamt niedrigere Abbauraten und einen höheren Streubereich auf. Dabei beobachtet man die niedrigen Abbauraten besonders beim CSB-SA-Abbau und beim CSB-Abbau in Stufe II.



Bei diesen Größen liegt also das größte Verbesserungspotential vor.

Betrachtet man die Verteilungen der Abbau-Größen, sieht man, dass sich die Verteilung der Werte für den CSB-Abbau in Stufe I und den CSB-SA-Abbau in Stufe II mit einer Gauß-Kurve beschreiben lassen. Bei den anderen Ergebnis-Größen ist dies jedoch nicht der Fall. Obwohl diese Verteilungen eine Links-Schiefe aufweisen, d.h. die Mehrzahl der Abbauwerte befinden sich im oberen Teil des Streubereichs und es treten nur einige Werte bei niedrigen Abbauraten auf, ließ sich durch Transformation mit  $-\log x$  keine Verbesserung der Verteilung hinsichtlich Normalverteilung erzielen.

Infolgedessen wurden die Abbauwerte in ihrer Ursprungsform beibehalten.

Abbildung 4-1 zeigt die Verteilung der CSB-SA-Abbauwerte in Stufe I.

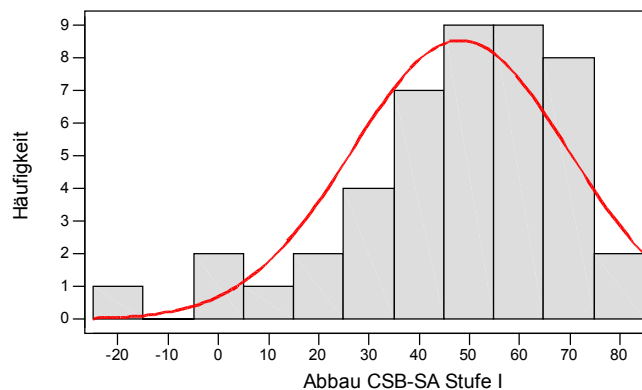


Abb. 4-1: Histogramm mit Gauß-Kurve für die Werte CSB-SA-Abbau Stufe I,  $p = 0,021$

Als  $p$ -Wert für den Test auf Normalverteilung erhält man 0,021, für die negativen logarithmierten Werte ergibt sich  $p < 0,001$  (vgl. Tab 4-5). Man erreicht durch Transformation also keine Verbesserung. Dabei erfolgt der Normalverteilungs-Test nach Anderson-Darling [21, 22]. Dabei erhält man selbst für recht gut symmetrisch verteilte Daten allenfalls  $p$ -Werte im Bereich von 0,2, d.h. immer noch 80% Wahrscheinlichkeit für Abweichung vom idealen Modell der Normal-Kurve. Doch selbst bei  $p \geq 0,05$  ist diese Abweichung noch klein genug, d.h. tolerierbar, so dass man mit dem Normalverteilungs-Modell weiterarbeiten darf. Für sehr schiefe Verteilungen

ist  $p < 0,001$  (vgl. Kap 3, Abb.3-1). Die Nullhypothese für den Test auf Normalverteilung lautet, dass die Daten einer Normalverteilung folgen. Ist der p-Wert des Testes niedriger als die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  (wobei  $\alpha = 1 - \text{Signifikanzniveau}$ ), wird die Nullhypothese verworfen.

Für die anderen Abbauwerte erhält man als Ergebnis des Tests auf Normalverteilung die in Tabelle 4-5 aufgeführten folgende p-Werte, und zwar zum einen für die Original-Abbauwert und zu anderen für die negativ logarithmierten Werte.

Tab. 4-5: p-Werte der Tests auf Normalverteilung, Schranke für Zurückweisung von Normalverteilung bei  $p \leq 0,05$

Abbau-Größe	Stufe I		Stufe II	
	p für Originalwerte	p für transf. Werte	p für Originalwerte	p für transf. Werte
CSB-Abbau	0,639	0,504	<0,001	<0,001
BSB-Abbau	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
CSB-SA-Abbau	0,021	<0,001	0,246	0,054

Es ergibt sich also für keine der Abbau-Größen eine Verbesserung der Werteverteilung hinsichtlich Normalverteilung, wenn man die Originalwerte mit  $-\log x$  transformiert.

## 4.2 Identifizierung abbaurelevanter Parameter und Bestimmung kritischer bzw. unkritischer Parameter-Bereiche

Im folgenden wird die Anwendung der in Kapitel 3 erläuterten statistischen Verfahren Korrelationsanalyse, multiple Regressionsanalyse und ANOVA beschrieben und ihre Ergebnisse dargestellt.

### 4.2.1 Korrelationsanalyse

Es werden sämtliche Korrelationskoeffizienten mit dazugehörigen p-Werten bestimmt.

Bei einer Datenmenge von 45 Werten (24 für die Temperatur) wird ein Signifikanzniveau von 95% gewählt. Also wird bei einem p-Wert unter 0,05 - das entspricht einer Wahrscheinlichkeit von über 95%, dass die Nullhypothese falsch ist - die Nullhypothese verworfen und Korrelation angenommen. Der entsprechende Korrelationskoeffizient, ab dem Korrelation vorliegt, ist 0,290.

Eine Auflistung aller Korrelationskoeffizienten mit dazugehörigem p-Wert findet sich im Anhang.

Es treten nicht nur Korrelationen zwischen den Einfluss-Parametern und den Abbau-Werten auf, sondern auch unter einzelnen Einfluss-Parametern. Diese Korrelationen sind zum Teil sachlich nachvollziehbar, wie die zwischen TS und orgTS, wo ein Parameter von dem anderen abgeleitet wurde. Andere Korrelationen lassen sich weniger gut oder nur als Zufallskorrelation erklären, wie z.B. die zwischen VWZ und TS in Stufe I. Auch einzelne Outputvariablen, also verschiedene Abbauraten, korrelieren, da die BSB-Mengen in den CSB-Werten enthalten sind und somit auch deren Abbauraten. Korrelationen zwischen Einfluss-Parametern sind zu berücksichtigen, wenn man die Korrelation zwischen Einfluss-Parameter und Abbau-Größe betrachtet, weil diese nicht mehr eindeutig nur auf den einen betrachteten Parameter zurückzuführen ist. Hängt z.B. die BSB-Abbaurrate von der CSB-Fracht ab, die aber wiederum stark mit der BSB-Fracht korreliert, kann zunächst nicht eindeutig entschieden werden, welches nun der ausschlaggebende Faktor ist. In diesem Beispiel ist es klar, dass beide Faktoren die Abbaurrate beeinflussen, da der eine ein Teil des anderen ist. Bei Zufallskorrelationen ist die Lage jedoch schwieriger. Das führt zu Unsicherheiten, die jedoch bei der Anzahl der Faktoren nicht zu vermeiden sind.

In folgenden Tabellen sind diejenigen Parameter mit ihren Korrelationskoeffizienten mit den Abbau-Größen aufgeführt, die bei den einzelnen Abbauraten signifikante Korrelationskoeffizienten aufweisen.

Tab. 4-6a: Korrelationskoeffizienten der signifikanten Einfluss-Parameter in Stufe I

	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA-Abbau
CSB-Fracht	0,343		0,414
BSB-Fracht	0,351		
CSB-SA-Fracht			0,761
BSB/CSB			-0,731
AOX-Fracht			0,344
PI-Fracht		-0,424	
Sauerstoff	0,369	0,666	
O <sub>2</sub> -Schwankungen	0,331	0,491	
NO <sub>2</sub> -N			0,326
TS	0,346		
orgTS	0,338		

Tab. 4-6b: Korrelationskoeffizienten der signifikanten Einfluss-Parameter in Stufe II

	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA-Abbau
CSB-Fracht	0,601	0,605	0,533
BSB-Fracht	0,681	0,724	0,454
CSB-SA-Fracht	0,305		0,516
BSB/CSB	0,612	0,731	
Sauerstoff	-0,543	-0,546	-0,406
VWZ	0,297	0,400	
NO <sub>2</sub> -N		-0,465	
NO <sub>3</sub> -N	-0,328	-0,431	
TS	0,693	0,641	0,554
orgTS	0,678	0,623	0,539
Temperatur	-0,504	-0,347	-0,586

Im folgenden werden von den 19 (Stufe I) bzw. 17 (Stufe II) Einfluss-Parametern nur diejenigen weiteruntersucht, die sich anhand der Korrelationsanalyse als signifikant erwiesen haben. Dies sind bei den einzelnen Abbauraten je nach Art und Stufe drei bis zehn Parameter. Eine erste Reduktion der Parameteranzahl ist durch Korrelationsanalyse also möglich, wenn auch mit unterschiedlich großem Erfolg.

Allgemein erkennt man, dass in Stufe II mehr Parameter mit den verschiedenen Abbauraten korrelieren als das in Stufe I der Fall ist. Außerdem weisen die Korrelationskoeffizienten in Stufe II im Schnitt höhere Werte auf. Ein höherer Korrelationskoeffizient steht für einen ausgeprägteren und damit statistisch wahrscheinlicheren Zusammenhang zwischen zwei Größen. Schließlich ist in Stufe II bei den einzelnen Abbaugrößen eine höhere Übereinstimmung an korrelierenden Parametern auszumachen.

Besonders für Stufe I gilt, dass jede Abbau-Größe für sich selbst zu betrachten ist. So zeigt sich, dass Parameter, die mit einer Abbauart korrelieren, auf eine andere keinen Einfluss haben. Weist ein Einfluss-Parameter mit verschiedenen Abbau-Größen Korrelation auf, lassen sich erfreulicherweise innerhalb einer Stufe keine gegensätzlichen Korrelationen beobachten. Man beobachtet also nicht, dass die Erhöhung eines Einfluss-Parameters für eine Abbau-Größe zur Verbesserung der Abbauraten führt und für eine Abbau-Größe hingegen zur Verschlechterung.

In Stufe II zeigt sich schon eher, dass sich ein Parameter für alle Abbauarten gleich auswirkt. So lässt sich für CSB-Fracht, BSB-Fracht, Sauerstoff, TS, orgTS und Temperatur ein Zusammenhang zwischen der Höhe der Parameter und der Werte aller Abbauraten feststellen.

Konträre Einflüsse sieht man beim Vergleich beider Stufen. Betrachtet man die Parameter BSB/CSB und Sauerstoff, variieren die Vorzeichen der Korrelationskoeffizienten in beiden Stufen. Man hat also einmal eine Abnahme und einmal eine Zunahme der Abbauraten mit steigenden Werten der Inputvariablen.

Man kann weiterhin feststellen, dass es Einfluss-Parameter gibt, die für eine Abbauart in Stufe I wichtig sind, in Stufe II jedoch keine Rolle spielen und umgekehrt. Dies sind z.B. BSB/CSB für den CSB-SA-Abbau in Stufe I bzw. für den CSB- und BSB-Abbau in

Stufe II oder die VWZ, die nur in Stufe II für den CSB- und BSB-Abbau eine Rolle spielt.

Das unterschiedliche Verhalten lässt sich zum einen mit den verschiedenen Wertebereichen der Parameter in beiden Stufen erklären, zum anderen mit der unterschiedlichen qualitativen Abwasserzusammensetzung.

#### **4.2.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Korrelationsanalyse**

Es lässt sich also zusammenfassen, dass Stufe I und Stufe II zwei unabhängige Systeme darstellen, dass sich also die Ergebnisse der ersten Stufe nicht ohne weiteres auf die zweite Stufe übertragen lassen. Des Weiteren wirkt sich eine Veränderung der Einflussparameter unterschiedlich auf jede Abbauart aus.

#### **4.2.3 Best Subsets Regression**

Um die Anzahl der Inputvariablen weiter zu verringern, werden mit den laut Korrelationskoeffizient signifikanten Parametern und den einzelnen Outputvariablen Best-Subsets-Regressionen durchgeführt. Die Temperatur allerdings wird herausgenommen, da hier nur 22 Werte zur Verfügung stehen und in Folge dessen sämtliche Regressionen auch nur anhand von 22 Werten durchgeführt werden würden. Bei der Anwendung fällt auf, dass mit ansteigender Parameteranzahl jeder zusätzlich eingefügte Parameter immer weniger zur Verbesserung des Modells beiträgt. So liegt bei den durchgeführten Berechnungen die „optimale“ Anzahl der Parameter zwischen drei und fünf.

Es ist anzumerken, dass teilweise wegen zu starker Korrelation einzelner Inputvariablen untereinander für eine Outputvariable mehrere Regressionen durchgeführt werden mussten, um alle Inputvariablen zu erfassen. Mit Minitab können viele Input-Variablen, also System-Parameter, verarbeitet werden. Das Programm prüft dann intern auf Korrelation der Inputvariablen und erlaubt es nicht, eine Best-Subsets-Berechnung durchzuführen, falls der Datensatz diesbezüglich nicht eindeutig ist..

Bei Unabhängigkeit der einzelnen Betriebs-Parameter erwartet man, dass sich das beste Modell mit zwei Parametern aus denjenigen Variablen zusammensetzt, die die beiden



ersten vier Zeilen also schon vier verschiedene Einfluss-Parameter auf. Da man grundsätzlich auf der Suche nach den besonders einflussreichen Parametern ist und nicht unbedingt nach einem mathematischen Modell, das die Wirklichkeit beschreibt, würde man einen Fehler machen, wenn man sich für eines dieser Modelle und deren Parameter entscheidet und die wichtigen Parameter aller niedrigeren Modelle ignoriert.

Bei einer Erweiterung des Modells von vier (Zeilen 7 – 11) auf fünf (Zeilen 12 – 13) Parameter zeigt sich keine nennenswerte qualitative Verbesserung des Modells, die  $R^2$ -Werte steigen von 62,6 auf 63,2 für das jeweils beste Modell. Addiert man noch alle weiteren Parameter der niedrigeren Modelle und die CSB-SA-Fracht, die in einer anderen Best Subsets Regression im zweitbesten Drei-Parameter-Modell enthalten ist, ebenfalls hinzu, kommt man auf sieben anstelle von neun Parametern. Der Reduktionseffekt ist also nur als sehr gering anzusehen.

Betrachtet man nun alle ausgewiesenen Vier-Parameter-Modelle, erkennt man, dass sich hier die einzelnen  $R^2$ -Werte nur geringfügig voneinander unterscheiden. Es spielt also annähernd keine Rolle, mit welchen vier Parametern man das Abbauverhalten beschreibt.

Ähnliche Beobachtungen lassen sich auch für die anderen durchgeführten Best-Subsets Regressionen machen. Das führt zu dem Schluss, dass in diesem speziellen Fall Best-Subsets-Regressionen nur bedingt geeignet sind, stark die Abbauleistung beeinflussende Parameter von weniger einflussreichen Parametern zu unterscheiden und somit die Anzahl der Parameter weiter zu reduzieren.

Da die  $R^2$ -Werte angeben, welcher Anteil der Veränderung der Output-Variablen, also der Abbau-Größen, sich durch die Veränderung der Einfluss-Parameter erklären lässt, kann man durch Vergleich der  $R^2$ -Werte feststellen, wie gut sich überhaupt die Abbauleistung mit den vorhandenen Variablen darstellen lässt. Man sieht also, wie gut das Modell die Wirklichkeit beschreibt.

Die Ergebnisse aus den Best-Subsets-Regressionen sind in Tabelle 4-7 zusammengestellt, wobei die Anzahl der optimalen Parameter den Wert angibt, bei dem die Erweiterung des Modells um einen Parameter zu keiner nennenswerten



Verbesserung des Modells mehr führt. In der Spalte „Parameter“ sind alle Einfluss-Größen aufgeführt, die im betrachteten sowie bei allen niederen Modellen aufgetreten sind, und zwar bei Berücksichtigung der jeweils zwei besten Modelle. Dabei entspricht die erste Zeile (CSB-Abbau) der Tabelle 4-7b den Ergebnissen aus Abbildung 4-2. Den übrigen Zeilen beider Tabellen liegen Ergebnisse zugrunde, die der Kürze halber nicht aufgeführt sind.

Tab. 4-7a: Ergebnisse der Best-Subsets-Regressionen für Stufe I

Output-Variable	Anzahl der „optimalen“ Parameter	zugehöriger R <sup>2</sup> -Wert des besten Modells	Parameter
CSB-Abbau	3	44,4	Sauerstoff, BSB-Fracht, CSB-Fracht, O <sub>2</sub> -Schwankungen
BSB-Abbau	2	51,9	Sauerstoff, PI, O <sub>2</sub> -Schwankungen
CSB-SA-Abbau	2	66,2	CSB-SA-Fracht, BSB/CSB, CSB-Fracht

Tab. 4-7b: Ergebnisse der Best-Subsets-Regressionen für Stufe II

Output-Variable	Anzahl der „optimalen“ Parameter	zugehöriger R <sup>2</sup> -Wert des besten Modells	Parameter
CSB-Abbau	4	62,6	TS, orgTS, BSB/CSB, NO <sub>3</sub> -N, CSB-Fracht, CSB-SA-Fracht, BSB-Fracht
BSB-Abbau	4	74,6	BSB/CSB, BSB-Fracht, CSB-Fracht, TS, VWZ, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N
CSB-SA-Abbau	3	39,8	TS, orgTS, CSB-Fracht, BSB-Fracht, CSB-SA-Fracht, Sauerstoff

Es lässt sich zusammenfassen, dass in Stufe II ein bis zwei Parameter mehr im Modell eingebaut sind als in Stufe I, bevor eine Erhöhung der Parameteranzahl keine erhebliche Verbesserung des Modells mehr zur Folge hat. So sind es in Stufe I zwei bis drei Parameter, in Stufe II drei bis vier. Gleichzeitig ist die Anpassung des Modells für den CSB- und den BSB-Abbau in Stufe II 18% bzw. 23% besser als in Stufe I.

Ein umgekehrtes Verhalten hat man beim CSB-SA-Abbau. Hier erhält man sogar mit geringerer Parameteranzahl eine deutlich bessere Anpassung des Modells; 62,6% im Gegensatz zu 39,8%. So bleibt festzuhalten, dass man auch hier für jede Ergebnis-Größe und in jeder Stufe verschiedene Ergebnisse erhält. Das Abbauverhalten lässt sich jeweils verschieden gut durch die Parameter ausdrücken. Es bleibt jedoch festzustellen, dass der CSB-SA-Abbau in Stufe I sowie der CSB- und BSB-Abbau in Stufe II relativ gut mit den entsprechenden Inputvariablen beschrieben werden können.

Die Verringerung der Parameteranzahl im Vergleich zur Korrelationsanalyse ist, wie schon oben angeführt, nur von geringem Ausmaß.

Im einzelnen ergibt sich, wobei die Temperatur wegen der geringeren Anzahl der Messwerte unberücksichtigt bleibt, für Stufe I:

CSB-Abbau: Reduktion von sechs auf vier Parameter, TS und orgTS fallen weg.

BSB-Abbau: keine Reduktion

CSB-SA-Abbau: Reduktion von fünf auf drei Parameter, NO<sub>2</sub>-N und AOX fallen weg.

Für Stufe II:

CSB-Abbau: Reduktion von neun auf sieben Parameter, VWZ und NO<sub>3</sub>-N fallen weg

BSB-Abbau: Reduktion von neun auf sieben Parameter, Sauerstoff und orgTS fallen weg.

CSB-SA-Abbau: keine Reduktion

Da bei der Best-Subsets-Regression in den vorgeschlagenen Modellen hauptsächlich Parameter zu Zuge kommen, die unabhängig voneinander sind, kommt es vor, dass bei zwei Parametern mit hohem Korrelationskoeffizienten, wie TS und orgTS oder CSB-Fracht und BSB-Fracht, die ihrerseits stark untereinander verknüpft sind, in einem Best-

Subsets-Modell nur jeweils einer vorkommt. So lässt sich auch erklären, warum beim BSB-Abbau in Stufe II orgTS herausfällt, TS hingegen nicht.

#### 4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Best-Subsets-Regressionen

Zusammenfassend kann man sagen, dass man durch die Best-Subsets-Regression mit den  $R^2$ -Werten ein Maß für die Qualität der Beschreibbarkeit der Abbauraten mit den Betriebsparametern erhält und damit auch für die zu erwartende Verbesserung.

Reduktion der Parameteranzahl ist dann am besten möglich, wenn bei der Erweiterung eines Modells um eine Variable diese sukzessive hinzugefügt wird, ohne dass eine der bisherigen herausfällt. Dies ist hier nicht der Fall. Somit stellt die Best-Subsets-Regression hier nicht unbedingt eine adäquate Methode dar.

#### 4.2.5 Varianzanalyse ANOVA

Mit der Varianzanalyse wird die Wirkung der einzelnen Einfluss-Parameter auf die Abbau-Kenngrößen detaillierter untersucht, indem der Streubereich einer jeden Einfluss-Größe in fünf Unterbereiche unterteilt wird. Es wird dann getestet, ob sich eine Untergruppe bezüglich der Abbauwerte signifikant von den anderen unterscheidet. Dies ist für ein Signifikanzniveau bei einem p-Wert unter 0,05 der Fall. Mit dem  $\epsilon^2$ -Wert lässt sich die Wirkung des jeweiligen Einfluss-Parameters quantifizieren. Er gibt den Anteil der Gesamtstreuung an, der dem Einfluss-Parameter zuzuordnen ist.

In der nachstehenden Tabelle 4-8 sind alle für die nach Korrelationsanalyse signifikanten Faktoren die p- und  $\epsilon^2$ -Werte aufgeführt. Dabei erfolgte eine Unterteilung des Wertebereichs in gleich große Intervalle.

Eine vollständige Tabelle, die alle Einfluss-Parameter und auch die Unterteilung in gleich stark besetzte Intervalle beinhaltet, findet sich im Anhang.

Tab. 4-8a: Ergebnistabelle zur Varianzanalyse für die nach Korrelationsanalyse signifikanten Einfluss-Parameter. Die auch nach der Best-Subsets-Regression noch verbliebenen Inputvariablen sind besternt.

## Stufe I

	CSB-Abbau		BSB-Abbau		CSB-SA-Abbau	
	p-Wert	$\epsilon^2$ -Wert	p-Wert	$\epsilon^2$ -Wert	p-Wert	$\epsilon^2$ -Wert
CSB-Fracht	0,187*	13,7			0,067*	19,3
BSB-Fracht	0,061*	19,3				
CSB-SA-Fracht					0,000*	66,8
BSB/CSB					0,000*	51,7
AOX					0,240	14,2
PI			0,129*	16,0		
Sauerstoff	0,052*	20,4	0,000*	54,3		
O <sub>2</sub> -Schwankungen	0,173*	14,3	0,007*	28,9		
NO <sub>2</sub> -N					0,309	5,4
TS	0,271	11,8				
orgTS	0,211	10,5				

## StufeII

	CSB-Abbau		BSB-Abbau		CSB-SA-Abbau	
	p-Wert	$\epsilon^2$ -Wert	p-Wert	$\epsilon^2$ -Wert	p-Wert	$\epsilon^2$ -Wert
CSB-Fracht	0,000*	42,4	0,000*	51,7	0,015*	25,9
BSB-Fracht	0,000*	54,9	0,000*	64,4	0,028*	23,2
CSB-SA-Fracht	0,221*	12,7			0,009*	28,3
BSB/CSB	0,002*	33,4	0,000*	51,1		
Sauerstoff	0,003*	28,1	0,002	30,7	0,068*	15,8
VWZ	0,004	30,7	0,000*	38,6		
NO <sub>2</sub> -N			0,393*	7,0		
NO <sub>3</sub> -N	0,312	11,2	0,381*	9,9		
TS	0,000*	51,8	0,000*	50,1	0,005*	30,1
orgTS	0,000*	47,2	0,000	46,0	0,007*	29,0
Temperatur	0,321	23,0	0,532	16,1	0,152*	31,2

Der p-Wert gibt die Restwahrscheinlichkeit für die Gültigkeit der Nullhypothese an, d.h. beispielsweise, dass für  $p = 0,061$  (p-Wert für die BSB-Fracht bezüglich des CSB-Abbaus in Stufe I) gilt 6,1% bzw. 93,9% Sicherheit für Nicht-Vorhandensein bzw. Vorhandensein eines Unterschiedes.

Als Ergebnis der ANOVA erhält man als signifikant das Abbauverhalten beeinflussende Faktoren :

Für Stufe I:

CSB-Abbau:	BSB-Fracht, Sauerstoff (allerdings nur wenn Signifikanzniveau 90%)
BSB-Abbau:	Sauerstoff, Sauerstoffschwankungen, (PI nur bei gleich starker Besetzung der Intervalle, sonst als Trend)
CSB-SA-Abbau:	CSB-Fracht, CSB-SA-Fracht, BSB/CSB

Für Stufe II sind dies:

CSB-Abbau:	CSB-Fracht, BSB-Fracht, BSB/CSB, Sauerstoff, (VWZ), TS, orgTS
BSB-Abbau:	CSB-Fracht, BSB-Fracht, BSB/CSB, Sauerstoff, VWZ, TS, orgTS
CSB-SA-Abbau:	CSB-Fracht, BSB-Fracht, CSB-SA-Fracht, (Sauerstoff), TS, orgTS

Eingeklammert sind diejenigen Faktoren, die bei nur einer Untergruppeneinteilung als signifikant identifiziert werden. Hier ist eine genauere Betrachtung anhand der Untergruppenvergleiche nötig

Auch hier ist wie bei der Best-Subsets-Regression die Verminderung der Parameteranzahl gering. Eine weitere Einschränkung ist allerdings auch nicht mehr möglich ist, da alle verbleibenden Faktoren signifikant das jeweilige Abbauverhalten beeinflussen.

Im einzelnen erhält man folgende Ergebnisse, wenn man die ANOVAS aller Einfluss-Parameter mit beiden Unterteilungsvarianten berücksichtigt:

(Die ANOVAs der signifikanten Parameter befinden sich im Anhang)

#### 4.2.6 Ergebnisse für Stufe I

- CSB-Abbau:** Bei **BSB-Frachten** über 2550 kg liegt eine um durchschnittlich 5%, von 79% auf 84%, erhöhte CSB-Abbauleistung vor. 17% der Werte entsprechen nicht dieser wünschenswerten Mindestfracht. Bei **Sauerstoffkonzentrationen** oberhalb von 0,58 mg/l kann man im Durchschnitt höhere Abbauwerte beobachten.
- BSB-Abbau:** Auch hier lassen sich oberhalb von 0,58 mg/l **Sauerstoff** höhere Abbauwerte beobachten, und zwar im Schnitt um gut 4% von 92,5% auf 97%. Zusätzlich verringert sich die Standardabweichung um zwei Drittel. Hier liegen an 37% der Tage geringere Sauerstoffkonzentrationen vor. Beim **Phenolindex** lässt sich als Tendenz festhalten, dass eine Erhöhung des PI zu einer Erniedrigung der BSB-Abbauwerte führt.
- CSB-SA-Abbau:** Tendenziell lässt sich sagen, dass eine Erhöhung der **CSB-Frachten** zu einer Erhöhung des CSB-SA-Abbaus führt. Bei den **CSB-SA-Frachten** beobachtet man bis 1441 kg ein Ansteigen der Abbauraten, außerdem reduziert sich bei höheren Frachten die Standardabweichung drastisch. So erhöht sich die mittlere Abbaurate von 16% über 45% auf über 60%, jedoch genügen nur ca. 44% der Werte diesen Anforderungen. Bezüglich **BSB/CSB** zeigt sich ab einem Wert von  $\geq 0,7$  eine schrittweise Verminderung der Abbauwerte, wobei Werte über 0,85 zu besonders schlechten Ergebnissen führen.

#### 4.2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der ANOVA für Stufe I

Für Stufe I lässt sich zusammenfassen, dass sich Sauerstoffkonzentrationen über 0,58 mg/l günstig auf die Abbauraten auswirken. Zu geringe Frachten wirken sich eher negativ auf den Abbau aus. Es erscheint ratsam, eine Mindestbeladung der Anlage einzuhalten, die für die BSB-Frachten bei 2550 kg und für die CSB-SA-Frachten bei 1441 kg liegt. Außerdem lassen sich durch ein genügend kleines BSB/CSB-Verhältnis

die Abbauraten beim CSB-SA-Abbau positiv beeinflussen. Dieses Verhältnis sollte unter 0,7 liegen.

#### 4.2.8 Ergebnisse für Stufe II

Es sei vorab schon betont, dass man für Stufe II mitunter andere Ergebnisse erhält als für Stufe I. Für die einzelnen Abbau-Größen erhält man folgende Ergebnisse:

**CSB-Abbau:** Bei der Betrachtung der **CSB-Frachten** erkennt man einen deutlichen Anstieg der Abbauraten bei CSB-Frachten oberhalb von 1916 kg, nämlich von im Schnitt 52% auf 72%. Dabei ist der geringe untere Durchschnittswert auch auf die hohen Streuungen in der ersten Untergruppe zurückzuführen. So kommen alle besonders niedrigen Abbauraten bei niedrigen CSB-Frachten vor. An rund einem Drittel aller Tage liegen CSB-Frachten unterhalb von 1916 kg vor.

Ganz analog sieht es bei den **BSB-Frachten** aus. Hier wirken sich BSB-Frachten oberhalb von 945 kg aus.

Beim **BSB/CSB-Verhältnis** führen, im Gegensatz zu Stufe I, Werte oberhalb von 0,51 zu einer Verbesserung der Abbauraten um 16% von 50% auf 66%, wobei auch hier der geringere Mittelwert teilweise auf hohe Streuungen zurückzuführen ist; weitere Steigerungen führen im wesentlichen zu einer Verringerung der Standardabweichung.

Beim Parameter **Sauerstoff** lässt sich feststellen, dass steigende Sauerstoffkonzentrationen mit fallenden CSB-Abbauraten einhergehen.

Über die **Verweilzeit** lässt sich sagen, dass die vier niedrigsten Abbauraten bei Verweilzeiten unter 24 h auftreten.

Betrachtet man die Variable **TS**, treten die niedrigen Abbauraten bei TS-Massen unterhalb von 26788 kg auf. Höhere TS-Werte zeigen im Schnitt bis zu 25% höhere Abbauwerte (45% zu

70%) und nur halb so große Standardabweichungen. Hier liegen an 28% der Tage TS-Werte unter 26788 kg vor.

Analoge Ergebnisse erhält man für den Faktor **orgTS** bei einer wünschenswerten Mindestmasse von 17431 kg.

**BSB-Abbau:**

Bei **CSB-Frachten** oberhalb von 1916 kg tritt ein Sprung in den Abbauraten von durchschnittlich 93% auf 97% auf. Alle niedrigen Abbauraten beobachtet man bei geringen CSB-Frachten. Außerdem sinkt die Standardabweichung um 80%.

Auch bei den **BSB-Frachten** ist ein Sprung in den Abbauwerten auszumachen. Dieser fällt noch deutlicher aus, nämlich von 91% auf 97% bei BSB-Frachten über 945 kg. Auch hier sinkt die Standardabweichung um 80%. Bei beiden Faktoren weisen ca. 30% der Werte zu niedrige Frachten auf.

**BSB/CSB-Verhältnisse** über 0,44 gehen einher mit erhöhten BSB-Abbauwerten (91% zu 96%); erstrebenswert aufgrund der geringeren Streuungen, entsprechend höherer Stabilität, sind jedoch BSB/CSB-Werte über 0,51.

Für den Parameter **Sauerstoff** lässt sich feststellen, dass im Schnitt hohe Sauerstoffwerte mit niedrigen BSB-Abbauraten einhergehen, wobei sich eine Sauerstoffkonzentration unter 2,47 mg/l als besonders vorteilhaft erweist. Bei höheren Konzentrationen treten auch hohe Standardabweichungen auf.

Für die **Verweilzeit** ist eine Dauer von mindestens 24 h anzustreben, um hohe BSB-Abbauraten um 96% zu erzielen.

Bei dem Faktor **TS** führt ein Anstieg der Masse bis 26788 kg zu höheren BSB-Abbauwerten (abs.%) und einer kleineren Standardabweichung. Ca. 30% der Werte erfüllen diese Bedingung nicht.

Ganz analoges ergibt sich bei der Variablen **orgTS**, mit einer Mindestmasse von 17431 kg.

**CSB-SA-Abbau:**

Bei Betrachtung der **CSB-Frachten** lässt sich eine Erhöhung der CSB-SA-Abbauraten bei Frachten oberhalb von 1916 kg von



durchschnittlich 17% auf 35% beobachten. Zusätzlich verringert sich die Standardabweichung. Rund ein Drittel aller CSB-Frachten ist kleiner als 1916 kg.

Für die **CSB-SA-Frachten** ist eine Mindestmasse von 1112 kg auszumachen. Hierbei lässt sich ein durchschnittlicher Anstieg der Abbauraten von 15% auf 33% ausmachen, wobei an 20% der Tage die Masse CSB-SA unter 1112 kg liegt.

Die **BSB-Fracht** sollte mehr als 945 kg betragen, da dann die mittlere Abbaurate um 20% erhöht (16% zu 36%) und die Standardabweichung um die Hälfte vermindert ist.

Für den Faktor **Sauerstoff** lässt sich feststellen, dass eine Erhöhung der Sauerstoffwerte einhergeht mit einer Erniedrigung der CSB-SA-Abbauraten.

Betrachtet man die Masse **TS**, erkennt man einen Anstieg der Abbauraten von im Mittel 10% über 18% auf 35% bei einer Zunahme der TS-Werte von bis zu 18619 kg über bis zu 26788 kg und darüber liegenden Werten. Gleichzeitig verringert sich die Standardabweichung ab der zweiten Untergruppe ( $TS > 18619$  kg) auf weniger als die Hälfte. An knapp einem Drittel aller Tage sind TS-Werte unter 17431 kg auszumachen. Bei einem Vergleich der Untergruppen 3 und 4, das entspricht TS-Massen von 26788 kg - 34957 kg und 34957 kg - 43126 kg, sieht man eine Zunahme der mittleren Abbauraten von 33% auf 43%. Diese Zunahme ist jedoch nicht eindeutig signifikant und daher nur als Trend anzusehen.

Für den Faktor **orgTS** gilt das gleiche wie für TS, hier ist eine Masse über 17431 kg wünschenswert.

#### 4.2.9 Zusammenfassung der Ergebnisse der ANOVA für Stufe II

Für Stufe II lässt sich zusammenfassen, dass CSB-Frachten oberhalb von 1916 kg erhöhte Abbauraten mit sich bringen. Dies gilt für alle Abbauarten, gemessen in abs.%. Der Effekt ist jedoch verschieden groß, beim CSB-Abbau 20%, beim BSB-Abbau 4%

und beim CSB-SA-Abbau 18%. Dies überrascht keinesfalls, da auch die Abbauraten verschieden groß sind. So ließe sich der BSB-Abbauwert gar nicht um mehr als 7% erhöhen.

Analoges gilt für die BSB-Frachten, wobei eine Masse BSB von über 945 kg anzustreben ist.

Bei den CSB-SA-Frachten sollte eine Mindestmasse von 1112 kg gewährleistet sein, was sich positiv auf die CSB-SA-Abauraten auswirkt und sich bei den anderen Abbaugrößen neutral verhält.

Für den CSB- und BSB-Abbau hat das BSB/CSB-Verhältnis einen starken Einfluss auf die Abbauraten. So sollte dieses Verhältnis höher als 0,51 sein.

Sauerstoffkonzentrationen oberhalb von 2,48 mg/l sind ein Indiz für sinkende Abbauwerte, wobei gilt: je höher die Sauerstoffkonzentration desto niedriger die Abbauraten. Dies lässt sich bei allen drei Abbauraten beobachten.

Für die Verweilzeit bleibt festzuhalten, dass diese mindestens 24 h betragen sollte.

Die Parameter TS und orgTS liefern äquivalente Ergebnisse. Die Generierung des Faktors orgTS führte also nicht zu zusätzlichen Erkenntnissen. TS und orgTS sind bei allen Abbauarten signifikante Faktoren. Dabei führen TS-Massen oberhalb von 26788 kg zu erhöhten Abbauraten, wobei auch hier die Größe des Effekts (in abs%) variiert. Er beträgt beim CSB-Abbau 25%, beim BSB-Abbau 5% und beim CSB-SA-Abbau 25%, wobei beim CSB-SA-Abbau noch eine Tendenz zu noch höheren Abbauraten bei TS-Massen über 34957 kg auszumachen ist.

Es lässt sich erfreulicherweise feststellen, dass man für die verschiedenen Abbauraten fast immer die gleichen Ergebnisse erhält. Ist dies nicht der Fall, so verhält sich ein Parameter mit positivem Effekt gegenüber einer Abbauart zumindest neutral gegenüber den anderen Abbauarten. Man muss hier also keine Kompromisse machen und einzelne Ergebnisse gegeneinander abwägen.

### 4.3 Untersuchung des Parameters Temperatur für den Zeitraum 27.1. – 30.10.97

Die Temperatur ist im Zeitraum der Phase I, nämlich vom 15.8. bis 30.9.97 nahezu konstant, so dass dieser Parameter hier keinen signifikanten Einfluss auf das Abbauverhalten zeigt. Allerdings hängt die biologische Aktivität der abbauenden Mikroorganismen sehr wohl von der Temperatur ab. Um den Einfluss der Temperatur zu beschreiben, wird diese nun zusätzlich über einen längeren Zeitraum untersucht, und zwar vom 27.1. bis 30.10.97.

Für diesen längeren Zeitraum, der in diesem Abschnitt betrachtet wird, lagen als Maß für die Schadstoffbelastung der Anlage nur Konzentrationswerte für CSB in BE I und NK I vor. Daher werden die Abbauraten der Konzentrationen bestimmt. Da die Wassermengen schwanken und das Abwasser in Stufe II nicht nur aus dem Ablauf NK I besteht, führt das besonders in Stufe II zu Ungenauigkeiten, so dass die Ergebnisse aus dieser Stufe nur als grobe Näherung anzusehen sind.

Abbildung 4-3 zeigt den Temperaturverlauf in der BE I. Dabei liegen nicht für alle Tage Temperaturwerte vor.

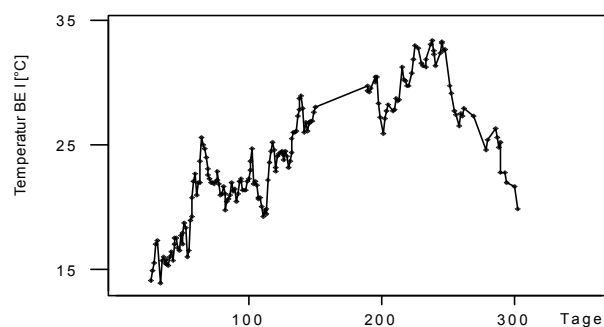


Abb. 4-3: Temperaturen in BE I im Zeitraum vom 27.1. - 30.10.97

Die Temperatur variiert im Belebungsbecken I zwischen 13,9°C und 33,4°C. Zwischen beiden Belebungsbecken liegt der Temperaturunterschied bei +/- 4°C.

Trägt man die Temperatur gegen die CSB-Abbaurrate auf, erhält man für Stufe I folgenden Zusammenhang zwischen beiden Größen:

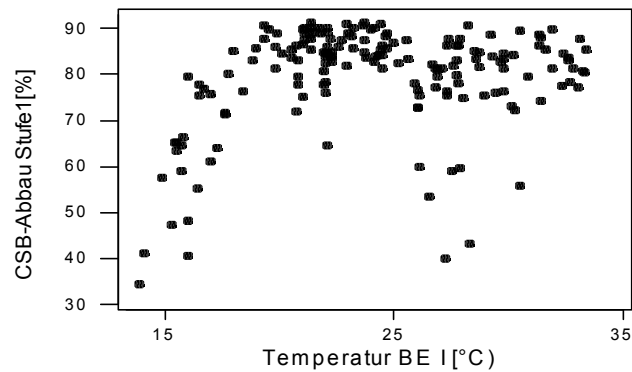


Abb. 4-4: Zusammenhang zwischen der Temperatur [°C] und dem  $CSB_{Konz}$ -Abbau [abs%] in Stufe I

Man erkennt ein starke Abhängigkeit zwischen der Temperatur und der Abbaurrate im Temperaturbereich bis ca. 20°C; hier steigt die Abbaurrate von 35% bis über 70%. Bei höheren Temperaturen streut die Abbaurrate zwischen 70% und 90% ohne einen Trend. Allerdings findet man einige Ausreißer mit Abbauraten bis zu 40%.

Trägt man die Gesamtbaurrate, die sich aus dem Zulauf BE I und dem Ablauf NK II berechnet und die Abbauleistung nach beiden Stufen angibt, gegen die Temperatur im Belebungsbecken I auf (Abb. 4-5), erkennt man, dass zum einen die Anzahl der Ausreißer abgenommen hat und zum anderen die Abbaurrate auf einem etwas höheren Niveau liegt. Im temperaturunabhängigen Bereich finden sich Abbauraten zwischen 75% und 95%. Dieser Bereich beginnt aber auch hier erst bei 20°C.

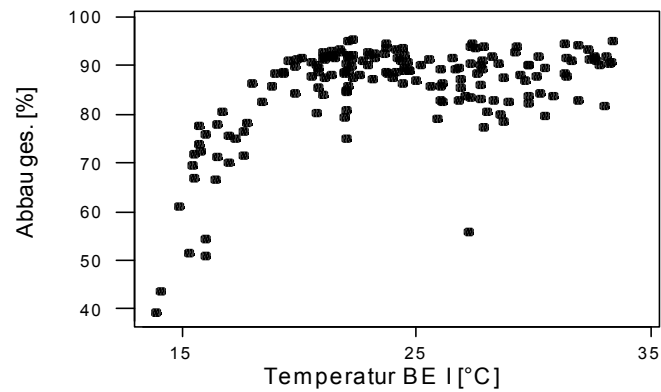


Abb. 4-5: Zusammenhang zwischen der Temperatur [°C] und dem  $CSB_{Konz}$ -Abbau [abs%] nach beiden Stufen

Um den Zusammenhang zwischen der Temperatur und den Abbauraten statistisch auszuwerten, werden Intervalle von jeweils 5°C zu einem Temperaturniveau zusammengefasst und eine Varianzanalyse durchgeführt.

Man erhält:

a)

Analysis of Variance for Abbau Stufe I

Source	DF	SS	MS	F	P
Temp	4	7833.7	1958.4	23.19	0.000
Error	165	13936.6	84.5		
Total	169	21770.4			

b)

Individual 95% CIs For Mean  
Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	
1:<15°C	3	44.401	11.839	(-----*-----)
2:15-20°C	30	72.123	13.446	(-*-)
3:20-25°C	67	85.326	4.884	(-*)
4:25-30°C	46	77.612	11.118	(-*-)
5:>30°C	24	81.196	7.451	(-*-)

-----+-----+-----+-----

Pooled StDev = 9.190 45 60 75

c)

Fisher's pairwise comparisons

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	1	2	3	4
2	-38.71			
	-16.74			
3	-51.63	-17.19		
	-30.22	-9.22		
4	-44.02	-9.75	4.24	
	-22.40	-1.23	11.19	
5	-47.90	-14.04	-0.19	-8.15
	-25.69	-4.10	8.45	0.98

Abb. 4-6: Varianzanalyse der Temperatur für CSB<sub>Konz</sub>-Abbau in Stufe I

Man erkennt hier am  $p$ -Wert (Abb. 4-6a), dass die Temperatur einen signifikanten Einfluss auf die Abbauraten hat. So lassen sich die Abbauraten zu 36% über die Temperatur erklären.

Der Fisher-Vergleich (Abb. 4-6c) zeigt, dass sich die Bereiche 1 und 2 signifikant von den anderen Temperaturbereichen unterscheiden. Level 3 unterscheidet sich von Level 4, nicht aber von Level 5. Das Temperaturintervall 4 unterscheidet sich nicht vom Intervall 5.

Es sind also Temperaturen über 20°C wünschenswert, wobei bei Werten unter 15°C die  $CSB_{Konz.}$ -Abbauwerte besonders niedrig sind.

Für Stufe II erhält man:

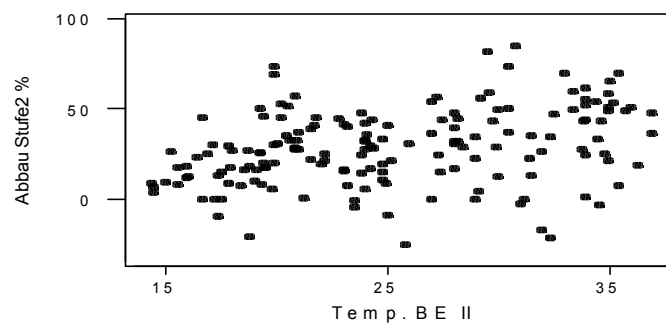


Abb. 4-7: Zusammenhang zwischen der Temperatur [°C] und dem  $CSB_{Konz.}$ -Abbau [abs%] in Stufe II

Die Abbauraten liegen zwischen -31,1% und 84%. Da Konzentrationswerte vorliegen und der Direkteinlauf BE II sowie das Kühl- und Regenwasser keine Berücksichtigung finden, treten negative Abbauraten auf. Die Ergebnisse sind somit, wenn überhaupt, nur als sehr grobe Näherung zu verstehen und können sogar total unzutreffend sein. Daher wird auf eine statistische Auswertung verzichtet.

## **5 Untersuchungen am komplexen System**

Dieses Kapitel befasst sich mit der Analyse der ARA für den Zeitraum vom 1.1.98 – 10.6.99. Die Zusammensetzung des Abwassers ist aufgrund wechselnder Produktion uneinheitlicher als in Phase I. Das geht in die Untersuchung mit ein. Auch der Einfluss der Temperatur kann hier genauer untersucht werden. Damit wird die Aktivität der Mikroorganismen berücksichtigt. Darüber hinaus wird nicht mehr eine stabile Arbeitsweise der ARA vorausgesetzt. In dieser Phase II bestehen die Datenreihen aus maximal 526 Werten.

### **5.1 Charakterisierung der Betriebsparameter und Abbaugrößen**

#### **5.1.1 Betriebsparameter**

Wie schon bei Phase I beschrieben, wurden auch hier die Stoff-Parameter in die entsprechenden Frachten umgerechnet. Die Sauerstoff-Schwankungen konnten nicht mehr berechnet werden, da die Messwertaufnahme des Sauerstoffs in dieser Phase nicht mehr im Minutentakt sondern nur einmal täglich an verschiedenen Stellen im Belebungsbecken erfolgte. Da dieser Parameter in Phase I keinen Einfluss auf die Abbauwerte hatte, ist dies ohne Auswirkung. Es wurde der Einfluss der in Tabelle 5-1 angegebenen Betriebs-Parameter auf das Abbauverhalten analysiert.



Tab. 5-1: Einfluss-Parameter:

CSB-Fracht [kg]	BSB-Fracht [kg]	CSB-SA-Fracht [kg]	BSB/CSB
PI [kg]	AOX [kg]	Leuchtbakterien [GL]	VWZ [h]
Gesamt-N [kg]	NO <sub>2</sub> -N [kg]	NO <sub>3</sub> -N [kg]	NH <sub>4</sub> -N [kg]
Gesamt-P [kg]	PO <sub>4</sub> -P [kg]	Sauerstoff [mg/l]	
TS [kg]	orgTS[kg]	Temperatur [°C]	

### 5.1.2 Zustand der Anlage Phase II

Der Streubereich der Einfluss-Parameter ist für beide Stufen in Tabelle 5-2 wiedergegeben; die entsprechenden Werte für AOX und den Leuchtbakterientest konnten nur für Stufe I bestimmt werden.

Tab. 5-2: Streubereich der Werte der einzelnen Einfluss-Parameter

	STUFE I		STUFE II	
	MIN	MAX	MIN	MAX
CSB-Fracht [kg]	2158,0	18452,0	416,2	6952,8
BSB-Fracht [kg]	1306,9	12384,0	27,8	4299,6
CSB-SA-Fracht [kg]	49,5	6096,5	377,2	4054,5
BSB/CSB [kg]	0,349	0,987	0,02376	0,73039
PI [kg]	1,750	177,766	2,149	122,912
VWZ [h]	8,625	34,547	16,649	40,630
AOX [kg]	5,309	137,446		
Leuchtbakterien [GL]	16	370		
Sauerstoff [mg/l]	0,4	3,1	1,3	9,7
Gesamt-N [kg]	16,53	661,49	0,17	76,71
NO <sub>2</sub> -N [kg]	0,06	327,22	0,10	277,67
NO <sub>3</sub> -N [kg]	0,61	462,5	0,20	233,29
NH <sub>4</sub> -N [kg]	3,05	384,06	8,36	330,2
Gesamt-P [kg]	0,266	165,964	0,386	69,977
PO <sub>4</sub> -P [kg]	0,062	82,871	0,072	17,944
TS [kg]	4452	86961	4163	110689
orgTS [kg]	3213	57047	5140	81246
Temperatur [°C]	19,8	32,2	17,9	29,9

Als Maß für die anfängliche Gesamtbelastung kann man die Werte für die CSB-Fracht in Stufe I betrachten. Man sieht, dass die Menge der Schadstoffe im Abwasser sehr uneinheitlich ist. Sie unterscheidet sich um den Faktor 8,5. Anders ausgedrückt gibt es Tage, an denen keine hohen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der ARA gestellt werden und Tage an denen eine hohe Performance notwendig ist. Doch nicht nur die Schadstoffmasse, also die Quantität, sondern auch die Zusammensetzung der Schadstoffe im Abwasser unterliegt hohen Schwankungen. Obwohl die Zusammensetzung im einzelnen nicht berücksichtigt wird, lässt sich dieses bereits an

den BSB/CSB-Werten ablesen, die das Verhältnis zwischen leicht- und schwer-abbaubaren Stoffen angeben. So schwankt dieses Verhältnis in Stufe I zwischen 1:1 und 1:3. In Stufe II, wo der Großteil der BSB-Fracht schon abgebaut sein sollte, ist dieser Unterschied mit Verhältnissen zwischen 1:1,3 bis 1:42 noch viel ausgeprägter. Besonders hohe relative Schwankungsbreiten weisen die spezifischeren Größen wie die für Stickstoff und Phosphor auf. Betrachtet man TS und orgTS als Kennzahlen für die Biomasse, erkennt man, dass in Stufe II im Mittel für geringere Schadstoffmassen mehr Bakterien Schlamm zur Verfügung steht als in Stufe I.

Mit den Minimal- und Maximalwerten der einzelnen Einflussgrößen kennt man die Extremzustände der ARA. Man hat aber noch keine Information darüber, unter welchen Betriebs-Bedingungen die ARA hauptsächlich arbeitet. Dafür braucht man Kenntnis über die Verteilungen der einzelnen Einfluss-Größen. Dafür werden jeweils Mittel- und Medianwerte bestimmt und miteinander verglichen. Zusätzlich werden die Histogramme erstellt, da eine Übereinstimmung von Mittelwert und Median sowohl Normalverteilung, erhöhte Anzahl von Extremwerten auf beiden Seiten als auch gleichmäßige Verteilung der Werte bedeuten kann. Eine Gleichverteilung der Parameter-Werte ist eher unwahrscheinlich, was sich durch die Auswertung der Histogramme bestätigt. Auch beobachtet man nicht das gemeinsame gehäufte Auftreten von besonders hohen und besonders niedrigen Werten für eine Einfluss-Größe. Das heißt, dass der Vergleich der Mittel und Medianwerte durchaus ausreichend ist. In Tabelle 5-3 werden beide Werte gegenübergestellt.

Tab. 5-3: Mittelwerte und Mediane der einzelnen Einfluss-Parameter

	STUFE I		STUFE II	
	Mittelwert	Median	Mittelwert	Median
CSB-Fracht [kg]	6368	6048	1687	1533
BSB-Fracht [kg]	4710	4463	741	651
CSB-SA-Fracht [kg]	1660	1550	946	897
BSB/CSB [kg]	0,739	0,740	0,414	0,424
PI [kg]	24,4	19,8	16,8	12,4
VWZ [h]	17,7	17,2	26,1	25,5
AOX [kg]	26,0	21,2		
Leuchtbakterien [GL]	64	56		
Sauerstoff [mg/l]	1,8	2,0	6,1	6,5
Gesamt-N [kg]	163	150	16,6	14,1
NO <sub>2</sub> -N [kg]	16,6	8,1	18,1	3,1
NO <sub>3</sub> -N [kg]	31,1	17,3	15,0	7,4
NH <sub>4</sub> -N [kg]	115,4	104,1	70,1	53,0
Gesamt-P [kg]	14,1	8,0	6,1	3,2
PO <sub>4</sub> -P [kg]	1,6	0,5	1,2	0,6
TS [kg]	22046	21910	36366	34723
orgTS [kg]	15930	15936	26181	26136
Temperatur [°C]	24,3	23,7	22,4	21,3

Man erkennt vorwiegend gute Übereinstimmungen zwischen den Mittelwerten und den Medianen, insbesondere bei den Summen-Parametern und Schlamm-Maßzahlen in Stufe I, wo beide Werte um maximal 5% voneinander abweichen. Dabei ist fast allen Einfluss-Größen gemein, dass der Median in Bezug auf den Mittelwert zu niedrigeren Werten verschoben ist. Das bedeutet, dass mehr Werte in der unteren Hälfte des Streubereichs liegen als in der oberen. Dies ist jedoch bei den einzelnen Einfluss-Parametern verschieden stark ausgeprägt, so dass es bei einigen Größen kaum auftritt.

Bei den spezifischeren Einfluss-Größen wie Phenolindex-Stoffe, Stickstoff und Phosphor lassen sich erhebliche Unterschiede zwischen Mittelwert und Median feststellen. Die meisten Werte für diese Parameter liegen im unteren Streubereich, und nur wenige Tage weisen hohe Belastungen dieser Einfluss-Größen auf. Diese Schiefe der Verteilung ist in Abbildung 5-1 am Beispiel des Parameters PI in Stufe II dargestellt.

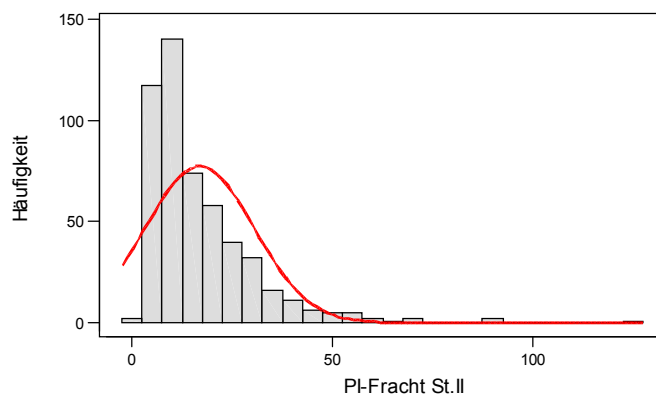


Abb. 5-1: Histogramm mit Normalverteilungs-Kurve für PI in Stufe II

### 5.1.3 Abbau-Größen

Die Kennzahlen, mit denen das Abbauverhalten und damit die Leistungsfähigkeit der ARA beschrieben wird, sind CSB-Abbau, BSB-Abbau und CSB-SA-Abbau.

Der Streubereich dieser Größen ist in Tabelle 5-4 dargestellt.

Tab. 5-4: Streubereich Abbau-Größen

	Stufe I		Stufe II	
	Minimum [%]	Maximum [%]	Minimum [%]	Maximum [%]
CSB-Abbau	30,0	95,0	-108,0	86,0
BSB-Abbau	29,9	99,8	-145,5	98,5
CSB-SA-Abbau	-1225,1	91,7	-186,6	91,5

Es fällt auf, dass in Stufe I für den CSB-SA-Abbau und in Stufe II für alle Kennzahlen negative Werte auftreten. In Stufe I sind 45 von 520, CSB-SA-Abbauwerten negativ. Das sind etwa 9% der Werte, wobei in den Zeiträumen 11.1. – 28.1.98, 8.1. – 1.2.99 und 16.5. – 10.6.99 verstärkt negative Abbauraten vorkommen. In Stufe II erhält man für den CSB-Abbau 37 negative Werte, neun im Zeitraum 7.8. – 20.8.98 und 26 im Zeitraum 29.4. – 10.6.99. Für den BSB-Abbau ergeben sich sieben negative Abbauwerte, wobei drei zwischen dem 8.8. und 16.8.98 und vier zwischen dem 29.4. und 4.5.99 auftreten. Der CSB-SA-Abbau weist in Stufe II 151 negative Werte auf, das sind fast 30% aller Abbauraten. Er stellt also an sich eine kritische Größe dar. Von diesen 151 Werten treten 58 vom 28.7 – 13.11.98 und 37 vom 29.4. - 10.6.99 auf. Somit ergeben sich insbesondere für Stufe II zwei kritische Zeiträume, nämlich vom 7.8. – 20.8. und vom 29.4. – 10.6.99, in denen bei allen Abbau-Kennzahlen negative Werte vorkommen.

Die negativen Abbauraten lassen sich beim CSB-SA-Abbau damit erklären, dass die Bakterien beim Stoffwechsel aus leicht abbaubaren Verbindungen, die im BSB-Wert beinhaltet sind, schwerer abbaubare Substanzen bilden, die nur noch beim CSB-Wert zum Tragen kommen. Beim BSB- und insbesondere beim CSB-Abbau als Summen-Parameter der Gesamtbelastung ist dieser Erklärungsansatz nicht mehr anwendbar. Die negativen Abbauraten, die aussagen, dass das austretende Abwasser stärker belastet ist als es beim Eintritt in das Belebungsbecken II war, ließen sich höchstens mit dem Abbau von Biomasse deuten.

Sucht man unter den Einfluss-Größen nach Zusammenhängen für das Zustandekommen dieses ungünstigen Verhaltens, lässt sich anhand der betrachteten Einfluss-Parameter nur feststellen, dass in den beiden oben angegebenen kritischen Zeiträumen in Stufe II

besonders niedrige BSB/CSB-Werte auftreten. Im Verhältnis zu den CSB-Frachten ist nur sehr wenig BSB-Fracht vorhanden. Zur weiteren Ursachenforschung erscheint es daher notwendig, spezifischere Parameter heranzuziehen oder das Augenmerk auf die Produktion in diesem Zeitraum zu richten, um Aufschluss über die eingeleiteten Substanzen zu bekommen.

Ansonsten lässt sich noch feststellen, dass in Stufe I die minimalen Abbauraten für CSB und BSB gleich hoch sind, obwohl der BSB-Abbau allgemein als unproblematischer anzusehen ist. Darüber hinaus liegen auch die maximalen Abbauraten für alle Kenngrößen im gleichen Bereich.

Betrachtet man die Verteilungen der Abbau-Größen, erkennt man in den Histogrammen eine Schiefe, so dass sich keine Verteilung der Abbauwerte mit einer Gauß-Kurve beschreiben lässt. Auch eine Transformation der Werte mit  $-\log x$  führt zu keiner Verbesserung hinsichtlich Normalverteilung. Daher werden die Abbauwerte in ihrer ursprünglichen Form belassen. Abbildung 5-2 zeigt als Beispiel die Verteilung der Werte für den CSB-Abbau in Stufe I mit Gauß-Kurve.

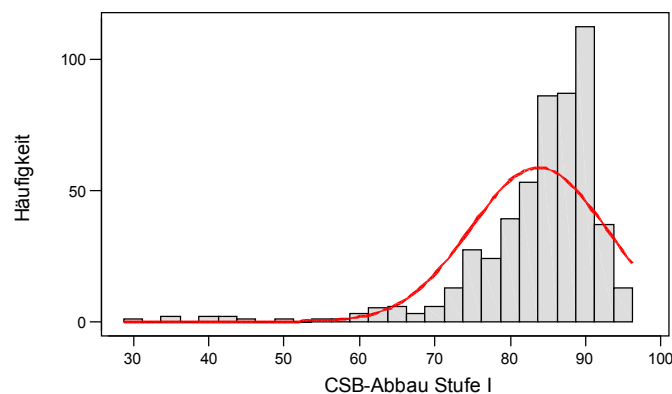


Abb. 5-2: Histogramm der CSB-Abbauraten in Stufe I

Da sich das Auftreten der negativen Abbauraten nicht nur auf einige wenige Einzelfälle beschränkt und man gerade wissen will, warum die ARA schlecht arbeitet, werden diese extremen Werte beibehalten und nicht weggestrichen, auch wenn man durch Wegstreichen statistisch sicherere Aussagen machen könnte. Lediglich zwei Werte für

den CSB-SA-Abbau in Stufe I, nämlich  $-451\%$  am 11.4.98 und  $-1225\%$  am 1.7.98, werden ausgesondert. Durch ihre Größe wird die Mittelwertbildung in der ANOVA unverhältnismäßig stark beeinträchtigt, da Abbauraten nur Werte bis  $100\%$  aufweisen können.

## **5.2 Identifizierung abbaurelevanter Parameter und Bestimmung kritischer bzw. unkritischer Parameter-Bereiche**

Das folgende Kapitel beinhaltet die Anwendung und Auswertung der statistischen Verfahren zur Qualifizierung und Quantifizierung der Zusammenhänge zwischen den Betriebs-Parametern und den Abbau-Kennzahlen. Die Anwendung der Best-Subsets-Regressionen hat im einfachen System (Phase I) zu keinem bedeutenden Informationsgewinn geführt, obwohl nur eine kleine Datenmenge vorlag, mit der insgesamt eine homogene Arbeitsweise der ARA widergespiegelt wurde. Bei der nun vorliegenden großen Datenmenge, die eine insgesamt uneinheitlichere Arbeitsweise der ARA beschreibt, ist daher mit noch weniger konkreten Aussagen zu rechnen. Deshalb wird hier auf den Einsatz dieses statistischen Werkzeuges verzichtet. Damit kommt hier lediglich die Korrelationsanalyse und die ANOVA zum Einsatz. Durch die Korrelationsanalyse soll eine Reduktion der Parameteranzahl erfolgen, so dass die ANOVA nur noch für einige Einfluss-Parameter angewendet zu werden braucht. Als Beleg zur Bestätigung dieses Schrittes wird die Varianzanalyse allerdings trotzdem für alle Einfluss-Parameter durchgeführt. Hierbei erfolgt die Untergruppenbildung wieder auf zwei Arten, zum einen durch Bildung von gleich stark besetzten Untergruppen und zu anderen durch Bildung gleich großer Intervalle.

### **5.2.1 Korrelationsanalyse**

Es werden alle Einfluss-Parameter dahingehend getestet, ob sie Korrelation mit den Abbau-Größen aufweisen. Dafür werden die entsprechenden Korrelationskoeffizienten mit den dazugehörigen p-Werten berechnet. Als Signifikanzniveau wird  $95\%$  gewählt.



Zusätzlich werden alle Betriebs-Parameter dahingehend untersucht, ob sie mit anderen Einfluss-Größen korrelieren.

Da hier Datenreihen mit bis zu 526 Werten untersucht werden und die Anzahl der Werte bei der Betrachtung der Signifikanz eines Zusammenhangs eine Rolle spielt, kommt es dazu, dass hier schon bei sehr niedrigen Korrelationskoeffizienten ein Zusammenhang als signifikant angesehen wird. So beträgt der Korrelationskoeffizient bei einem Signifikanzniveau von 95% und 526 Werten an der Signifikanzschranke 0,09. Dieses Phänomen und seine Auswirkung wird im Nächsten Kapitel, wo die Ergebnisse beider Systeme verglichen werden, eingehender diskutiert (vgl. Kap. 6.1.1).

Die nachstehenden Tabellen zeigen für beide Stufen die Einfluss-Größen, deren Werte mit denen der Abbau-Größen signifikant korrelieren. Angegeben ist der jeweilige Korrelationskoeffizient.

Tab. 5-5a: Korrelationskoeffizienten der signifikanten Einfluss-Größen in Stufe I

	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA-Abbau
CSB-Fracht	0,304		0,377
BSB-Fracht	0,302		0,170
CSB-SA-Fracht	0,172	-0,098	0,648
BSB/CSB	0,093		-0,551
Sauerstoff	-0,417	-0,205	-0,339
NO <sub>3</sub> -N	0,088	0,094	
Gesamt-P [kg]		-0,075	
PO <sub>4</sub> -P [kg]		-0,096	
NH <sub>4</sub> -N [kg]	-0,130	-0,136	-0,131
TS [kg]			0,152
OrgTS [kg]			0,189

Tab. 5-5b: Korrelationskoeffizienten der signifikanten Einfluss-Größen in Stufe II

	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA-Abbau
CSB-Fracht	0,471	0,150	0,435
BSB-Fracht	0,542	0,219	0,379
CSB-SA-Fracht	0,184		0,356
BSB/CSB	0,664	0,484	0,300
Sauerstoff	-0,338	-0,312	-0,256
PI [kg]	0,130		0,130
VWZ	0,133	0,151	
Gesamt-N [kg]	0,267	0,265	0,197
NH <sub>4</sub> -N [kg]	-0,241	-0,112	-0,154
Gesamt-P [kg]	0,127	0,113	0,129
PO <sub>4</sub> -P [kg]			0,089
TS	0,137	0,172	
orgTS	0,162		
Temperatur	-0,636	-0,208	-0,604

Man erhält für Stufe I, wo achtzehn verschiedene Einfluss-Parameter in bezug auf Korrelation analysiert wurden, je nach Abbau-Größe zwischen sechs und acht Parameter, die Korrelation zu den Abbau-Werten zeigen. Für Stufe II wurden sechzehn Einfluss-Größen untersucht, wobei hier zehn bis dreizehn mit den Abbau-Größen korrelieren. Die Anzahl der Einfluss-Parameter, die mit den verschiedenen Abbau-Größen korrelieren, ist somit in Stufe II also höher als in Stufe I.

Insgesamt lässt sich mit Hilfe der Korrelationsanalyse die Anzahl der Betriebs-Parameter reduzieren, wenn auch für beide Stufen bzw. für die unterschiedlichen Abbau-Größen in verschieden starkem Maße.

Beim Vergleich der verschiedenen Abbau-Größen erkennt man, dass die Anzahl der signifikanten Einfluss-Parameter beim BSB-Abbau niedriger ist als bei den anderen Abbau-Kennzahlen. Darüber hinaus sind die Korrelationskoeffizienten beim BSB-

Abbau im Schnitt kleiner. Da ein kleinerer Korrelationskoeffizient ausdrückt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen zwei Größen statistisch weniger wahrscheinlich ist, lässt sich schließen, dass die BSB-Abbauraten weniger von der Größe der Betriebs-Parameter abhängen, als dies etwa für den CSB- oder CSB-SA-Abbau der Fall ist. Dies gilt insbesondere für Stufe I, wo die Korrelationskoeffizienten für den BSB-Abbau besonders niedrige Werte aufweisen. Besteht zwischen einem Betriebs-Parameter und einer Abbaugröße kein Zusammenhang, ist dies gleichbedeutend mit einem robusten Verhalten der Abbau-Größe gegenüber den Betriebsparametern. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass in der Korrelationsanalyse nur auf lineare Zusammenhänge geprüft wird. So ist das Nicht-Auftreten von Korrelation vorerst lediglich ein Indiz auf robustes Verhalten. Ob sich eine Abbaugröße tatsächlich robust gegenüber Schwankungen einer Einfluss-Größe verhält, zeigt sich erst nach der Auswertung der ANOVA.

Wirkt sich der Wert eines Einfluss-Parameters auf mehr als nur eine Abbau-Größe aus, lässt sich feststellen, dass bei fast allen Betriebsparameter die Korrelationskoeffizienten für die verschiedenen Abbau-Kenngrößen das gleiche Vorzeichen besitzen. Man beobachtet also keine konträren Zusammenhänge, dass also die Erhöhung eines Betriebs-Parameters dazu führt, dass eine Abbauraten zunimmt, eine andere hingegen abnimmt. Lediglich beim Verhältnis BSB/CSB in Stufe I ergibt sich für den CSB-Abbau eine positive und für den CSB-SA-Abbau eine negative Korrelation. Dabei ist der Wert des Korrelationskoeffizienten mit  $-0,551$  für den CSB-SA-Abbau viel höher als der für den CSB-Abbau; der erste Zusammenhang ist also statistisch viel abgesicherter. Vergleicht man die Ergebnisse eines Betriebs-Parameter in beiden Stufen, erkennt man, dass auch hier, mit einer Ausnahme, die Korrelationskoeffizienten die gleichen Vorzeichen aufweisen. Die Ausnahme bildet auch hier der Einfluss-Parameter BSB/CSB. In Stufe I ist er negativ, wenn man den CSB-SA-Abbau als Abbaugröße betrachtet, in Stufe II hingegen weist er für alle Abbaugrößen ein positives Vorzeichen auf. Dieses unterschiedliche Verhalten lässt sich mit den unterschiedlichen Wertebereichen dieser Größe in beiden Stufen erklären. So wird der Streubereich in Stufe I durch die Werte  $0,349$  und  $0,987$  begrenzt, In Stufe II durch  $0,0238$  und  $0,7304$ .

Prüft man auf Korrelationen zwischen den einzelnen Einfluss-Größen, lassen sich auch hier statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen zwei Größen feststellen. Dabei treten meistens erwartete Korrelationen auf, wie die zwischen den CSB und BSB-Frachten, wo der kausale Zusammenhang auf der Hand liegt. Es ergeben sich aber auch Zusammenhänge wie die zwischen Phenolindex und Temperatur in Stufe I, wo keine Kausalität gefunden werden kann und die als zufällig auftretende Korrelation anzusehen ist.

Eine vollständige Übersicht der Ergebnisse der Korrelationsanalyse findet sich im Anhang.

#### **5.2.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Korrelationsanalyse**

Durch die Korrelationsanalyse lässt sich die Anzahl der Parameter einschränken, indem Parameter mit Wirkung auf das Abbauverhalten von denen ohne Einfluss unterschieden werden.

Der BSB-Abbau scheint in Bezug auf die untersuchten Betriebs-Parameter eine relativ robuste Größe zu sein.

Da das Abbauverhalten in Stufe I von weniger Einfluss-Parametern abhängt, kann Stufe II als kritischere Stufe angesehen werden.

#### **5.2.2 Varianzanalyse (ANOVA)**

Für die Anwendung der Varianzanalyse wird der Streubereich der Einfluss-Parameter aufgeteilt in jeweils fünf Untergruppen oder Level. Hierbei erfolgt die Untergruppenbildung wieder auf zwei Arten, einmal so, dass der Streubereich in fünf gleich große Segmente unterteilt wird und einmal so, dass jede Untergruppe gleich viele Werte beinhaltet. Die Grenzwerte der einzelnen Untergruppen sind für beide Unterteilungsweisen im Anhang tabellarisch aufgeführt. Die Auswirkung dieser verschiedenen Vorgehensweisen, auf die bereits kurz in Kapitel 3 eingegangen wurde, wird hier nochmals ausgiebig erläutert.

Das gewählte Signifikanzniveau ist 95%, d.h. die Nullhypothese wird beibehalten, solange nicht für die Alternativhypothese eine Wahrscheinlichkeit von mindestens 95% besteht. Dann bedeuten p-Werte unter 0,05, dass sich in bezug auf die entsprechenden Abbau-Werte mindestens eine Untergruppe von den anderen signifikant unterscheidet. Um den Einfluss des jeweils untersuchten System-Parameters zu quantifizieren, wird der  $\varepsilon^2$ -Wert gebildet. Er gibt an, welcher Anteil der Gesamtstreuung auf der Streuung der jeweiligen Einfluss-Größe beruht.

Zunächst werden die Konsequenzen der verschiedenartigen Untergruppenbildung hinsichtlich des damit verbundenem Informationsgewinns veranschaulicht. Die Abbildung 5-3 zeigt exemplarisch eine graphische Darstellung derjenigen Ergebnisse aus der ANOVA, welche die Auswirkung der unterschiedlichen Levelbildung besonders verdeutlichen. Für die Einfluss-Größe BSB/CSB und den CSB-Abbau in Stufe II sind die Ergebnisse für gleichstarke Besetzung der Untergruppen 5-3a bzw. bei gleich großen Intervallen 5-3b dargestellt. Dabei sind die Grenzwerte der Untergruppen unter Level und deren Besetzungstärken unter N angegeben. Ferner sind der Mittelwert der CSB-Abbaurrate (Mean) für jede Untergruppe und die dazugehörige Standardabweichung (StDev) aufgeführt. Auf der linken Seite sieht man die Vertrauensintervalle der Mittelwerte.

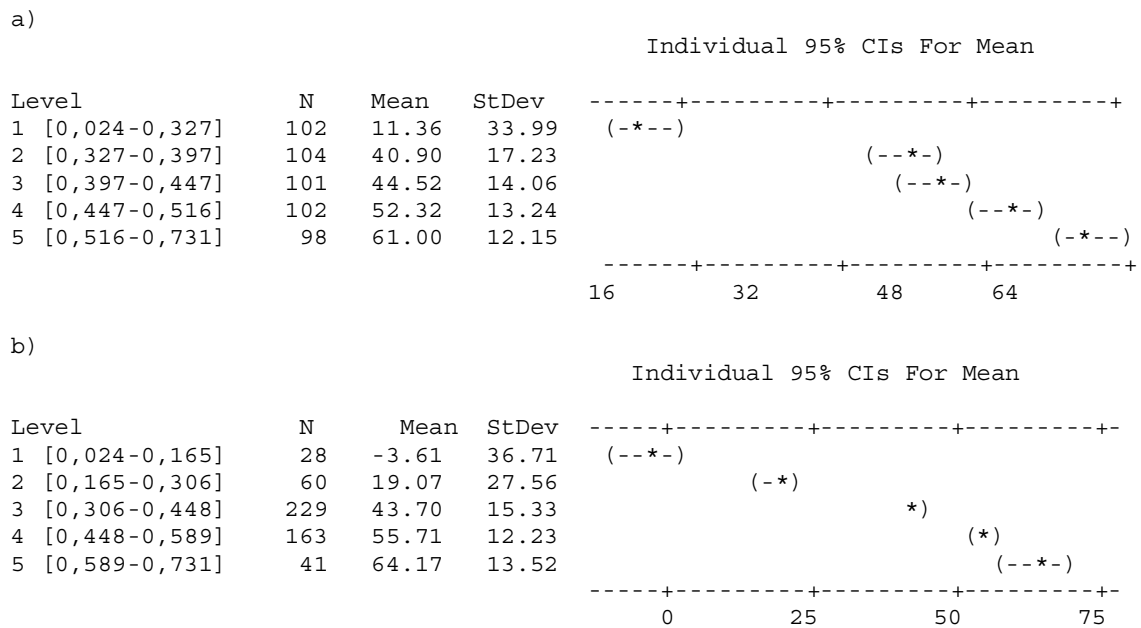


Abb.5-3: Darstellung der Untergruppen aus der ANOVA für BSB/CSB und CSB-Abbau in Stufe II bei a) gleichstarker Besetzung der Untergruppen und b) bei gleich großen Intervallen.

Wird der Streubereich der BSB/CSB-Werte in gleich stark besetzte Segmente aufgeteilt, stehen nur die Ergebnisse aus Abbildung 5-3a zur Verfügung. Im folgenden Text wird diese Vorgehensweise mit a) angegeben, die Unterteilung in gleich große Intervalle mit b). Die Auswertung ergibt, dass man beim Übergang von Level 1 zu Level 2, also bei einer Einstellung der BSB/CSB-Verhältnisse auf über 0,327, eine Verbesserung der mittleren Ausbeute um 29%, nämlich von 11% auf 40%, erzielt. Eine weitere Erhöhung des BSB/CSB-Werts führt erst beim Übergang von Level 3 zu Level 4, also bei BSB/CSB-Werten oberhalb von 0,447, wieder zu signifikant unterschiedlichen Abbauraten, und zwar zu einer Erhöhung um 8% von durchschnittlich 44% auf 52%. Schließlich führen BSB/CSB-Verhältnisse über 0,516 nochmals zu einer Verbesserung des CSB-Abbaus auf durchschnittlich 61%. Vergleicht man die Intervallbreiten der einzelnen Untergruppen, erkennt man, dass sie für Level 2, 3 und 4 mit 0,07, 0,05 und 0,07 ähnlich sind. Im Gegensatz dazu sind diejenigen für Level 1 und 5 mit 0,3 und 0,22 ungefähr vier mal so groß. Dieses bedeutet, dass man für den Wertebereich, der durch die Untergruppen 2 bis 4 beschrieben wird und der annähernd so groß ist wie der von Level 5, differenziertere Informationen hinsichtlich der CSB-Abbauwerte erhält als für

die äußeren Regionen des Streubereichs. Man analysiert auf diese Weise den Bereich hoher Wertedichten sehr genau, jedoch zu Lasten der Bereiche geringer Messwertdichte.

Erfolgt die Unterteilung der Messwerte in gleich große Intervalle, erhält man die in Abbildung 5-3b dargestellten Ergebnisse. Es lässt sich feststellen, dass bei sehr kleinen BSB/CSB-Verhältnissen unterhalb von 0,165 hauptsächlich negative Abbauraten auftreten. Diese Information bleibt bei der Einteilung in gleich stark besetzte Untergruppen verborgen. Darüber hinaus erkennt man, dass der Übergang von Level 1 zu Level 2 mit einer Zunahme der CSB-Abbauraten um 22%, nämlich von -3% auf 19% einhergeht. Zwar ergibt auch die unter a) angegebene Darstellung der Ergebnisse, dass niedrige BSB/CSB-Verhältnisse zu geringen CSB-Abbauraten führen, der Bereich unter 0,327 wird jedoch nicht weiter differenziert, so dass hier der erwähnte Abfall der CSB-Abbauraten bei BSB/CSB-Verhältnissen nicht ermittelt werden kann. Bei Betrachtung der Untergruppe 3 zeigt sich, dass sie mit 229 Werten sehr stark besetzt ist. In ihr sind fast die Hälfte aller Werte beinhaltet, ohne dass hier nähere Abstufungen gemacht werden. Ein ähnlicher Wertebereich wird unter a) mit den zwei Untergruppen Level 2 und Level 3, beschrieben. Da beide Level sich nicht signifikant voneinander unterscheiden, ist der Informationsgewinn für diesen Wertebereich bei beiden Unterteilungsarten gleich. Dies gilt natürlich nur für das hier angegebene Beispiel und ist im Voraus nicht bekannt. Betrachtet man den oberen Streubereich, sind in a) alle Werte ab 0,516 in einer Untergruppe zusammengefasst. In diesem Fall lassen sich mit 61% die höchsten CSB-Abbauraten bei BSB/CSB-Werten über 0,516 erzielen. Geht man jetzt wieder über zu b), lautet das Ergebnis, dass die BSB/CSB-Verhältnisse oberhalb von 0,589 mit durchschnittlichen Abbauraten von 64% zu den besten Ergebnissen führen. Da sich das Maximum am oberen Rand des Streubereichs befindet und dieser gleichzeitig nicht die höchste Wertedichte aufweist, ist hier eine Aufteilung nach b) vorteilhafter. Dies zeigt sich allerdings durch die Auswertung der ANOVA. Für andere Verläufe, wie beispielsweise das Auftreten eines Maximums oder das Erreichen eines Grenzwerts (vgl. Kapitel 3, Abb. 3-2) im Bereich hoher Messwertdichte, oder bei anderen Verteilungen der Messwerte kann es vorteilhafter sein, nach a) zu unterteilen um ein Maximum oder einen „Knick“ möglichst genau zu ermitteln.

Da unter a) die einzelnen Untergruppen gleich stark besetzt sind und die Anzahl der Messwerte in die Berechnung der Standardabweichungen mit eingeht, lassen sich unter a) die Standardabweichungen direkt miteinander vergleichen. Liegen dann Untergruppen mit nicht signifikant unterschiedlichen Mittelwerten aber unterschiedlichen Standardabweichungen vor, sind niedrigere Standardabweichungen gleichbedeutend mit robusteren Bereichen. Unter b) hingegen lassen sich auf Grund der gleichen Intervallgröße die einzelnen Mittelwerte zweier aufeinanderfolgender Untergruppen vergleichen. So lässt sich im oben angegebenen Beispiel erkennen, dass die Verbesserung des CSB-Abbaus durch Erhöhung der BSB/CSB-Werte mit steigenden Absolutwerten der BSB/CSB-Werte immer niedriger wird. Bringt ein Übergang von Level 1 zu Level 2 eine Verbesserung der durchschnittlichen Abbaurate um 22% mit sich, was sich durch Vergleich der in Abbildung 5-3b unter mean angegebenen Mittelwerte ergibt, sind als Verbesserungen bei den folgenden Übergängen 23%, 12% und 9 % auszumachen.

Es lässt sich also zusammenfassen, dass die Aufteilung des Streubereichs auf beide Arten einen unterschiedlichen Informationsgewinn mit sich bringt.

Je nach Fragestellung muss daher entschieden werden, welche Aufteilung jeweils vorteilhafter erscheint. Für eine erste Untersuchung erscheint eine Unterteilung nach b) günstiger zu sein, da hier der gesamte Bereich gleich stark gewichtet wird. Der maximale Informationsgewinn wird unter Anwendung beider Varianten erzielt. Aus diesem Grund erfolgt die Auswertung nach beiden Varianten, die auch beide zur Generierung der Ergebnisse herangezogen werden.

Kennzahlen, mit denen das Ergebnis der ANOVA beschrieben wird, sind der p-Wert und  $\epsilon^2$ . Beide Werte sind in der folgenden Tabelle 5-6 für die nach der Korrelationsanalyse noch verbleibenden Einfluss-Größen aufgeführt, wobei die Unterteilung des Wertebereichs in gleich große Intervalle erfolgte.

Eine vollständige Tabelle, die beide Unterteilungsvarianten und die Ergebnisse für alle Einfluss-Größen beinhaltet, findet sich im Anhang.



Tab. 5-6: Ergebnisse der Varianzanalyse bei Einteilung der Streubereiche in gleich große Intervalle für die nach der Korrelationsanalyse verbliebenen Einfluss-Größen

## Stufe I

	CSB-Abbau		BSB-Abbau		CSB-SA-Abbau	
	p-Wert	$\epsilon^2$ -Wert	p-Wert	$\epsilon^2$ -Wert	p-Wert	$\epsilon^2$ -Wert
CSB-Fracht	<0,001	9,2			<0,001	12,1
BSB-Fracht	<0,001	8,2			0,007	2,7
CSB-SA-Fracht	0,009	2,6	0,152	1,3	<0,001	45,1
BSB/CSB	0,186	1,2			<0,001	30,7
Sauerstoff	<0,001	2,6	<0,001	25,6	0,001	13,3
NO <sub>3</sub> -N	0,408	0,8	0,459	0,7		
Gesamt-P [kg]			0,557	0,6		
PO <sub>4</sub> -P [kg]			0,050	1,2		
NH <sub>4</sub> -N [kg]	0,015	2,4	0,007	2,7	0,066	1,7
TS [kg]	0,040	1,6			0,024	1,8
OrgTS [kg]	0,081	2,8			0,010	4,7,

## Stufe II

	CSB-Abbau		BSB-Abbau		CSB-SA-Abbau	
	p-Wert	$\epsilon^2$ -Wert	p-Wert	$\epsilon^2$ -Wert	p-Wert	$\epsilon^2$ -Wert
CSB-Fracht	<0,001	16,9	0,031	2,1	<0,001	15,4
BSB-Fracht	<0,001	17,6	0,016	2,4	<0,001	8,7
CSB-SA-Fracht	0,028	2,1			<0,001	8,1
BSB/CSB	<0,001	45,5	<0,001	43,5	<0,001	12,2
Sauerstoff	<0,001	20,7	<0,001	20,6	<0,001	15,7
PI [kg]	0,451	0,7			0,161	1,3
VWZ	0,022	2,2	0,001	3,5		
Gesamt-N [kg]	<0,001	6,0	0,032	2,2	0,014	2,6
NH <sub>4</sub> -N [kg]	<0,001	5,5	0,048	1,9	0,029	2,1
Gesamt-P [kg]	0,409	0,8	0,406	0,8	0,350	0,9
PO <sub>4</sub> -P [kg]					0,601	0,5
TS	0,012	2,5	0,006	2,9		
orgTS	0,045	4,0				
Temperatur	<0,001	50,7	<0,001	20,1	<0,001	42,1

Die signifikant das Abbauverhalten beeinflussende Faktoren sind nachstehend aufgeführt. Diejenigen Faktoren, die sich nur bei einer Variante der Untergruppenbildung als signifikant erweisen, stehen in Klammern.

Für Stufe I sind dies für die jeweilige Abbaugröße:

- CSB-Abbau: CSB-Fracht, BSB-Fracht, CSB-SA-Fracht, Sauerstoff, (NH<sub>4</sub>-Stickstoff) und (TS)
- BSB-Abbau: Sauerstoff, NH<sub>4</sub>-Stickstoff, (PO<sub>4</sub>-Phosphor)
- CSB-SA-Abbau: CSB-Fracht, BSB-Fracht, CSB-SA-Fracht, BSB/CSB, Sauerstoff, (NH<sub>4</sub>-Stickstoff) TS und (orgTS)

Für Stufe II:

- CSB-Abbau: CSB-Fracht, BSB-Fracht, CSB-SA-Fracht, BSB/CSB, (PI), VWZ, Sauerstoff, Gesamt-Stickstoff, NH<sub>4</sub>-Stickstoff, (Gesamt-Phosphor), TS, (orgTS) und Temperatur
- BSB-Abbau: CSB-Fracht, BSB-Fracht, BSB/CSB, VWZ, Sauerstoff, Gesamt-Stickstoff, NH<sub>4</sub>-Stickstoff, TS und Temperatur
- CSB-SA-Abbau: CSB-Fracht, BSB-Fracht, CSB-SA-Fracht, BSB/CSB, (PI), Sauerstoff, Gesamt-Stickstoff, NH<sub>4</sub>-Stickstoff, (Gesamt-Phosphor), (Phosphat-Phosphor), und Temperatur

Anschließend werden die Ergebnisse der Untergruppen-Vergleiche ausgewertet, wobei beide Unterteilungsvarianten Berücksichtigung finden. Durch diese Unterteilung mit nachfolgendem paarweisen Fisher-Vergleich, vgl. Kapitel 3, Abbildung 3-4d, wird der Wertebereich der Einfluss-Parameter differenziert untersucht. Dadurch lassen sich stabile von anfälligen Bereichen unterscheiden und durch Gegenüberstellung der einzelnen Ergebnisse die optimalen Betriebsbedingungen in bezug auf Stabilität und Leistungsfähigkeit ermitteln. Die sich im einzelnen ergebenden Ergebnisse werden im nun folgenden Abschnitt beschrieben.

Die Ergebnisse der Varianzanalyse der signifikanten Parameter mit der Darstellung der Untergruppen findet sich für beide Unterteilungsvarianten im Anhang.

### 5.2.2.1 Ergebnisse für Stufe I

Die Ergebnisse der Varianzanalyse wurden ausgewertet. Berücksichtigt man dabei beide Varianten der Untergruppenbildung, erhält man für die jeweiligen Abbau-Größen folgende Ergebnisse:

**CSB-Abbau:** Mit Ansteigen der **CSB-Frachten** bis 6660 kg erhöht sich CSB-Abbauraten von durchschnittlich 78% auf 87% und bleibt bei weiterer CSB-Fracht-Zunahme konstant.

Bei **BSB-Frachten** oberhalb von 3500 kg lassen sich mit 86% die höchsten Abbauraten beobachten. Darüber hinaus hat die BSB-Fracht bis zum maximal beobachteten Wert von 12384 kg keine Auswirkungen. 131 Werte liegen unter 3500.

**CSB-SA-Frachten** über 2400 kg führen zu leicht erhöhten Abbauraten. Obwohl statistisch signifikant, ist dieser Einfluss mit einer Verbesserung von 3% und Standardabweichungen in doppelter Größenordnung praktisch kaum von Bedeutung.

Beim Parameter **Sauerstoff** zeigt sich bei Konzentrationen über 2 mg/l eine kontinuierliche Abnahme der Abbauleistung. Es sei hier nochmals darauf verwiesen, dass die Sauerstoffkonzentration eine Art Indikatorfunktion hat. Bei schlechten Abbauleistungen lassen sich hohe Sauerstoffkonzentrationen beobachten, da der zugeführte Sauerstoff nicht vollständig aufgenommen wird. Hohe Sauerstoffwerte sind also nicht die Ursache schlechter Abbauleistung sondern die Wirkung.

Bei **NH<sub>4</sub>-Stickstoff** lässt sich trendartig beobachten, dass zunehmende Ammoniumgehalte mit abnehmenden Abbauraten einhergehen.

Beträgt die Masse **TS** mehr als 21.000 kg zeigen sich leicht erhöhte Abbauwerte, wobei auch hier der Einfluss auf Grund hoher Standardabweichungen praktisch kaum relevant ist.

- BSB-Abbau:** Werden **Sauerstoff-Konzentrationen** über 2,6 mg/l erreicht, lässt sich eine Verringerung der Abbaurate von 96% auf 80% beobachten. Der Einfluss dieses Parameters ist sehr hoch,  $\epsilon^2$  beträgt 25,6%
- Beim Parameter **NH<sub>4</sub>-Stickstoff** erhält man für Werte bis 122 kg als Trend eine Verringerung der Abbau-Werte mit Zunahme des Ammoniumgehalts. Darüber hinaus bleibt die Abbaurate konstant. Über die biologischen Ursachen kann an dieser Stelle nichts gesagt werden.
- CSB-SA-Abbau:** Werden die **CSB-Werte** betrachtet, lassen sich bei Frachten unter 4500 kg mit durchschnittlich 26% besonders niedrige CSB-SA-Abbauraten beobachten. Oberhalb von 6600 kg treten mit mittleren Werten um 57% die höchsten Abbauwerte auf.
- Für die **BSB-Frachten** bis 6000 kg lässt sich ein kontinuierlicher Anstieg der Abbauraten von 36% auf 51% mit zunehmenden BSB-Werten beobachten. Darüber hinaus wirkt sich dieser Einfluss-Parameter nicht mehr aus.
- Mit einem  $\epsilon^2$ -Wert von 45% zeigen die **CSB-SA-Frachten** den größten Einfluss auf die Abbauraten. Dabei treten die geringsten Abbauwerte mit durchschnittlich 7% bei Frachten unterhalb von 1000 kg auf. Bei Frachten zwischen 1000 kg und 1400 kg beträgt die mittlere Abbaurate bereits 41%. Bis zu CSB-SA-Frachten von 2500 lässt sich ein weiterer Anstieg der Abbauraten verzeichnen, darüber hinaus zeigt eine weitere Zunahme keine signifikante Auswirkung auf das Abbauverhalten.
- Auch das **BSB/CSB-Verhältnis** stellt eine wichtige Größe dar, ihr  $\epsilon^2$ -Wert beträgt 30%. Dabei führen steigende BSB/CSB-Werte zu sinkenden Abbauraten. Besonders deutlich wirkt sich das bei Werten oberhalb von 0,801 wo die mittleren Abbauraten von 42% auf 12% abnehmen.

Beim Parameter **Sauerstoff** zeigt sich bei Konzentrationen oberhalb von 2,0 mg/l ein Abbau-Abfall von durchschnittlich 55% auf 26%.

Für **NH<sub>4</sub>-Stickstoff** lässt sich als Tendenz feststellen, dass bis 173 kg NH<sub>4</sub>-N die Zunahme der Fracht einhergeht mit einer Abnahme der Abbauwerte, danach wirkt sie sich nicht mehr aus.

Bei **TS-Werten** oberhalb von 21000 kg lässt sich eine Abbausteigerung von 7% von mittleren 41% auf 48% ausmachen.

Betrachtet man die Einfluss-Größe **orgTS**, erscheinen Werte über 24000 kg vorteilhaft.

### 5.2.2.2 Zusammenfassung der Ergebnisse für Stufe I

Vergleicht man die Einzelergebnisse für die verschiedenen Abbaugrößen, lässt sich allgemein feststellen, dass für hohe Abbauraten eine Mindestbeladung der ARA gegeben sein muss. Als sogenannte Mindestfrachten lassen sich 6600 kg CSB-Fracht, 3500 kg BSB-Fracht und 2500 kg CSB-SA-Fracht ausmachen. Für einen hohen CSB-SA-Abbau sollten die BSB/CSB-Werte unbedingt unter 0,8 liegen.

### 5.2.2.3 Ergebnisse für Stufe II

**CSB-Abbau:** Betrachtet man die **CSB-Fracht** bis 3000 kg, erhöht sich bei Zunahme der Fracht-Werte die Abbaurate, wobei bei Werten oberhalb von 1400 kg zusätzlich eine Abnahme der Standardabweichung zu beobachten ist. Danach treten keine signifikanten Wirkungen mehr auf.

Für die **BSB-Frachten** lässt sich feststellen, dass sich bei Werten über 900 kg die höchsten Abbau-Werte beobachten lassen. Darunter beobachtet man mit durchschnittlich 36% um 25% verminderte Abbauraten.

Bei den **CSB-SA-Frachten** beobachtet man bis zu Werten von 940 kg eine Zunahme der Abbauraten mit steigenden CSB-SA-Werten. Danach zeigen sich keine signifikanten Einflüsse mehr.

Das Verhältnis **BSB/CSB** stellt mit einem  $\epsilon^2$ -Wert von 45% den Parameter mit dem stärksten Einfluss dar. Es lässt sich ein Anstieg der Abbauwerte mit zunehmenden BSB/CSB-Werten verzeichnen, wobei sich nur für Werte bis 0,731 Aussagen machen lassen. Verhältnisse unter 0,165 wirken sich besonders nachteilig auf die Abbauleistung aus.

Es lassen sich bei niedrigen **PI-Werten** unter 10 kg gleichzeitig niedrige Abbauwerte beobachten. Jedoch sind die Standardabweichungen größer als die beobachteten Unterschiede.

Für die **Sauerstoffkonzentrationen** sind Werte unterhalb von 7,8 mg/l anzustreben, da sich bei höheren Werten ein Abbau-Abfall von 43% auf 6% verzeichnen lässt.

Betrachtet man die **Verweilzeit**, lässt sich bei Werten über 21 h eine von 30% auf 42% erhöhte Abbaurate feststellen. Gleichzeitig weisen die Standardabweichungen verminderte Werte auf.

Für den **Gesamt-Stickstoff** beobachtet man bei Werten über 105 kg eine Abnahme der Abbauleistung von mittleren 44% auf 27%. Darunter hat die Stickstoff-Fracht keine signifikanten Auswirkungen.

Auch bei der Einfluss-Größe **NH<sub>4</sub>-Stickstoff**, führen bei Frachten oberhalb von 39 kg steigende Ammoniumgehalte zu sinkenden Abbauraten.

Beim Parameter **TS** ist oberhalb von 24000 kg ein Anstieg der Abbauwerte von durchschnittlich 33% auf 45% zu verzeichnen. Bei höheren Frachten unterscheiden sich die Mittelwerte der Untergruppen nicht mehr signifikant, jedoch lässt sich bei Werten oberhalb von 40000 kg eine Reduzierung der Streuung ausmachen. Für den Parameter **orgTS** sind Massen über 20000 kg anzustreben.

Bei der **Temperatur** lassen sich bei Werten über 25°C verminderte Abbauleistungen feststellen.

**BSB-Abbau:**

Betrachtet man die **CSB-Frachten**, ist bei Frachten über 1240 kg ein Anstieg der Abbauraten von 74% auf 88% zu verzeichnen. Darüber verhält sich die CSB-Fracht abbau-neutral.

Für die **BSB-Fracht** lässt sich feststellen, dass Werte über 434 kg zu den höchsten Abbauwerten führen.

Auch für diese Abbau-Kennzahl ist das **BSB/CSB-Verhältnis** mit einem  $\epsilon_2$ -Wert von 43% die gewichtigste Einfluss-Größe. Hier ist ein Wert oberhalb von 0,165 anzustreben.

Beim Parameter **Sauerstoff** zeigt sich bei Konzentrationen oberhalb von 7,8 mg/l ein Abbau-Abfall von durchschnittlich 87% auf 55% bei gleichzeitiger Zunahme der Standardabweichung.

Bei **Verweilzeiten** über 21 h lässt sich eine Zunahme der durchschnittlichen Abbauraten um 12% auf im Mittel 86% feststellen

Für den **Gesamt-Stickstoff** beobachtet man bei Werten über 180 kg eine Abnahme der Abbauleistung von im Schnitt 85% auf 78%, allerdings treten hohe Standardabweichungen auf.

Analoge Aussagen lassen sich für **NH<sub>4</sub>-Stickstoff** machen. Frachten oberhalb von 117 kg führen zu einer Abnahme der Abbauwerte von im Mittel 86% auf 80%; ebenfalls sind hohe Standardabweichungen zu verzeichnen.

Bei **TS** führen Massen oberhalb von 25000 zu einer Steigerung der Abbauleistung von 78% auf 87%.

Für die **Temperatur** findet man zwar einen signifikanten Einfluss, der Vergleich der einzelnen Untergruppen führt jedoch zu keinen eindeutigen Aussagen.

**CSB-SA-Abbau:**

Bei der Betrachtung der **CSB-Frachten** erkennt man bis zu Werten von 2000 kg eine kontinuierliche Zunahme der Abbauraten mit steigenden Frachtwerten von -12% bis 25%. Danach ergibt sich für

steigende CSB-Werte keine Verbesserung der Abbauleistung mehr. Für die **BSB-Fracht** lässt sich für Frachten unter 430 kg eine negative mittlere Abbaurate von -14% feststellen. Höhere Frachten führen zu einem Sprung in der mittleren Abbaurate auf 10 %. Darüber hinaus lässt sich bei Frachten bis zu 2000 kg eine kontinuierliche Zunahme der Abbauraten ermitteln, bis diese bei Frachten über 2000 kg 27% erreichen.

Bei der Größe **CSB-SA-Fracht** wirken sich Werte über 1100 kg steigend auf die Abbauleistung aus.

Beim **BSB/CSB-Verhältnis** finden sich bei Werten unterhalb von 0,31 im Mittel negative Abbauraten, wobei diese unterhalb von 0,165 mit -21% besonders niedrig, d.h. ungünstig sind. Die höchsten Abbauraten lassen sich bei Verhältnissen über 0,448 erreichen.

Betrachtet man **PI**, gehen Werte über 15 kg einher mit erhöhten mittleren Abbauraten, jedoch sind die Standardabweichungen sehr groß, so dass der Einfluss zwar statistisch als sicher angesehen werden kann, die Aussagekraft jedoch gering ist.

Erreicht die **Sauerstoff-Konzentration** Werte über 7,8 mg/l, lässt sich dies als Hinweis auf verminderte Abbauleistung deuten, da sich schlechte Abbauwerte beobachten lassen.

**Gesamt-Stickstoff-Massen** unterhalb von 32 kg weisen die besten Abbauwerte auf. Die Abbauraten nehmen mit Zunahme der Stickstoff-Frachten ab.

Betrachtet man **NH<sub>4</sub>-Stickstoff**, wirken sich Frachten über 39 kg leicht abbau-mindernd auf, aufgrund hoher Standardabweichungen auch hier mit geringer Aussagekraft. Analoge Ergebnisse, die nur als Tendenz angesehen werden können, ergeben sich für die Parameter **Gesamt-Phosphor** und **Phosphat-Phosphor**. Werte über 10 kg bzw. über 0,53 kg gehen einher mit leicht erhöhten Abbauraten. Für die vier letztgenannten System-Parameter lassen



sich Effekte zwar statistisch nachweisen, sie sind aber so klein, dass sie kaum von Bedeutung sind.

Betrachtet man die Einfluss-Größe **Temperatur**, zeigen sich im Bereich höchster Temperaturwerte, nämlich von 25°C – 30°C, im Schnitt negative Abbauraten mit mittleren –41%. Am günstigsten erscheint der Temperaturbereich von 20,3°C bis 25°C.

#### **5.2.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Varianzanalysen für Stufe II.**

Auch hier ergibt sich, dass sich hohe Abbauraten nur ab einer Mindestbeladung der ARA erzielen lassen. Dies sind im einzelnen CSB-Frachten über 3000 kg, BSB-Frachten über 2000 kg und CSB-SA-Frachten oberhalb von 1100 kg. Das Verhältnis BSB/CSB sollte möglichst hoch sein, jedoch unbedingt oberhalb von 0,165 liegen. Desweiteren sind Sauerstoffkonzentrationen über 7,8 mg ein Indiz für schlechte Arbeitsweise.

## 6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Bewertung

In den Kapiteln 4 und 5 wurden die Phasen I und II, und darin jeweils die Stufen I und II, als separate Systeme untersucht und ausgewertet.

Dabei wurden die gegebenenfalls unterschiedlichen Ergebnisse zwischen zwei Stufen in bezug auf Signifikanz des Einflusses eines System-Parameters auf eine Abbaugröße zwar beschrieben, aber hinsichtlich der Ursachen nicht eingehender untersucht. Dies soll hier anhand ausgewählter Beispiele geschehen.

Darüber hinaus werden in diesem Kapitel die Ergebnisse beider Phasen gegenübergestellt. Dabei wird beschrieben, welche Situationen beim Vergleich von Ergebnissen auftreten können. Es wird ebenfalls auf Auswirkungen eingegangen, die bei Signifikanzprüfungen unterschiedlich großer Datenreihen zum Tragen kommen, also auf die Unterschiede, die daraus resultieren, dass für beide Phasen unterschiedliche Anzahlen von Messwerten vorlagen. Zudem wird der Frage nachgegangen, inwieweit unterschiedliche Ergebnisse aus den verschiedenen Streubereichen der System-Parameter resultieren können. Dabei wird untersucht, ob die einzelnen Stufen bzw. Phasen tatsächlich verschiedenartige Systeme darstellen. Der erste Aspekt hat Folgen für die Auswertung der Ergebnisse innerhalb einer Phase, also auf die Frage, ob Stufe I und II als unterschiedliche Systeme betrachtet werden müssen, oder ob sich die Ergebnisse von Stufe I auf Stufe II übertragen lassen. Der zweite hat Folgen für die Anwendbarkeit der Methodik als Maßnahme zur Charakterisierung der Arbeitsweise der ARA und zur Hinweisgabe hinsichtlich der Verbesserung der Leistungsfähigkeit der ARA. Bei Nicht-Übertragbarkeit der Ergebnisse von Phase I auf Phase II muss dann, unter Zuhilfenahme biologischer Sachkenntnis, entschieden werden, ob die Methode ungeeignet ist oder ob die Unterschiede aus der Verschiedenartigkeit der beiden Datenreihen resultieren, da in Phase I ein ausgewählter Zustandsbereich und in Phase II ein für die Arbeitsweise der ARA repräsentativer Zustandsbereich zu Grunde liegen.

Schließlich wird auf die Verwendbarkeit der Methode eingegangen, indem Ergebnisse aus der Korrelationsanalyse und ANOVAs bei jeweils einem System-Parameter und einer Abbaugröße gegenübergestellt und verglichen werden.

Insgesamt sollen also folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Folgen hat die unterschiedliche Datenanzahl auf die Ergebnisse der durchgeführten Signifikanztests?
- Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Streubereiche eines Betriebs-Parameters in den verschiedenen Systemen auf die Ergebnisse?
- Woran liegt es, dass Stufe I und Stufe II zu unterschiedlichen Ergebnissen führen bzw.
- Woran liegt es, dass Phase I und Phase II zu unterschiedlichen Ergebnissen führen bzw. stehen die Ergebnisse trotz Verschiedenartigkeit im Einklang miteinander? Welchen Einfluss hat hierbei die Statistik?
- Ist die Methode, bestehend aus Korrelationsanalyse und ANOVAs, sinnvoll und ist es von Nutzen, bei der ANOVA beide Varianten der Untergruppenbildung durchzuführen?

## **6.1 Auswirkungen des Datenumfangs auf die Ergebnisse**

Es wird in den beiden folgenden Abschnitten der Frage nachgegangen, welche Auswirkungen der Umfang einer Datenreihe auf Signifikanztests und damit auf die Ergebnisse hat, und zwar zum einen bei der Korrelationsanalyse und zu anderen bei der Varianzanalyse.

### **6.1.1 Signifikanzbetrachtungen bei der Korrelationsanalyse**

In der Korrelationsanalyse wird auf Zusammenhang zwischen zwei Größen geprüft. Dabei werden mittels der kleinsten Abstandsquadrate Korrelationskoeffizienten bestimmt. Die Korrelation zwischen zwei Größen ist aber erst dann statistisch nachgewiesen, wenn sich der Korrelationskoeffizient  $r$  bei gegebenem Signifikanzniveau signifikant von Null unterscheidet. Die Nullhypothese lautet, die Korrelation zwischen beiden Größen sei Null. Beim Signifikanztest innerhalb der Korrelationsanalyse wird bestimmt, ob dieser Korrelationskoeffizient statistisch signifikant ist und für eine Korrelation zwischen einer Systemgröße und einer

Abbaugröße steht oder nicht. Nach Fisher [doerffel] besteht zwischen dem t-Wert  $t(p;f)$  und dem Korrelationskoeffizienten folgender Zusammenhang:

$$t(p; f) = \frac{\sqrt{n-2} \cdot |r|}{\sqrt{1-r^2}} \quad (\text{Gl. 6-1a})$$

bzw. nach  $r$  aufgelöst

$$r = \sqrt{\frac{t(p; f)^2}{n-2 + t(p; f)^2}} \quad (\text{Gl. 6-2b})$$

mit  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $t(p;f)$  = t-Wert der t-Verteilung,  $p$  = Signifikanzniveau,  $f$  = Anzahl der Freiheitsgrade und  $n$  = Anzahl der Messwerte.

Aus diesen Gleichungen folgt diejenige Grenze, oberhalb derer der Korrelationskoeffizient  $r$ , bei gegebenem Signifikanzniveau, von Null signifikant unterscheidbar ist.

Man erkennt in Gleichung 6-2b, dass bei gegebenem Signifikanzniveau der Wert des Korrelationskoeffizienten an der Signifikanzgrenze mit zunehmender Datenzahl abnimmt.

Dieses übertragen auf die Ergebnisse der Korrelationsanalyse für Phase I und Phase II bedeutet, dass auf Grund der verschieden umfangreichen Datenreihen, nämlich 45 Werte für Phase I im Gegensatz zu 526 Werten für Phase II, unterschiedliche Ergebnisse bezüglich Signifikanz einer Korrelation erhalten werden können.

Für Phase II darf der Wert des Korrelationskoeffizienten viel kleiner sein als für Phase I, um noch als signifikant angesehen zu werden. Mit anderen Worten erhält man gegebenenfalls für denselben Wert des Korrelationskoeffizienten Signifikanz bei Auswertung der Stufe II, bei Auswertung der Stufe I hingegen nicht. So beträgt bei einem Signifikanzniveau von 95% der Korrelationskoeffizient an der Signifikanzschränke in Phase I bei 45 Werten 0,290, in Phase II bei 525 Werten 0,095. Dies ist beim Vergleich der Ergebnisse für Phase I und II zu beachten.

Auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 6.5.2 anhand eines Beispiels eingegangen.

### 6.1.2 Signifikanzbetrachtungen bei der Varianzanalyse

Bei der ANOVA werden in einem F-Test die Streuungen zwischen zwei Gruppen mit denen innerhalb einer Gruppe verglichen. Die Nullhypothese lautet, beide Varianzen seien gleich. Zur Prüfung dieser Nullhypothese führt man den F-Test durch. Dabei ist

$$F = \frac{s_{zw}^2}{s_{in}^2} \quad (\text{Gl. 6-2a})$$

mit  $s_{zw}^2 = \frac{SS_{zw}}{m-1}$  (Gl. 6-2b)

und  $s_{in}^2 = \frac{SS_{in}}{n-m}$  (Gl. 6-2c)

wobei  $n$  = Anzahl der Werte und  $m$  = Anzahl der Untergruppen ist. Dabei geben die Nenner,  $m-1$  und  $n-m$ , die jeweiligen Freiheitsgrade an;  $SS$  steht für Summe der Quadrate,  $SS_{zw}$  für die Summe der Quadrate zwischen den Gruppen,  $SS_{in}$  für die Summe der Quadrate innerhalb der Gruppen (vgl. Kap 3.2.3).

Für den berechneten F-Wert wird mit  $p$  die Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der die Nullhypothese noch aufrecht erhalten wird. Bei einem Signifikanzniveau von 95% muss  $p \leq 0,05$  sein, damit die Nullhypothese verworfen werden kann. Der F-Wert an dieser Signifikanzschranke ist in Phase I bei  $n-m = 40$  mit 2,61 angegeben, in Phase II bei  $n-m = 521$  mit ca. 2,37 [16]. Beide Werte unterscheiden sich nur geringfügig, so dass für die Bestimmung des F-Wertes der Umfang der Datenreihen kaum eine Rolle spielt.

Anders sieht das für den  $\varepsilon^2$ -Wert aus, der ein Maß für die Größe eines Einflusses ist. Der  $\varepsilon^2$ -Wert gibt an, wie viel Prozent der Gesamtstreuung sich durch die Streuung des betrachteten Faktors erklären lässt. Er ist der Quotient aus der Summe der Quadrate für den betrachteten Faktor ( $SS_{zw}$ ) und der Gesamt-Summe der Quadrate ( $TotalSS = SS_{zw} + SS_{in}$ ).

$$\varepsilon^2 = \frac{SS_{zw}}{(SS_{zw} + SS_{in})} \quad (\text{Gl. 6-3})$$

Bei einem gegebenem F-Wert und der gleichen Anzahl von Untergruppen, wie es in Phase I und II der Fall ist, nimmt der  $\varepsilon^2$ -Wert mit zunehmender Datenmenge ab. Dies wird aus dem Vergleich der Gleichungen 6-2a-c und Gleichung 6-3 deutlich. Bei einem hohen Datenumfang, wie in Phase II, stellen bereits viel geringere Anteile an der Gesamtstreuung ein Maß für einen signifikanten Einfluss dar, als dies für Phase I der Fall ist. Kleine Einflüsse sind also bei großen Datenmengen bereits signifikant.

Beim Fisher-Vergleich, der ebenfalls Bestandteil der durchgeführten Varianzanalyse ist, werden paarweise zwei Untergruppen miteinander verglichen (vgl. Kap.3.2.3). Der Vergleich erfolgt anhand der Vertrauensintervalle der einzelnen Untergruppen. Dabei geht die Anzahl der Messwerte einer Untergruppe in die Berechnung des Vertrauensintervalls mit ein (vgl. Kap.2.2). Je stärker eine Untergruppe besetzt ist, desto kleiner wird ihr Vertrauensintervall; damit werden auch umso kleinere Unterschiede zwischen zwei Untergruppen als signifikant bewertet.

Es lässt sich zusammenfassen, dass mit steigender Anzahl von Messwerten immer kleinere Einflüsse als signifikant anzusehen sind, entsprechend kleinerer  $\varepsilon^2$ -Werte an der Signifikanzschranke. Übereinstimmend damit werden mit zunehmender Datenmenge immer kleinere Unterschiede zwischen zwei Untergruppen als signifikant bestimmt.

## 6.2 Auswirkungen der Breite der Datenbasis auf die Ergebnisse

Die Ergebnisse, die man in der Korrelations- und Varianzanalyse sowie in den Best-Subsets-Regressionen für Phase I ermittelt hat, beziehen sich nur auf den jeweiligen Streubereich der einzelnen System-Parameter und haben somit auch nur für diesen Wertebereich Gültigkeit.

Dies kommt sowohl beim Vergleich der Ergebnisse von Stufe I und Stufe II innerhalb einer Phase als auch beim Vergleich beider Phasen miteinander zum Tragen. So ermittelt man beispielsweise für den System-Parameter BSB/CSB in beiden Phasen, sofern Korrelation zwischen einem System-Parameter und einer Abbauart besteht, in

Stufe I einen negativen Korrelationskoeffizienten und in Stufe II einen positiven (s.u. Beispiel 1). Darüber hinaus lässt sich für den System-Parameter BSB/CSB und die Abbaugröße CSB-SA-Abbau in Stufe II für Phase I keine Korrelation für Phase II hingegen Korrelation feststellen, die durch die ANOVAs bestätigt wird (s.u. Beispiel 2). Werden nun die Streubereiche des System-Parameters in beiden Stufen bzw. in beiden Phasen verglichen, sieht man, dass diese unterschiedlich sind. Die Streubereiche sind für beide Beispiele in folgender Tabelle angegeben.

Tab.: 6-1: Vergleich der Streubereiche des Parameters BSB/CSB in jeweils zwei Phasen einer Stufe (Beispiel 1) und in einer Stufe in beiden Phasen (Beispiel 2).

Beispiel 1:

	Stufe I		Stufe II	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
BSB/CSB Phase I	0,5507	0,9192	0,3648	0,7371
BSB/CSB Phase II	0,3495	0,9871	0,0238	0,7304

Beispiel 2:

	Stufe II Phase I		Stufe II Phase II	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
BSB/CSB	0,3648	0,7371	0,0238	0,7304

Da die Streubereiche verschieden sind, bedeutet Verschiedenartigkeit der Ergebnisse nicht zwangsläufig, dass die Ergebnisse nicht miteinander im Einklang stehen. Sie beziehen sich jeweils auf einen verschiedenen Wertebereich. Dies ist beim Vergleich der Ergebnisse zu beachten. Dieser Aspekt findet beim Vergleich von Ergebnissen in Abschnitt 6.4 Berücksichtigung.

### 6.3 Mögliche Situationen beim Vergleich von Ergebnissen

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse aus zwei Systemen sind mehrere Sachverhalte denkbar. Dabei wird hier mit Systemen jeweils eine Stufe in einer Phase bezeichnet. So lassen sich mit zwei Systemen Stufe I und II innerhalb einer Phase oder eine Stufe, I oder II, aus Phase I und II gegenüberstellen. Als Ergebnis wird hier die qualitative Ja/Nein-Entscheidung hinsichtlich Signifikanz des Einflusses eines System-Parameters in bezug auf eine Abbau-Größe betrachtet. Dabei kann sich zeigen, dass

- das betrachtete Ergebnis in beiden Systemen negativ ist; es ist kein signifikanter Einfluss feststellbar. Hier spielt es keine Rolle, ob die Streubereiche übereinstimmen oder nicht. Ein solcher System-Parameter kann als ein nicht signifikant die Abbauleistung beeinflussender System-Parameter angesehen werden. Die Aussage gilt dann für den maximalen Streubereich.
- das betrachtete Ergebnis in beiden Systemen positiv ist. Dieser System-Parameter ist dann als einer mit Einfluss auf die entsprechende Abbaugröße anzusehen, wobei anhand der Streubereiche und Datenmengen geprüft werden muss, ob die Ergebnisse auch über die qualitative Ja-Aussage hinaus übereinstimmen. Ist dies der Fall, stehen die Ergebnisse im Einklang miteinander und sind damit übertragbar. Ergebnisse stehen im Einklang miteinander, wenn sie unter gleichen Bedingungen übereinstimmen. Ist dies der Fall, kann es als Indiz für Gleichheit der Systeme angesehen werden. Ist dies nicht der Fall, ist der entsprechende System-Parameter zwar wichtig, aber jedes System ist bezüglich der Einstellungen des untersuchten System-Parameters für sich zu betrachten.
- die betrachteten Ergebnisse voneinander abweichen. Beim Vergleich zeigt ein System hinsichtlich des betrachteten System-Parameters und der Abbaugröße einen signifikanten Einfluss, das andere System nicht. Das kann heißen, dass beide Systeme verschiedenartig sind, muss es aber nicht. Die Verschiedenartigkeit kann allein aus den unterschiedlichen Streubereichen und Wertemengen resultieren. Das muss für die Entscheidungsfindung bezüglich im Einklang stehender Ergebnisse berücksichtigt werden. Erst wenn diese beiden Faktoren in die Untersuchung miteinbezogen worden sind und sich danach die Ergebnisse immer noch unterscheiden, kann geschlossen werden, dass beide Systeme unterschiedlich sind.



Sind die Ergebnisse dann gleich, sind sie übertragbar, zumindest für den Wertebereich, für den der Vergleich durchgeführt wurde. Darüber hinaus gibt diese Übereinstimmung einen Hinweis darauf, dass die Ergebnisse auch für den Wertebereich übertragbar sein können, der nur in jeweils einem System vorkommt; allerdings gilt dies nur als Indiz, statistisch abgesichert ist das nicht.

### 6.3.1 Verschiedenartigkeit von Ergebnissen

Es lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die Verschiedenartigkeit der Ergebnisse nicht zwangsläufig auf verschiedenartigem Verhalten der Systeme beruht. Damit sind mit Systemen die einzelnen Stufen in den beiden Phasen gemeint. Diese Verschiedenartigkeit kann allein aus den unterschiedlichen Datenmengen und/oder den unterschiedlichen Streubereichen hervorgehen.

Beim Vergleich innerhalb einer Phase sind dabei nur die unterschiedlichen Streubereiche zu beachten, da hier die Menge der Daten gleich ist. Beim Vergleich zwischen zwei Phasen sind darüber hinaus noch die unterschiedlichen Datenmengen zu berücksichtigen.

Will man nun prüfen, ob die Ergebnisse trotz Verschiedenartigkeit im Einklang miteinander stehen, sind die oben angegebenen Faktoren zu berücksichtigen und in die Prüfung mit einzubeziehen. Dies geschieht bei Unterschieden in den Streubereichen durch Schnittmengenbildung. Dabei wird nur der Teil der jeweiligen Streubereiche untersucht, der in beiden Systemen vorkommt. Um unterschiedliche Datenmengen zu berücksichtigen, kann man beim Vergleich einen gleich großen Korrelationskoeffizienten bzw. einen gleich großen  $\epsilon^2$ -Wert zugrunde legen.

Dabei ist die Schnittmengenbildung der erste Schritt, denn so wird gewährleistet, dass man Gleiches mit Gleichem vergleicht. Zeigen sich dann immer noch verschiedene Ergebnisse, ist zu prüfen, ob die unterschiedliche Datenmenge die Ursache dafür ist. Dies kann durch einen Vergleich der Korrelationskoeffizienten bzw. der  $\epsilon^2$ -Werte erfolgen. Weisen die Ergebnisse dann Übereinstimmung auf, heißt das, dass sie im Einklang miteinander stehen. Ergibt sich dies bei dem Vergleich von Ergebnissen zwischen beiden Phasen, spricht dies für die Anwendbarkeit der entwickelten Methode.

## 6.4 Vergleich der Ergebnisse

Im vorigen Abschnitt sind Situationen dargestellt worden, die bei einem Ergebnisvergleich auftreten können. Zudem wurde auf die Ursachen eingegangen, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können.

Nun soll überprüft werden, ob man bei Berücksichtigung dieser Ursachen vergleichbare Ergebnisse erhält.

Die Ergebnisse innerhalb einer Phase sind in Kapitel 4.2.1 und 4.2.5 bzw. 5.2.1 und 5.2.2. aufgeführt. Die folgenden Tabellen geben eine Übersicht über den Vergleich der Ergebnisse für Phase I und Phase II. Dargestellt sind die qualitativen Ergebnisse hinsichtlich Ja/Nein-Entscheidung für die Signifikanz der Ergebnisse der Korrelationsanalyse sowie der Varianzanalyse bei beiden Unterteilungsvarianten des Streubereichs, und zwar für alle System-Parameter sowie für alle drei Abbau-Arten CSB-Abbau, BSB-Abbau und CSB-SA-Abbau. Dabei stehen die grünen Zellen für Signifikanz in Phase II und die roten Zellen für Nicht-Signifikanz in Phase II. Sind die Zellen ansonsten leer, bedeutet dies, dass die Ergebnisse in beiden Phasen übereinstimmen in bezug auf Ja/Nein-Entscheidung über Signifikanz. Sind die Zellen hingegen in der oberen rechten Ecke durch ein schwarzes Dreieck markiert, bedeutet dies, dass beide Ergebnisse voneinander abweichen. Eine grüne markierte Zelle bedeutet somit Nicht-Signifikanz in Phase I und Signifikanz in Phase II für die entsprechende Untersuchung; eine rote markierte Zelle bedeutet Signifikanz in Phase I und Nicht-Signifikanz in Phase II.

Nach der folgenden vergleichenden Übersicht der Ergebnisse für Phase I und II wird zunächst auf Einklang innerhalb einer Phase geprüft. Dann folgt ein Abschnitt, der die Ergebnisse zwischen zwei Phasen prüft.



Tab. 6-2b: Vergleich der Ergebnisse der Stufe II für Phase I und Phase II. Rote Zellen bedeuten Nicht-Signifikanz in Phase II, grüne Zellen bedeuten Signifikanz in Phase II. Die Markierung bedeutet Nicht-Übereinstimmung der Ergebnisse für Phase I und Phase II. ANOVA nach a) steht für Bildung gleich stark besetzter Untergruppen; nach b) steht für Unterteilung in gleich große Intervalle.

Abbau-Größe \ System-Größe	Korrelation			ANOVA nach a)			ANOVA nach b)		
	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA Abbau	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA Abbau	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA Abbau
CSB-Fracht [kg]									
BSB-Fracht [kg]									
CSB-SA-Fr. [kg]				▲			▲		
BSB/CSB			▲			▲			▲
PI [kg]	▲		▲	▲		▲			
VWZ [h]				▲	▲				
Sauerstoff [mg/l]						▲			▲
Gesamt-N [kg]	▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲	▲
NO <sub>2</sub> -N [kg]		▲		▲		▲			
NO <sub>3</sub> -N [kg]	▲	▲		▲		▲			
NH <sub>4</sub> -N [kg]	▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲	▲
Gesamt-P [kg]	▲	▲	▲	▲					
PO <sub>4</sub> -P [kg]			▲	▲	▲	▲			
TS [kg]			▲						▲
orgTS [kg]		▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲
Temperatur [°C]				▲		▲	▲	▲	▲

#### 6.4.1 Vergleich von Stufe I und Stufe II innerhalb einer Phase

Für den Vergleich der Ergebnisse innerhalb einer Phase gilt das in Abschnitt 6.3 erläuterte.

Lässt sich feststellen, dass nicht der unterschiedliche Streubereich die Ursache für die Verschiedenartigkeit der Ergebnisse ist, sind Stufe I und Stufe II als verschiedene Systeme zu betrachten. Die Ergebnisse für beide Stufen sind für Phase I und Phase II in Kap 4.2.5 und 5.2.2 aufgeführt.

Es wird hier nur auf den Vergleich der Ergebnisse der Varianzanalyse eingegangen, da diese das Endergebnis innerhalb der Methode darstellen. Dabei werden beide Arten der Untergruppenbildung berücksichtigt.

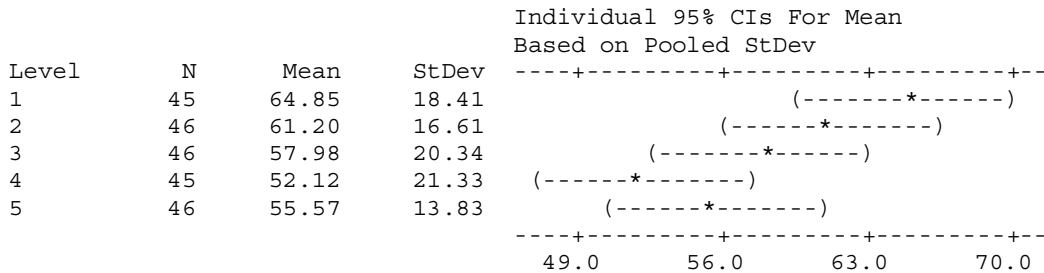
Zu prüfen sind somit nur diejenigen System-Parameter, die in Stufe I und/oder Stufe II signifikanten Einfluss auf die jeweils betrachtete Abbauart haben. Parameter, die in beiden Stufen keine Signifikanz aufweisen, beeinflussen das Abbauverhalten nicht.

Exemplarisch wird hier der Parameter BSB/CSB untersucht (vgl. Beispiel 1, Kap 6.2). Er ist in Phase II für den CSB-SA-Abbau in der Stufe I signifikant mit negativer Korrelation und in Stufe II signifikant mit positiver Korrelation. Wie bereits in 6.2 angegeben, unterscheiden sich die Streubereiche in beiden Stufen. Man könnte also annehmen, dass in Stufe I, wo hohe Werte BSB/CSB auftreten, derjenige Parameter-Bereich beschrieben wird, der die hohen Verhältnisse charakterisiert und in Stufe II der Bereich, der die niedrigen Werte charakterisiert. Insgesamt würde also ein Maximum durchlaufen werden. Auch die entsprechenden Betrachtungen in Phase I, mit nur einer sehr kleinen Schnittmenge, lassen diese Vermutung zu. Um auch diese These zu überprüfen, wird nun der gemeinsame Streubereich, also die Schnittmenge beider Streubereiche untersucht. Da sich für Phase I in dem Schnittstreubereich nur noch 22 bzw. 28 Werte befinden, die dann in 5 Untergruppen aufgeteilt werden, ist das Ergebnis für Phase I nicht aussagefähig. Es lässt sich also zusätzlich feststellen, dass eine genügend hohe Anzahl von Werten bei solchen Betrachtungsweisen notwendig ist.

Daher werden nun die Betrachtungen für Phase II gezeigt. Die Schnittmenge beider Stufen umfasst den Wertebereich 0,349 – 0,731. Man erhält als Ergebnis der Varianzanalyse für den CSB-SA-Abbau in Phase II:

## Stufe I:

Source	DF	SS	MS	F	P
BSB/CSB	4	4383	1096	3.28	0.012
Error	223	74583	334		
Total	227	78965			



## Stufe II:

Source	DF	SS	MS	F	P
BSB/CSB	4	1743	436	0.71	0.589
Error	372	229764	618		
Total	376	231507			

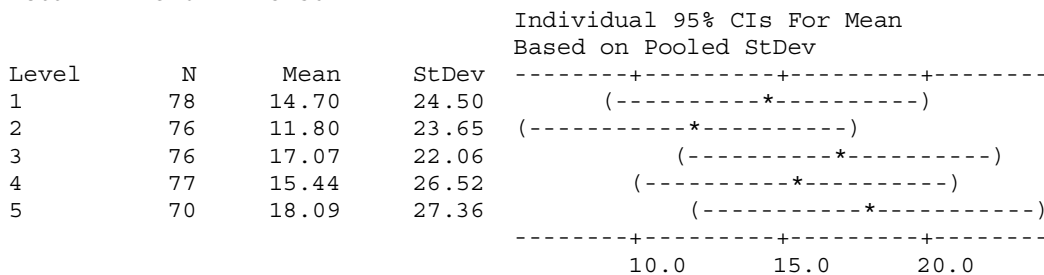


Abb. 6-1: ANOVAs für den Parameter BSB/CSB für beide Stufen in Phase II bei übereinstimmendem Wertebereich

Es lässt sich bei der Betrachtung der ANOVAs feststellen, dass für Stufe II zwar kein signifikanter Einfluss mehr vorhanden ist; für Stufe I weist der System-Parameter BSB/CSB jedoch auch für den reduzierten Streubereich noch einen signifikanten Einfluss auf. Beide Ergebnisse unterscheiden sich also.

Für den CSB-Abbau, der in Stufe I nicht signifikant ist und in Stufe II signifikant (vgl. Kap. 5.2.2), wird bei Untersuchung der Schnittmenge dieses Ergebnis aufrecht erhalten. Man ermittelt auch hier, trotz Übereinstimmung des Wertebereichs, keine übereinstimmenden Ergebnisse.

Auch für die anderen System-Parameter und Abbaugrößen mit verschiedenen Ergebnissen in Stufe I und II erzielt man keine Übereinstimmung der Ergebnisse nach Bildung der Schnittmengen.

Dabei können nicht die verschieden großen Datenmengen, die durch die Schnittmengenbildung entstehen können, als Ursache angesehen werden.

Somit lässt sich zusammenfassen, dass Stufe I und II zwar in ähnlicher Weise reagieren, und zwar dahingehend, dass ein für Stufe I signifikanter System-Parameter auch in Stufe II signifikant ist; beide Stufen sind trotzdem verschiedenartig und sind daher auch so zu behandeln.

#### 6.4.2 Vergleich zwischen den Phasen

Beim Vergleich der Ergebnisse zwischen den Phasen ist zunächst Tabelle 6-2 heranzuziehen. Auf den ersten Blick sieht man ein Vielzahl von Nicht-Übereinstimmungen der Ergebnisse. Wie schon im vorigem Abschnitt beschrieben, sind für die Betrachtungen jedoch Vergleiche bei gleichen Streubereichen ausschlaggebend, also die Ergebnisse nach Schnittmengenbildung. Auch hier wird beim Vergleich der Ergebnisse exemplarisch der Parameter BSB/CSB untersucht. Er weist für fast alle Abbau-Größen besonders hohe  $\varepsilon^2$ -Werte auf und hat daher sehr hohen Einfluss auf das Abbauverhalten. Es wird nun das Beispiel 2 aus 6.2 untersucht.

Doch zunächst allgemeines zur Auswertung: Alle nicht markierten roten Zellen der ANOVA, die darüber hinaus für die verschiedenen Varianten der Untergruppenbildung, gekennzeichnet mit ANOVA a) und b), übereinstimmen, stellen für die jeweilige Abbaugröße unwichtige Systemparameter dar. Wo die ANOVA-Aussagen je nach Art der Untergruppenbildung abweichen, müssen die jeweiligen Untergruppenvergleiche herangezogen und anhand derer entschieden werden. Meist lassen sich diese unterschiedlichen Ergebnisse mit den Verteilungen der Messwerte über den Streubereich erklären. Darüber hinaus sind diese Einflüsse sehr klein und nur als Trend zu beschreiben. Außerdem sind die Streuungen sehr viel höher als die Unterschiede der Mittelwerte der einzelnen Untergruppen. Diese Effekte sind zwar numerisch signifikant, stellen jedoch wahrscheinlich Artefakte dar. Es lässt sich also festhalten, dass ein Effekt wahrscheinlich ein Artefakt ist, wenn sich bei der Auswertung der ANOVA, je nach Art der Untergruppenbildung, einmal ein signifikanter Einfluss und einmal ein nicht-signifikanter Einfluss bestimmen lässt. Alle anderen Parameter müssen genauer

untersucht werden, weil eine grüne Zelle zwar Signifikanz des Einflusses des System-Parameters auf die jeweilige Abbau-Größe bedeutet, Einklang aber nur unter gleichen Bedingungen, d.h. bei gleichen Streubereichen gewährleistet ist. Darüber hinaus müssen bei markierten Zellen die Ergebnisse untersucht werden.

Der System-Parameter Sauerstoff kann nicht zwischen beiden Phasen verglichen werden, da die Art der Belüftung und Messung der Sauerstoffkonzentrationen, bezüglich Häufigkeit der Messungen und Messpunkte geändert wurden. Beide Phasen sind separat zu betrachten, wobei die Ergebnisse natürlich Gültigkeit haben. Nur ein Vergleich anhand der Schnittmengenbildung ist nicht aussagekräftig.

Bei der Temperatur liegt die Verschiedenartigkeit beider Phasen auf der Hand, da als Phase I gewollt ein temperaturkonstanter Zeitraum untersucht wurde.

Darüber hinaus werden nur die Ergebnisse der ANOVA bei denjenigen Parametern betrachtet, die laut Korrelationsanalyse signifikant sind. Die Berechtigung für diese Vorgehensweise wird im nächsten Abschnitt erläutert.

Führen verschiedene Ergebnisse der Korrelationsanalyse, dargestellt durch markierte Zellen, zu übereinstimmenden Ergebnissen bei der ANOVA, ist davon auszugehen, dass dies an den verschiedenen hohen Signifikanzschranken für beide Phasen liegt. Aber das ist zweitrangig, da zuerst die Schnittmengen gebildet werden sollen.

Somit bleiben für den Vergleich der Ergebnisse beider Phasen noch die in Tabelle 6-3 System-Parameter.



Tab.6-3: Vergleich der Ergebnisse für Phase I und Phase II für beide Stufen. Ausschnitt aus Tab. 6-2 durch Weglassung der eindeutig nicht-signifikanten System-Parameter sowie Sauerstoff und Temperatur.

## Stufe I

Abbau-Größe \ System-Größe	Korrelation			ANOVA nach a)			ANOVA nach b)		
	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA Abbau	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA Abbau	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA Abbau
CSB-Fracht [kg]				▲		▲	▲		▲
BSB-Fracht [kg]			▲	▲		▲	▲		▲
CSB-SA-Fr. [kg]	▲			▲		▲	▲		▲
BSB/CSB	▲			▲		▲	▲		▲
NH <sub>4</sub> -N [kg]	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
TS [kg]			▲			▲			▲

## Stufe II

Abbau-Größe \ System-Größe	Korrelation			ANOVA nach a)			ANOVA nach b)		
	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA Abbau	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA Abbau	CSB-Abbau	BSB-Abbau	CSB-SA Abbau
CSB-Fracht [kg]									
BSB-Fracht [kg]									
CSB-SA-Fr. [kg]				▲			▲		
BSB/CSB			▲			▲			▲
VWZ [h]				▲	▲				
Gesamt-N [kg]	▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲	▲
NH <sub>4</sub> -N [kg]	▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲	▲
TS [kg]			▲						▲
orgTS [kg]		▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲

Markierte grüne Zellen bedeuten, dass in Phase I der betrachtete System-Parameter keinen signifikanten Einfluss auf die entsprechende Abbaugröße hat; in Phase II hingegen ist der Einfluss signifikant. Markierte rote Zellen beschreiben das gegenteilige Ergebnis. Es lässt sich somit feststellen, dass hauptsächlich Fälle auftreten, bei denen sich für Phase I keine Signifikanz und für Phase II Signifikanz hinsichtlich des Einflusses der Systemgröße auf die Abbau-Größe bestimmen lässt.

Anschaulich ist dies schon allein anhand der unterschiedlichen Signifikanzschranken zu erklären, besonders, wenn man die Werte der Korrelationskoeffizienten und die  $\varepsilon^2$ -Werte betrachtet. Diese haben dort, wo grüne markierte Zellen angegeben sind, in Phase II sehr kleine Werte (vgl. Kap. 5.2.2). Das kann schon allein anhand der verschiedenen Datenmengen erklärt werden. Aussagen in bezug auf Einklang der Ergebnisse lassen sich damit allerdings nicht machen.

Als Parameter mit großer Auswirkung wird nun für beide Phasen für Stufe II der System-Parameter BSB/CSB für die Abbau-Größe CSB-SA-Abbau untersucht. In Phase I liegt dafür kein signifikanter Einfluss vor, in Stufe II schon (vgl. Beispiel 2 in 6.2).

Für die Wertebereiche erhält man die in Tabelle 6-4 angegebenen.

Tab. 6-4: Streubereiche für Stufe II in Phase I und II sowie der gemeinsame Streubereich

	Stufe II Phase I		Stufe II Phase II		Schnittmenge	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
BSB/CSB	0,3648	0,7371	0,0238	0,7304	0,3648	0,7304

Dabei kann der Streubereich in Phase I als Teilmenge des Streubereichs von Phase II angesehen werden

In der folgenden Abbildung werden die Ergebnisse der ANOVA sowie die Untergruppenvergleiche dargestellt. Zuerst für Phase I in a), dann für Phase II anhand der Gesamtdatenmenge in b) und anhand der reduzierten Datenmenge, die den gemeinsamen Streubereich umfasst in c).

a)

Phase I

Analysis of Variance for CSB-SA-Abbau Stufe II

Source	DF	SS	MS	F	P
BSB/CSB	4	491	123	0.28	0.891
Error	40	17699	442		
Total	44	18190			

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean
1	9	24.01	29.48	(-----*-----)
2	10	32.51	19.62	(-----*-----)
3	12	29.14	20.29	(-----*-----)
4	12	32.69	15.59	(-----*-----)
5	2	27.52	8.71	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----  
0            20            40            60

b)

Phase II original

Analysis of Variance for CSB-SA-Abbau Stufe II

Source	DF	SS	MS	F	P
BSB/CSB	4	58248	14562	17.36	0.000
Error	502	421150	839		
Total	506	479397			

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean
1	28	-21.09	52.21	(-----*-----)
2	59	-7.41	39.11	(----*-----)
3	223	12.69	24.43	(--*-)
4	157	17.74	23.87	(--*--)
5	40	17.69	30.98	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----  
-16            0            16

c)

Phase II reduzierter Wertebereich

Analysis of Variance for CSB-SA-Abbau Stufe II

Source	DF	SS	MS	F	P
BSB/CSB	4	2003	501	0.79	0.531
Error	349	220585	632		
Total	353	222588			

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean
1	116	14.86	23.67	(-----*-----)
2	126	13.46	25.81	(-----*-----)
3	71	19.72	22.10	(-----*-----)
4	29	17.79	31.44	(-----*-----)
5	12	14.31	31.68	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----  
8.0            16.0            24.0

Abb. 6-2: Ergebnisse der Varianzanalyse für BSB/CSB und CSB-SA-Abbau für Stufe II  
in a) Phase I, b) Phase II und c) Phase II mit gleichem Streubereich wie bei a).

Man erkennt beim Vergleich der Abbildungen 6-2a) und 6-2c), dass man für beide Phasen die gleichen Ergebnisse erhält, wenn man die übereinstimmende Streubereiche für die Werte der System-Parameter zugrunde legt.

Für andere System-Parameter ist zusätzlich die unterschiedliche Datenmenge zu berücksichtigen, beispielsweise für  $\text{NH}_4$ -Stickstoff in Stufe II. Anhand von Tabelle 6-3 erkennt man, dass sich fast alle Ergebnisse der Phase I von denen der Phase II unterscheiden.

Die Wertebereiche des System-Parameters  $\text{NH}_4$ -N sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tab. 6-5: Streubereiche für Stufe II in Phase I und II sowie der gemeinsame Streubereich.

	Stufe II Phase I		Stufe II Phase II		Schnittmenge	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
$\text{NH}_4$ -N [kg]	10,39	245,34	8,36	330,20	10,39	245,34

Der Streubereich in Phase I ist also Teilmenge des Streubereichs in Phase II. Zum Test auf Übereinstimmung der Ergebnisse in beiden Phasen wird die Varianzanalyse samt Untergruppenvergleiche für Phase II anhand der reduzierten Datenmenge, die den gemeinsamen Streubereich, also hier den der Phase I, umfasst, durchgeführt.

Als Ergebnisse erhält man für die Abbau-Größen CSB-Abbau, BSB-Abbau und CSB-SA-Abbau die in folgender Abbildung dargestellten.

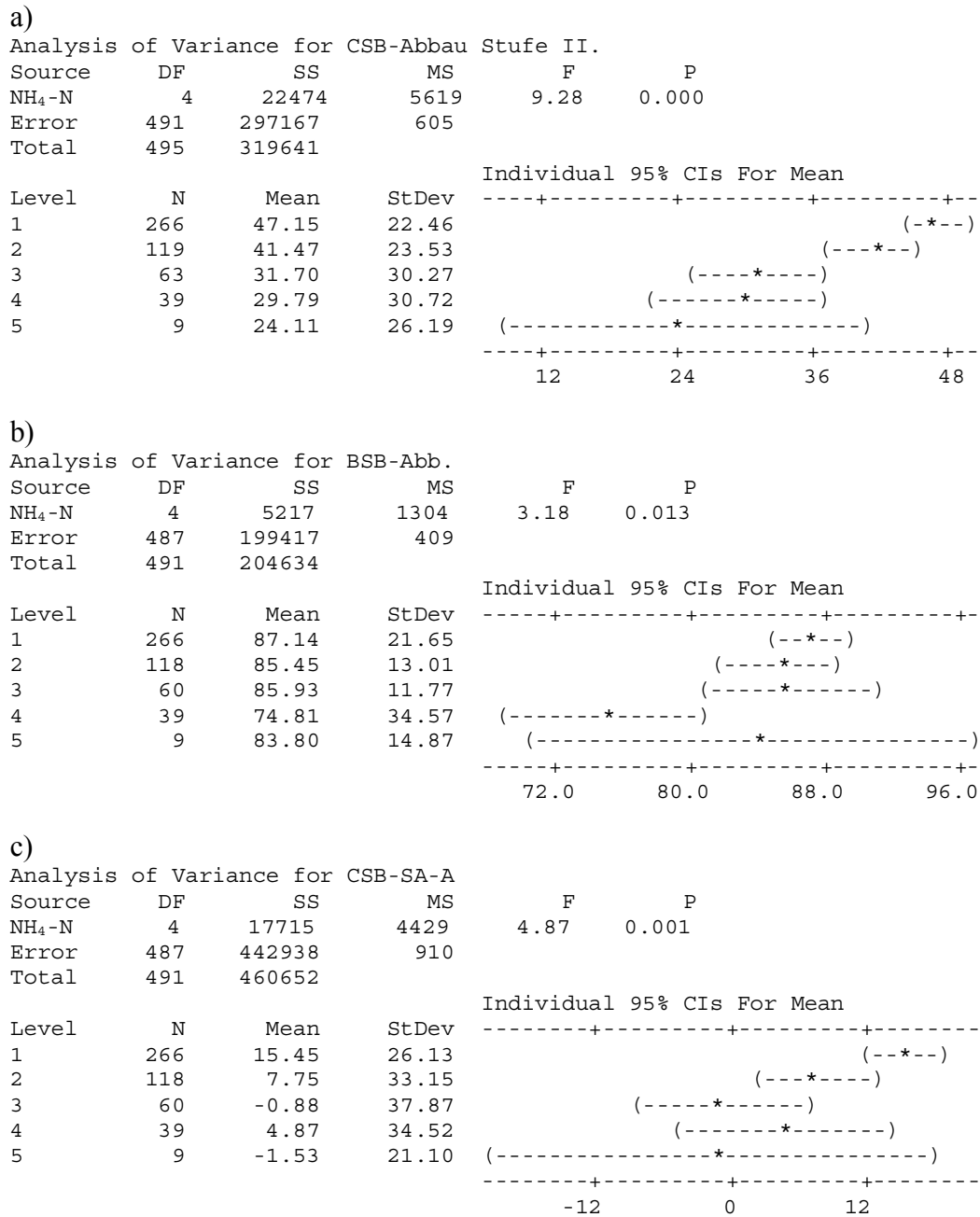


Abb. 6-3: Ergebnisse der Varianzanalyse für NH<sub>4</sub>-N in Stufe II für die Abbau-Größen CSB-Abbau, BSB-Abbau und CSB-SA-Abbau, wobei als Streubereich der NH<sub>4</sub>-Werte der gemeinsame Streubereich in Phase I und Phase II zugrunde gelegt wurde.

Man erkennt anhand der p-Werte, die kleiner als 0,05 sind, dass der System-Parameter  $\text{NH}_4\text{-N}$  immer noch einen signifikanten Einfluss auf das Abbauverhalten hat. Bei Betrachtung der Vertrauensintervalle der einzelnen Untergruppen erkennt man jedoch, dass sich keine klaren Aussagen machen lassen. Bestätigt wird dies durch die im Vergleich zu den Unterschieden der Mittelwerte der Untergruppen sehr hohen Standardabweichungen.

Hier kommt nun zusätzlich der Einfluss der unterschiedlichen Datenmengen zum Tragen. So sind schon die entsprechenden Korrelationskoeffizienten  $r$ , mit  $-0,262$  für CSB-Abbau,  $-0,139$  für den BSB-Abbau und  $-0,172$  unterhalb der Signifikanzschranke von Phase I, die  $0,290$  beträgt. und auch die  $\epsilon^2$ -Werte sind mit  $7,0$ ,  $2,5$  und  $3,6$  kleiner als die kleinsten signifikanten in Phase I. Dieser Vergleich ist jetzt erlaubt, da er sich auf den gleichen Wertebereich bezieht.

Allerdings ist festzustellen, dass man auch ohne vorher die Schnittmengen zu bilden, analoge Ergebnisse erhält. Man könnte somit die Werte für den Korrelationskoeffizienten  $r$  und die  $\epsilon^2$ -Werte auch ohne Schnittmengenbildung als Näherung heranziehen, auch wenn das statistisch gesehen nicht ganz korrekt ist. Anders ausgedrückt, scheinen die Ergebnisse eine gewisse Robustheit gegenüber den Streubereichen der Parameter aufzuweisen.

Analoge Feststellungen lassen sich auch für die anderen Parameter machen. Man kann also sagen, dass sich die Ergebnisse der Phase I und die der Phase II entsprechen, soweit Vergleiche möglich sind.

Es lässt sich also zusammenfassen, dass man die Ergebnisse von Phase I und Phase II übertragen kann, sie stehen also im Einklang miteinander.

Dies bedeutet wiederum, dass die Methode als Maßnahme zur Charakterisierung der Arbeitsweise der ARA und als Grundlage für Vorschläge hinsichtlich der Verbesserung der Leistungsfähigkeit der ARA brauchbar erscheint.

## 6.5 Validierung der Methode

In diesem Abschnitt wird die Frage untersucht, ob die in dieser Arbeit entwickelte Methode, bestehend aus Korrelationsanalyse und anschließender zweifacher ANOVA, brauchbare Ergebnisse liefert. Best-Subsets-Regressionen haben sich schon in Phase I als unbrauchbar erwiesen (vgl. Kap. 4.2.3). Dabei wird getestet, ob auf Grund der Ergebnisse der Korrelationsanalyse System-Parameter wegfallen, die sich bei der ANOVA als signifikant erweisen würden. Man testet bei der Korrelationsanalyse auf einen linearen Zusammenhang zwischen zwei Größen. Die Auswertung ergab jedoch häufig Verläufe, bei denen erst ein Anstieg zu verzeichnen ist und wo dann ab einem bestimmten Grenzwert keine Abhängigkeit mehr auftritt (vgl. Abb. 3-2). Hierfür werden die ANOVAs für sämtliche System-Parameter betrachtet und dahingehend untersucht, ob bei allen auch ANOVA-signifikanten System-Parametern auch Korrelation auftritt. Die Tabellen mit allen Korrelationskoeffizienten und ANOVA-Ergebnissen finden sich im Anhang. Für die Untersuchung der Phase II lassen sich auch die Tabellen 6-2a und 6-2b heranziehen.

Dabei ist die Methode als Gebrauchstauglich anzusehen, wenn

- ein Faktor Korrelation und signifikante ANOVA-Ergebnisse zeigt
- ein Faktor Korrelation und in der ANOVA nicht-signifikante Ergebnisse zeigt
- ein Faktor keine Korrelation und keine signifikanten ANOVA-Ergebnisse zeigt; in diesem Fall erfolgt Reduktion der Parameteranzahl für die ANOVA durchzuführen ist, da hier die ANOVA nicht durchgeführt werden braucht

Die Methode wäre unzuverlässig, wenn sich Fälle finden, bei denen keine Korrelation nachgewiesen wurde, was normalerweise zum Stopp geführt hätte, eine dennoch versuchsweise durchgeführten ANOVA aber dennoch signifikante Ergebnisse liefert.

Dies ist beispielsweise für Phase II in folgenden Fällen festzustellen:

In Stufe I bei

- PI für BSB-Abbau und CSB-SA-Abbau bei Untergruppenvariante a) und CSB-SA bei Untergruppenvariante b)
- Leuchtbakterientest für CSB-SA-Abbau bei Untergruppenvariante a)
- gesamt-P für Untergruppenvariante a)
- TS für BSB-Abbau bei Untergruppenvariante a) und für CSB-Abbau für Untergruppenvariante b)
- Temperatur für CSB-SA-Abbau für Untergruppenvariante a) und für CSB und CSB-SA-Abbau für Untergruppenvariante b),

sowie in Stufe II bei

- $\text{NO}_2\text{-N}$  und  $\text{NO}_3\text{-N}$  für CSB-Abbau und CSB-SA-Abbau, jedoch nur bei Untergruppenvariante a)
- $\text{PO}_4\text{-P}$  bei Untergruppenvariante a)
- TS und CSB-SA-Abbau

Eine nähere Betrachtung zeigt jedoch, dass es sich in bei den aufgeführten Fällen um Artefakte handelt. Die Identifizierung als Artefakte rechtfertigt es, bei mangelnder Korrelation den System-Parameter nicht weiterzuführen.

Es fällt auf, dass die meisten Nicht-Übereinstimmungen bei Untergruppenvariante a), also bei Bildung von gleich stark besetzten Untergruppen, auftreten und bei System-Parametern, deren Verteilungen extreme Werte aufweisen. Diese kommen dann bei a) mit weitestfernten Werten in eine Untergruppe und dann kann es zu signifikanten Ergebnissen führen. Betrachtet man bei diesen System-Parametern die Untergruppenvergleiche, lässt sich trotz Signifikanz keine sinnvolle Aussage machen. Als Beispiel sei das Ergebnis der Varianzanalyse für PI in Stufe I und Phase II für CSB-SA-Abbau bei Untergruppenvariante a) exemplarisch dargestellt:



Analysis of Variance for CSB-SA-Abbau Stufe I Phase II					
Source	DF	SS	MS	F	P
PI	4	8302	2075	2.46	0.045
Error	508	429444	845		
Total	512	437746			

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev			
Level	N	Mean	StDev
1	105	41.42	31.37
2	102	48.77	26.68
3	102	47.51	28.98
4	102	40.82	31.89
5	102	50.81	25.88

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev			
Level	N	Mean	StDev
1	105	41.42	31.37
2	102	48.77	26.68
3	102	47.51	28.98
4	102	40.82	31.89
5	102	50.81	25.88

---+-----+-----+-----+-----+-----  
 (-----\*-----)  
 (-----\*-----)  
 (-----\*-----)  
 (-----\*-----)  
 (-----\*-----)  
 ---+-----+-----+-----+-----+-----  
 36.0      42.0      48.0      54.0

Abb. 6-4: Ergebnisse der Varianzanalyse für PI und CSB-SA-Abbau für Stufe I in Phase II.

Man sieht am Vergleich der Vertrauensintervalle der Untergruppen und bei Betrachtung der Höhe der Standardabweichungen im Vergleich zu den Mittelwert-Unterschieden der Untergruppen, dass sich trotz Signifikanz des System-Parameters keine sinnvolle Aussage machen lässt. Analoges gilt für die anderen Parameter. Diese Ergebnisse können somit als Artefakte angesehen werden.

Auf den Vorteil der zweifachen ANOVA ist bereits ausführlich in Kapitel 5.2.2 eingegangen worden. Er kann nochmals damit zusammengefasst werden, dass man so unabhängig von der Verteilung der System-Parameter den maximalen Informationsgewinn hat. Außerdem kann man so auf die Eliminierung von Ausreißern mittels aufwendiger Ausreißertests, Neueinteilung der Untergruppen usw. verzichten.

Es kann also zusammengefasst werden, dass die in dieser Arbeit entwickelte Methode, die eine Korrelationsanalyse und eine zweifache Varianzanalyse beinhaltet, brauchbar ist, um zum einen die Arbeitsweise der ARA zu charakterisieren und zum anderen Hinweise bezüglich Änderungen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit zu geben.

## 7 Robustheit - Arbeit am Begriff

In den letzten Jahren hat sich die Aufmerksamkeit der Forschung, die sich mit Optimierungsverfahren beschäftigt, vom Bestreben, Optimalwerte für Produkt- oder Prozesskenngrößen zu finden, verschoben, und zwar hin zu dem Bemühen, robuste Werte dieser Kenngrößen zu bestimmen. Die Überlegung, die dahinter steht, ist, dass ein optimierter Prozess unbrauchbar ist, wenn die betrachtete Zielgröße an diesem Punkt sehr empfindlich gegenüber den Veränderungen von Einflussgrößen oder Störvariablen ist.

Doch was genau ist Robustheit?

Robustheit bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, den Zustand der Gebrauchstauglichkeit beibehalten zu können [35]. Sie gibt also darüber Auskunft, ob und wie sehr das System in der Lage ist, bei veränderten Bedingungen immer noch seinen Zweck zu erfüllen.

Diese anschauliche Definition findet sich so oder in abgewandelter Form in einer Reihe von Literaturstellen wieder, vgl. [37]. Darüber hinaus wird sie je nach Fragestellung individuell konkretisiert.

Auch in [36], wo man sich intensiv mit dem Robustheitsbegriff beschäftigt hat, wird darauf hingewiesen, dass die Robustheit ein Begriff der Systembeschreibung ist und dass sehr sorgfältig formuliert werden muss, worauf sich die jeweilige Aussage bezieht.

### 7.1 Weitere Definitionen von Robustheit

Nach [38, 39] wird mit einem Robustheitstest in einer Intra-Laborstudie der Einfluss kleiner Änderungen der Betriebs- oder Umweltbedingungen auf gemessene oder berechnete Ergebnisse bestimmt. Dabei sollen die vorgenommenen Änderungen diejenigen Veränderungen widerspiegeln, die auftreten können, wenn eine Methode auf verschiedene Labore, Anwender, Anlagen usw. übertragen wird. Eine Methode ist robust, wenn keiner der vorgenannten untersuchten Faktoren einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisgröße hat [40]. Die Betrachtungen beziehen sich auf

Ringversuche. In einem Robustheitstest werden diejenigen Faktoren mit starkem Einfluss auf die Zielgröße ausfindig gemacht und müssen dann, falls möglich, sehr genau gesteuert werden.

Guide de Validation Analytique [41]: Die Robustheit eines Analyseverfahrens ist die Fähigkeit, exakte Ergebnisse zu liefern trotz Auftreten kleiner Änderungen der Betriebsbedingungen, die während der Anwendung des Verfahrens auftreten können.

Diese Definition deckt sich mit der oben genannten von Wunsch [35].

Gesellschaften wie ISO oder IUPAC haben noch keine Definition für Robustheit festgelegt.

## **7.2 Überblick über den Gebrauch der Robustheit in der Analytischen Chemie**

Der Begriff Robustheit findet in der Methoden-Validierung Verwendung. Dabei kann die Robustheit einer analytischen Methode allgemein damit beschrieben werden, dass sich die Methode in verschiedenen Laboren unter verschiedenen Bedingungen reproduzieren lässt, ohne dass unerwartete Unterschiede in den jeweiligen Ergebnissen auftreten. Danach ist Robustheit Teil der Präzision und verwandt mit Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit. So kommen in diesem Zusammenhang einige Definitionen für Robustheit der für Reproduzierbarkeit sehr nahe [38, 42]. Präzision als Maß für den zufallsbedingten Fehler lässt sich gliedern in Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit und Robustheit und drückt sich in mehr oder weniger stark streuenden Messwerten aus. Dabei ist Wiederholbarkeit diejenige Präzision unter den bestmöglichen Bedingungen, z.B. dieselbe Fachkraft, an derselben Anlage und am selben Tag. Reproduzierbarkeit bezieht sich auf variierende Bedingungen wie verschiedene Labore, Operatoren, Anlagen in längeren Zeitintervallen usw. und kann daher nur durch Ringversuche bestimmt werden. Das Ergebnis eines Robustheitstests gibt an, wie genau die Einflussfaktoren gesteuert werden sollten. Dabei kann die Ermittlung der Faktoren mit hohem

Einfluss auf die Zielgröße unter Umständen Grundlage einer reproduzierbareren Methode werden.

### 7.3 Robustheitstests

Der Robustheitstest wird anhand eines Faktorenversuchsplans durchgeführt. Dabei sollten die zu untersuchenden Faktoren diejenigen sein, die sich am wahrscheinlichsten ändern, wenn beispielsweise eine Methode auf eine andere Anlage übertragen wird. Die Faktoren müssen variierbar sein und Einfluss auf die Ziel-Größe haben. Es bietet sich an, den Robustheitstest an einem Prozess durchzuführen, der bereits hinsichtlich Präzision und Richtigkeit validiert wurde und eigentlich nicht mehr verändert werden sollte. Dabei sollten die Faktorstufen so gewählt sein, dass sie mögliche Schwankungen abdecken, allerdings sollte der Unterschied der Faktoreinstellungen nicht zu groß sein. Sonst lassen sich unter Umständen signifikante Effekte finden, die jedoch nicht relevant für die Robustheit sind - man läuft Gefahr einen Fehler 1. Art zu machen. Während also bei der Suche nach dem Optimum größere Niveauabstände angemessen werden, ist dies bei Robustheitstests nicht der Fall, hier sind sie wesentlich kleiner [43].

Die Auswertung erfolgt durch Bestimmung der Effekte anhand der gleichen Kriterien, die auch bei Optimierungen angewendet werden. Der Effekt eines Faktors lässt sich normieren, indem man seinen Wert durch den mittleren Wert der Ziel-Größe bei Normaleinstellung teilt und mit 100 multipliziert. Der Effekt wird dann in Prozent angegeben.

$$E_x (\%) = \frac{E_x}{y_{\text{norm}}} 100 \quad (\text{Gl. 7-1})$$

Durch normierte Effekte ist es möglich, Effekte aus verschiedenen Versuchsplänen miteinander zu vergleichen [44].

Finden sich bei der Auswertung des Versuchsplans signifikante Effekte, bedeutet das, dass der zugehörige Faktor im betrachteten Intervall nicht robust bezüglich der Zielgröße ist. Dementsprechend können Einflussgrößen, die keinen signifikanten Effekt aufweisen, im entsprechenden Intervall als robust angesehen werden.

Eine weitere Methode verzichtet auf den Vergleich mit einer statistischen Kenngröße. Hier werden die Effekte bestimmt und ihre Größe untereinander verglichen. Die kritische Größe des Effekts wird dann anhand chemischer Überlegungen festgelegt [45].

Da aus den Ergebnissen eines Versuchsplans ein funktioneller Zusammenhang zwischen der Antwort und den untersuchten Faktoren in Form einer Modellgleichung bestimmt werden kann, lassen sich auch so die Ergebnisse hinsichtlich Robustheit auswerten. Der funktionelle Zusammenhang zwischen den Faktoren A und B und der Zielgröße y sei in der normierten Darstellung der Modellgleichung:

$$y = 0,307 + 0,0077 \cdot A - 0,004 \cdot B \quad (\text{Gl.7-2})$$

Gibt man nun ein Toleranzintervall vor und fügt dieses in die Gleichung ein, erhält man als Ergebnis die robusten Intervalle der Faktoren. Vergleicht man dann diese Intervalle mit der Ungenauigkeit der Einstellungen, lassen sich Aussagen bezüglich der Robustheit der Methode machen. Wird z.B. das Toleranzniveau auf  $\pm 2,5\%$  festgelegt, ergibt sich daraus  $0,025 \cdot 0,307 = \pm 0,0076$  als Betrag für die zulässige Abweichung vom durchschnittlichen Antwortwert 0,307. Das robuste Intervall für den Faktor A erhält man dann aus Gleichung 7-3, die sich aus Gleichung 7-2 ergibt. Da bei einem Faktorenversuchsplan Orthogonalität des Designs gegeben ist, sind A und B unabhängig voneinander. Wird nur der Faktor A untersucht, lässt sich daher der Term mit dem Faktor B weglassen. Analoges gilt für den Faktor B. Man erhält:

$$0,307 \pm 0,0076 = 0,307 + 0,0077A \rightarrow -0,99 < A < 0,99 \quad (\text{Gl. 7-3})$$

Anschaulich bedeutet das, dass der Faktor A Werte zwischen -0,99 und 0,99 einnehmen kann, ohne dass sich die Zielgröße um mehr als 2,5% ändert, und damit einen Wert außerhalb des Toleranzintervalls einnimmt. Da sich die Werte der Faktoren in der normierten Form nur zwischen -1 und +1 bewegen, bedeutet das, dass Faktor A praktisch über den gesamten Bereich schwanken kann, er hat also keine Wirkung.

Schließlich wird das robuste Intervall mit der Ungenauigkeit der Einstellungen verglichen. Ist dieses größer als die Streuung der Faktoreinstellung, ist der entsprechende Faktor unkritisch [46].

Es lässt sich zusammenfassen, dass die Robustheit von Analysemethoden getestet werden kann, indem man einen angemessenen Versuchsplan durchführt und dann mit dem Ergebnis der Datenanalyse in der Lage ist, zu bestimmen, welche der getesteten Faktoren bezüglich der betrachteten Zielgrößen unkritisch sind und welche nicht. Wurden nicht-robuste Faktoren ausfindig gemacht, bleibt dann zu entscheiden, ob die Methode geändert werden soll, oder ob die entsprechenden Faktoren präziser gesteuert werden sollen. Als Ergebnis erhält man lediglich eine Ja/Nein-Aussage bezüglich der Robustheit, auch wenn sie sich auf Grund die Größe der Effekte noch weiter charakterisieren ließe.

#### 7.4 Robustheit in der Taguchi-Methodik

Eine Methodik, die über bekannte Ja/Nein-Aussagen hinausgeht, wurde von Taguchi entwickelt. Er befasste sich hauptsächlich mit Prozess- und Qualitätsverbesserung. Jedoch lassen sich Übereinstimmungen bei den Begriffen Robustheit und Qualität feststellen. So bedeutet Qualitätsverbesserung, das Design eines Produkts oder Prozesses dahingehend zu ändern, dass es unempfindlicher gegenüber Schwankungen wird [47].

Und mit Robustheit eines Prozesses oder Verfahrens wird die Fähigkeit beschrieben, auch bei geringem Einfluss durch Änderungen von nicht-steuerbaren Einflussgrößen gute Produkte zu erzeugen [49].

Die von ihm entwickelte Philosophie und Methodik für Prozess- und Qualitätsverbesserung unterscheidet sich von den herkömmlichen Methoden darin, dass hier die sogenannte Verlustfunktion zugrunde liegt. Der Verlust an Qualität steigt monoton mit wachsender Entfernung vom Zielwert, wenn ein bestimmter Zielwert  $y_0$  angestrebt wird. Nach der einfachsten Form der Verlustfunktion ist der Verlust proportional zum Quadrat der Abweichung vom Zielwert.

$$\text{Verlust} = k(y - y_0)^2 \quad (\text{Gl. 7-4})$$

Dabei ist  $y - y_0$  die gemessene Abweichung vom Zielwert und  $k$  der Verlustkoeffizient.

Der Verlustkoeffizient ist ein individuell festgelegter Wert, der ein Maß für die Kosten darstellt, die durch die Abweichung vom Zielwert verursacht werden. So wird auch ein ökonomischer Aspekt in die Verlustbetrachtung integriert.

Der Verlust ist umso kleiner je besser der Zielwert getroffen wird und je kleiner die Varianz ist.

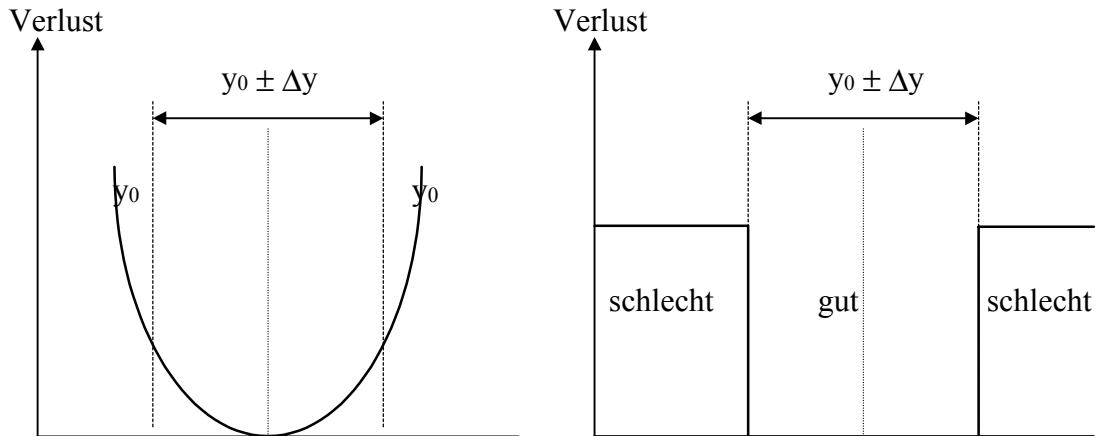


Abb.7-1:a) Verlustfunktion nach Taguchi b) herkömmliche Verlustfunktion [10]

Nach Taguchi wird eine stetige Verbesserung angestrebt. Dies unterscheidet sich von der klassischen Vorgehensweise, wo zunächst Spezifikationsgrenzen festgelegt werden und je nachdem ob der Zielwert innerhalb oder außerhalb dieser Grenzen liegt, wird ein Prozess oder Produkt als gut oder schlecht angesehen. Der Verlust lässt sich hierbei durch eine Sprungfunktion beschreiben, wie sie in Abb. 7-1b dargestellt ist. Das führt zu einer Betrachtungsweise, die Verbesserungen nicht mehr als nötig ansieht, sofern die Spezifikationslimits eingehalten werden, alle Produkte innerhalb des Toleranzbereichs werden als gleich gut angesehen. Außerdem wird so ein Produkt, das gerade noch innerhalb der Toleranz liegt als gut angesehen, ein Produkt oder Prozess, der gerade außerhalb der Spezifikationsgrenzen als schlecht. Obwohl sich beide Zustände nur minimal voneinander unterscheiden, werden sie verschiedenen Kategorien zugeordnet. Beides entspricht eigentlich nicht der Wirklichkeit. Anhand der Verlustfunktion berücksichtigt Taguchi eine kontinuierliche Differenzierung, ausgedrückt durch einen weichen Übergang von der Zielgröße  $y_0$  weg.

Je näher ein Wert am Zielwert ist desto mehr kann dieser schwanken, und je kleiner die einer Antwortgröße zugehörige Standardabweichung desto weiter kann ein Wert vom Zielwert entfernt sein, ohne dass jeweils die Spezifikationsgrenzen überschritten werden. Gleichzeitig erreicht so die Verlustfunktion niedrige Werte [47].

Sieht man jetzt Robustheit wieder als Ausdruck für erlaubte Abweichungen, ohne dass der Status der Gebrauchstauglichkeit aufgegeben wird, lässt sich Robustheit erhöhen durch Verringerung der Standardabweichung und durch möglich genaues Erreichen des Zielwertes. Robustheit geht also einher mit geringen Verlustwerten.

## **7.5 Kenngrößen für Robustheit**

Zur Beschreibung der Robustheit wird eine numerische Größe eingeführt, so dass für jeden interessierenden Punkt im Parameterraum die Robustheit angegeben werden kann. Als Kennzahl zu nennen sind die Weighted-Jones-Zahl (WJ) und der Robustheitskoeffizient (RC) [50, 51,52,53].

Die Kennzahlen wurden anhand von Mischungsversuchsplänen entwickelt. Diese besitzen besondere Eigenarten, auf die hier aber nicht eingegangen wird. Die Grundzüge des Konzepts lassen sich auch allgemeiner anwenden.

### **7.5.1 Die Jones-Methode**

Wie auch bei den Robustheitstests bildet ein geeigneter Versuchsplan, der alle relevanten Faktoren beinhaltet, die Grundlage der Methode. Es wird eine Modellgleichung gewählt, die die Antwortgröße in Abhängigkeit der Faktoren wiedergibt. Dann werden die Faktoren in zwei Gruppen unterteilt, und zwar in steuerbare Einflussgrößen und Streufaktoren. Die Jones-Methode lässt sich nun veranschaulichen, indem die Zielgröße als Funktion eines steuerbaren und eines Streufaktors dargestellt wird. Man erhält als Darstellung der Antwortfläche der Zielgröße  $y$  als Funktion der Faktoren  $x$  und  $z$ :



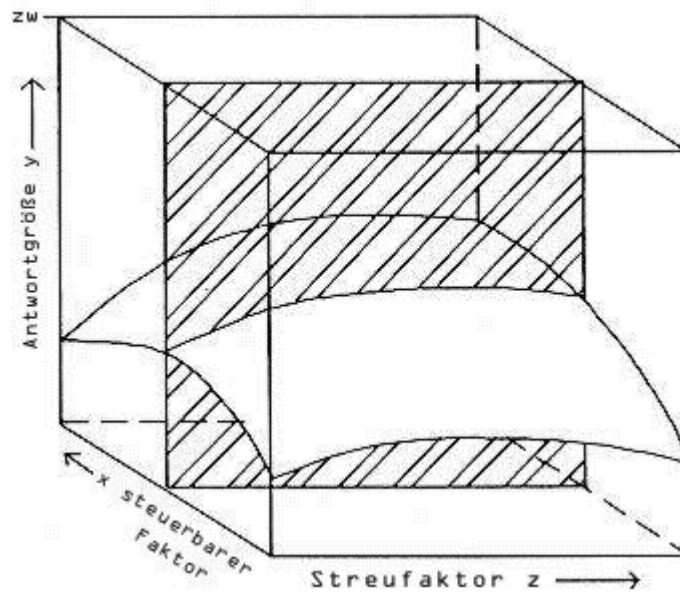


Abb. 7-2: Darstellung der Antwortfläche der Zielgröße  $y$  als Funktion der Faktoren  $x$  und  $z$ .  $ZW$  gibt den idealen Zielwert an.

Wird der steuerbare Faktor nun auf einen bestimmten Wert  $x$  eingestellt und der Streufaktor streut über den gesamten Bereich, erhält man als zweidimensionalen Ausschnitt:

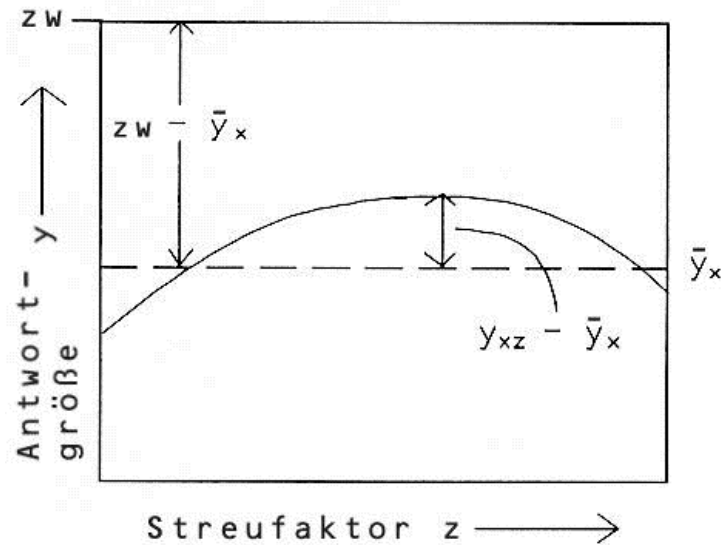


Abb. 7-3: Darstellung der Antwortgröße  $y$  in Abhängigkeit vom Streufaktor  $z$  bei konstantem Wert für Faktor  $x$ .  $\bar{y}_x$  ist die mittlere Zielgröße bei konstantem  $x$ ,  $y_{xz}$  ist die Zielgröße bei einer bestimmten Kombination der Faktorwerte  $x$  und  $z$ .

Dabei beschreibt  $y_{xz} - \bar{y}_x$  die Robustheit der Ausbeute bei der gewählten Parameter-Einstellung gegenüber der Zielgröße  $z$ . Es ist wünschenswert, wenn  $y_{xz} - \bar{y}_x$  sehr kleine Werte aufweist. Jedoch kann dieser System-Zustand vom Optimum der Ziel-Größe, beispielsweise der Ausbeute, unter Umständen weit weg sein. Diese Entfernung zum optimalen Zielwert wird beschrieben durch  $ZW - \bar{y}_x$ , dabei ist  $ZW$  der Zielwert am Optimum. Beide beschriebenen Differenzen stellen an sich unabhängige Größen dar. Dabei ist es am besten, wenn beide Werte dieser Differenzen klein sind. Gesucht ist also eine Größe, welche beide zusammenfasst und dann gegebenenfalls auch eine neue Zielgröße für Optimierungen sein kann; vor allem, wenn entsprechend Wichtungen erfolgen.

Um die Robustheit zu beschreiben, benutzt Jones als Erfüllungskriterium einen Verlustwert  $L(x)$ , der den integrierten quadratischen Fehler beinhaltet:

$$L(x) = k \int_{R_z} (ZW - y_{xz})^2 dz \quad (\text{Gl. 7-4})$$

Dabei ist  $k$  Integrationskonstante, mit  $k^{-1} = \int_{R_z} dz$ ,  $R_z$  ist das Streuintervall des Faktors  $z$  und  $ZW$  ist der optimale Zielwert.

Der Verlustwert  $L(x)$  lässt sich in zwei Terme aufspalten; in einen,  $M(x)$ , der die mittlere quadratische Abweichung des Mittelwerts vom Zielwert über das gesamte Streuintervall wiedergibt und in einen,  $V(x)$ , der die jeweilige quadratische Abweichung vom Mittelwert darstellt. Der Verlustwert  $L(x)$  kann dann als Summe beschrieben werden.

$$M(x) = k \int_{R_z} (ZW - \bar{y}_x)^2 dz \quad (\text{Gl. 7-5})$$

$$V(x) = k \int_{R_z} (y_{xz} - \bar{y}_x)^2 dz \quad (\text{Gl. 7-6})$$

$$L(x) = M(x) + V(x) \quad (\text{Gl. 7-7})$$

Durch Einführung eines Gewichtungsfaktors kann nun eine Gewichtung beider Terme stattfinden.

$$R(x) = (1 - \lambda)M(x) + \lambda V(x) \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (\text{Gl. 7-8})$$

Mit dem Wert für  $R(x)$  lässt sich nun die Robustheit an der Stelle  $x$  quantifizieren, wobei gilt: Je kleiner der Wert  $R(x)$  desto robuster ist das Ergebnis bei der jeweiligen Faktoreinstellung.

Die Weiterentwicklung dieser Methode basiert u.a. auf einer Änderung des Variationsterms. Bisher wurde eine Gleichverteilung der Streugröße zugrunde gelegt. Dadurch hat jeder Wert im Intervall  $R_z$  den gleichen Einfluss auf  $V(x)$ . Die

Weiterentwicklung beinhaltet nun die Normalverteilung der Streugröße, was berücksichtigt, dass ein Auftreten eines Werts  $z$  in der Mitte des Intervalls  $R_z$  wahrscheinlicher ist, als am Rand.

Bei der Bestimmung der Weighted-Jones-Zahl (WJ) werden zudem die oben beschriebenen Besonderheiten der Mischungsversuche berücksichtigt. Für Details sei auf die Literatur verwiesen [50, 51].

### **7.5.2 Der Robustheitskoeffizient RC**

Ebenfalls am Beispiel von Mixturplänen wurde von De Boer und Mitarbeitern der Robustheitskoeffizient RC entwickelt [52, 53]

Robustheit wird hier definiert als maximal erlaubte Änderung der unabhängigen Variablen, also der Faktoren, ohne dass die betrachtete Antwortgröße als abhängige Variable einen Wert außerhalb vorbestimmter Grenzen einnimmt. Dies entspricht der Definition als Fähigkeit eines Systems, den Zustand der Gebrauchstauglichkeit beibehalten zu können [35]. Grundlage für die Berechnung des Robustheitskoeffizienten ist auch hier eine Modellgleichung, die die Antwortgröße in Abhängigkeit der Faktorwerte beschreibt.

Veranschaulichen lässt sich das Konzept am besten anhand eines Beispiels mit nur einer Variable  $x$ .

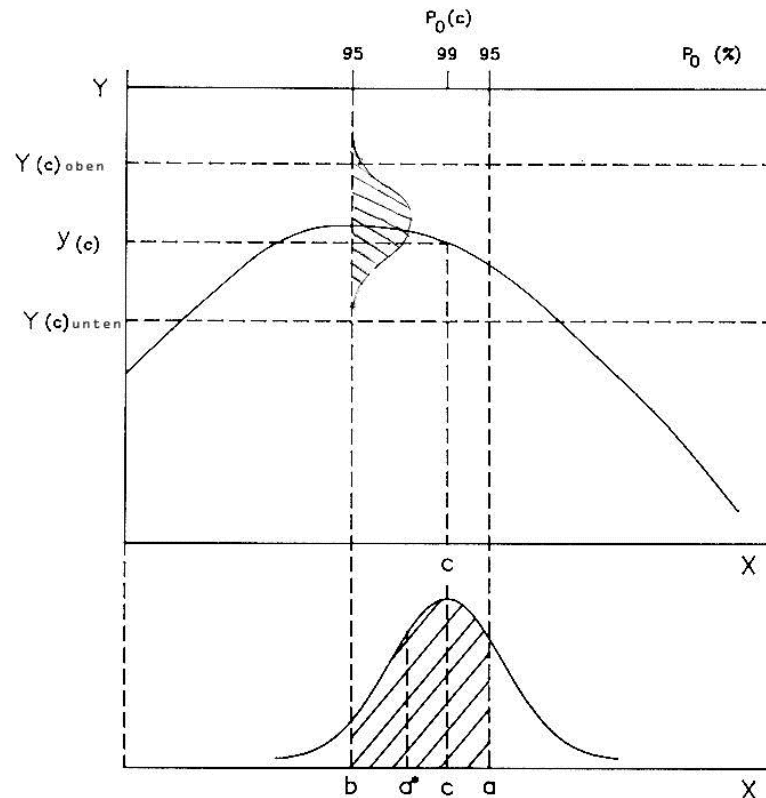


Abb. 7-4: Konzept des Robustheitskoeffizienten RC

Es wird angenommen, dass die Variable  $x$  an der betrachteten Stelle  $C$  normalverteilt sei mit der Standardabweichung  $\sigma_x(c)$ . Diese ist prozessabhängig und kann nicht auf einen bestimmten Wert eingestellt werden. Der erlaubte Schwankungsbereich der Antwortgröße  $y$  wird begrenzt durch  $y_{\text{oben}}$  und  $y_{\text{unten}}$  und kann frei gewählt werden. Er stellt die maximal tolerierbare Schwankung der Antwortgröße am Punkt  $C$  dar. Für die Antwortgröße wird auch eine Normalverteilung angenommen. Die obere Achse  $p_0$  beschreibt den prozentualen Anteil der Überlappung zwischen der Verteilung von  $y$  und dem erlaubten Schwankungsintervall. Außerdem wird ein minimaler Überlappungsanteil festgelegt, bezeichnet mit  $m_{\bar{0}}$ . Dieser soll beispielsweise 95% betragen. Als Bedingung wird festgesetzt, dass am interessierenden Punkt  $C$  der Wert, der für  $p_0$  bestimmt wird, größer oder gleich dem für  $m_{\bar{0}}$  festgelegten sein muss. Durch die Festsetzung von  $m_{\bar{0}}$  wird also der Bereich begrenzt, innerhalb dessen der Wert von  $x$  schwanken kann, wenn der Wert  $C$  eingestellt werden sollte und die Antwortgröße mit einer Wahrscheinlichkeit von  $m_{\bar{0}}$ , hier also 95%, immer noch im Intervall zwischen  $y_{\text{oben}}$  und  $y_{\text{unten}}$  liegt.

Hier kann, bei einem eigentlich gewünschten  $x$ -Wert von  $C$ ,  $x$  jeden Wert zwischen  $b$  und  $a$  annehmen, und die Wahrscheinlichkeit, dass der erhaltene Wert für  $y$  innerhalb des festgelegten erlaubten Streubereichs für  $y(C)$  liegt, ist mindestens 95%.

Die untere schraffierte Fläche stellt die Wahrscheinlichkeit dar, dass bei einem eingestellten Wert  $C$  der tatsächliche  $x$ -Wert zwischen  $b$  und  $a$  liegt.

Es bietet sich an, diese Wahrscheinlichkeit nun als Robustheitskoeffizient zu definieren. Da es jedoch bei mehr als einer Variablen sehr kompliziert ist, einen asymmetrischen Teil der Verteilung zu berechnen, wird der Robustheitskoeffizient durch den kleinsten symmetrischen Teil der Verteilung um den Punkt  $C$  beschrieben, dessen  $p_0$ -Wert mindestens  $m_0$  entspricht, hier also von  $a^*$  bis  $a$ .

Alternativ lässt sich zur Bestimmung des Robustheitskoeffizienten auch nur der Abstand  $a-c$  heranziehen, wobei  $a-c$  im Vergleich zu  $b-c$  das kleinere Intervall bildet. Den Abstand benutzt man vor allen, wenn die Verteilung von  $x$  unbekannt ist. Im eindimensionalen Fall lässt sich der Robustheitskoeffizient als Standard-Normal-Abstand bestimmen.

$$RC = (a-c)/\sigma(c) \quad (\text{Gl. 7-9})$$

Allgemein ist der Robustheitskoeffizient definiert als kleinster Mahalanobis-Abstand zwischen einem willkürlichen Punkt  $P$  und einem Punkt  $C$ , wobei die Verteilung von  $y$  am Punkt  $P$  genau  $m_0$  Prozent mit dem erlaubten Streuintervall für  $y(c)$  überlappt. Der Mahalanobis-Abstand ist definiert als

$$D_m = [(a-c)' \sigma^{-2}(c)(a-c)]^{1/2} \quad (\text{Gl. 7-10})$$

und muss im mehrdimensionalen Fall angewendet werden. Ferner berücksichtigt er auch Nicht-Normalverteilungen.

Der Robustheitskoeffizient lässt sich also als Wahrscheinlichkeit oder Abstand ausdrücken, wobei sich bei normalverteilten Variablen aus dem Abstand die Wahrscheinlichkeit berechnen lässt.

Er kann erklärt werden als die untere Grenze der Wahrscheinlichkeit, dass  $y$  zu  $m_{\bar{0}}$  Prozent im Grenzintervall liegt, wenn  $x$  auf  $C$  eingestellt ist. Je größer der Wert für  $R_C$  desto robuster ist das System.

Der Robustheitskoeffizient hängt ab

- von dem Fehler in der Einstellung des Faktors  $x$
- von dem jeweiligen funktionellen Zusammenhang zwischen den Faktoreinstellungen und der Antwortgröße
- von der Streuung der Antwortgröße

Dabei ist der Robustheitskoeffizient umso kleiner je stärker der Faktor  $x$  streut, denn eine große Streuung führt zu einer flachen Verteilungskurve bzw. einer hohen Standardabweichung. Bei gleich großem Intervall  $a-c$  erhält man auf Grund des größeren Nenners einen kleineren Wert von  $R_C$ .

Ferner lässt sich feststellen, dass bei zunehmender Steigung der Antwortfunktion der Robustheitskoeffizient sinkt.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

Bei der werkseigenen ARA beobachtet man schwankende Abbauleistung, ohne jedoch die Gründe hierfür zu kennen.

Es sollte eine Methode entwickelt werden, die es ermöglicht, einen Zusammenhang zwischen den Betriebs-Parametern und der Leistungsfähigkeit der ARA, ausgedrückt durch die Abbau-Größen CSB-Abbau, BSB-Abbau und CSB-SA-Abbau, herzustellen. Dabei soll vor allem durch ein verbessertes Verständnis ihrer Betriebsbedingungen eine Steigerung von Leistung und Robustheit der Anlage erreicht werden. Dabei wurde hauptsächlich auf die routinemäßig aufgenommenen Betriebs-Parameter zurückgegriffen. Es wurden aber auch neue System-Größen generiert, wie BSB/CSB, die sich bei der Beschreibung und Beurteilung der Zusammenhänge als sehr leistungsstark erwiesen haben.

Es wurden mögliche Optimierungs-Methoden vorgestellt, wobei auf experimentelle und nicht-experimentelle Verfahren eingegangen wurde. Da für diese Arbeit ausschließlich Datensätze vorgegeben waren, wurde eine Methode aus nicht-experimentellen Verfahren entwickelt, also anhand von statistischen Parameteruntersuchungen. Das entwickelte Verfahren, das für die oben angegebene Fragestellung brauchbar ist, beinhaltet die Stufen Korrelationsanalyse und zweifache Varianzanalyse. Dabei wird bei der Korrelationsanalyse die Anzahl der im Folgeschritt zu untersuchenden Parameter eingeschränkt. Durch die ANOVA mit paarweisem Untergruppenvergleich werden dann die Parameter identifiziert, die das Abbauverhalten signifikant beeinflussen. Es lassen sich diejenigen Parameterbereiche bestimmen, bei denen es zu hohen und stabilen Abbauraten kommt. Anhand der Standardabweichung lassen sich innerhalb eines Bereichs gleicher Abbauwerte noch robuste Bereiche identifizieren. Die zweifache ANOVA beinhaltet zwei verschiedene Varianten der Untergruppenbildung, zum einen in gleich stark besetzte Untergruppen und zum anderen in gleich große Intervalle. Durch



diese Vorgehensweise muss die Verteilung der Werte der System-Parameter nicht berücksichtigt werden. Sie ermöglicht einen maximalen Informationsgewinn hinsichtlich der Bereiche eines Streubereichs. Das eben vorgestellte Verfahren wurde an einem kleinen, ausgewählten Datenmaterial entwickelt. Die Validierung erfolgte durch Anwendung der Methode an einem großen und zudem die Zustandsbereiche der ARA besser repräsentierenden Datenmaterial. Der Test auf Gebrauchstauglichkeit beinhaltet Gegenüberstellung und Vergleich beider Ergebnisse. Dabei wurde auf die Auswirkungen der Verschiedenartigkeit der Daten in bezug auf Menge und Streubereich eingegangen und diese in die Betrachtungen mit einbezogen. Es konnte gezeigt werden, dass die Methode gebrauchstauglich und somit für die Fragestellung dieser Arbeit anwendbar ist. Als Ergebnis ihrer Anwendung konnte gezeigt werden, dass beide biologische Stufen sich zwar ähnlich verhalten, aber dennoch als unabhängige Systeme zu bewerten sind.

Als Ergebnis für die Zusammenhänge in der ARA lässt sich festhalten, dass die Abbauleistung hauptsächlich von der Menge der eingeleiteten Schadstoffe und der Zusammensetzung der Schadstoffe hinsichtlich dem Verhältnis schwerer und leicht abbaubarer Substanzen abhängt. Dabei scheint es für die Parameter CSB-Fracht, BSB-Fracht und CSB-SA-Fracht eine untere Grenzfracht zu geben, bei der die ARA unterversorgt ist und was verminderte Abbauraten zur Folge hat. Darüber hinaus scheint es günstige Verhältnisse BSB/CSB zu geben, zumal sich in Phase II Stufe II die ganz geringen Abbauverhältnisse bei ganz niedrigen BSB/CSB-Werten ergeben. Der Leuchtbakterientest gibt darüber keine Hinweise. Jedoch kann Sauerstoff als Indikator für gutes Arbeiten dienen: Treten hohe Konzentrationen auf, bedeutet dies, dass der in das Belebungsbecken eingebrachte Sauerstoff nicht komplett von der Biomasse aufgenommen wurde. Auch für die Schlammmenge ist eine Mindestmenge einzusetzen.

In einem weiteren Kapitel wurde auf den Robustheitsbegriff eingegangen. Dabei wurden neuere Verfahren zur Bildung einer Robustheitskennzahl vorgestellt.

## 8.2 Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Schwerpunkt auf die statistischen Zusammenhänge zwischen den System-Parametern und der Abbauleistung gelegt. Die sachlichen Zusammenhänge wurden nur am Rande diskutiert. Hier tut sich ein weiteres Betätigungsfeld auf, da statistische Ergebnisse nur mathematische Zusammenhänge liefern; Kausalitäten bleiben unberücksichtigt. Statistische Ergebnisse sind aber nur dann wirklich „gute“ Ergebnisse, wenn sie sachlich erklärbar sind und somit keine Artefakte darstellen.

Bleibt man beim Thema ARA, lässt sich die Methode auf weitere abgeleitete System-Parameter, wie beispielsweise das Verhältnis TS/CSB-Fracht usw. oder auf andere speziellere Outputgrößen, die als kritisch angesehen werden, ausdehnen, wie der Abbau der Phenolindex-Stoffe.

Betrachtet man die entwickelte Methode, ließe sie sich auch auf andere Fragestellungen anwenden, besonders wenn es darum geht, eine umfangreiche Datenmenge auszuwerten und gezielte Fragen zu beantworten.

Die der Arbeit zugrunde liegende Fragestellung wurde abschließend behandelt.

## **Anhang**

### **Phase I**

Ergebnisse der Korrelationsanalyse Stufe I	II
Ergebnisse der Korrelationsanalyse Stufe II	III
Untergruppen Stufe I	IV
Untergruppen Stufe II	V
Ergebnisse der ANOVA Stufe I	VI
Ergebnisse der ANOVA Stufe II	VII
ANOVAs der signifikanten System-Parameter der Stufe I	
CSB-Abbau	IX
BSB-Abbau	X
CSB-SA-Abbau	XI
ANOVAs der signifikanten System-Parameter der Stufe II	
CSB-Abbau	XIII
BSB-Abbau	XIV
CSB-SA-Abbau	XVI
Gegenüberstellung der Streubereiche für Phase I und Phase II	XVIII

### **Phase II**

Ergebnisse der Korrelationsanalyse Stufe I	XX
Ergebnisse der Korrelationsanalyse Stufe II	XXI
Untergruppen Stufe I	XXII
Untergruppen Stufe II	XXIII
Ergebnisse der ANOVA Stufe I	XXIV
Ergebnisse der ANOVA Stufe II	XXV
ANOVAs der signifikanten System-Parameter der Stufe I	
CSB-Abbau	XXVI
BSB-Abbau	XXIX
CSB-SA-Abbau	XXXI
ANOVAs der signifikanten System-Parameter der Stufe II	
CSB-Abbau	XXXIV
BSB-Abbau	XL
CSB-SA-Abbau	XLIV

## Ergebnisse der Korrelationsanalyse Stufe I für Phase I

	CSB	BSB	CSB-SA	BSB/CSB	AOX	PI	Leucht.	O2
BSB	0.924							
CSB-SA	0.758	0.451						
BSB/CSB	-0.088	0.285	-0.692					
AOX	0.222	0.054	0.434	-0.429				
PI	0.198	0.198	0.123	-0.002	0.231			
Leucht.	0.216	0.268	0.045	0.077	0.130	0.396		
O2	-0.394	-0.346	-0.330	0.167	-0.036	-0.233	-0.201	
O2-Schw.	-0.230	-0.132	-0.311	0.289	-0.322	-0.128	0.034	0.599
VWZ	-0.629	-0.575	-0.487	0.097	-0.354	-0.121	-0.344	0.132
ges.-N	0.282	0.211	0.299	-0.228	0.297	0.040	0.101	0.057
NO2-N	0.070	-0.057	0.261	-0.359	0.217	0.412	0.077	0.073
NO3-N	0.036	-0.099	0.253	-0.410	0.361	-0.142	-0.039	0.131
NH4-N	0.148	0.251	-0.083	0.259	-0.038	-0.206	-0.029	0.024
ges.-P	0.116	0.127	0.055	-0.008	0.210	0.108	0.279	-0.285
PO4-P	-0.002	0.082	-0.145	0.192	0.008	-0.147	-0.005	0.231
TS	0.563	0.618	0.259	0.180	0.021	-0.021	0.168	-0.052
orgFrach	0.520	0.576	0.231	0.167	0.124	-0.015	0.187	0.010
Temp.BEI	-0.314	-0.232	-0.311	0.100	0.319	0.643	0.257	0.126
CSB- Abb	0.343	0.351	0.203	0.156	0.033	-0.023	-0.160	0.369
BSB-Abba	-0.234	-0.183	-0.234	0.167	-0.111	-0.424	-0.231	0.666
CSB-SA-A	0.414	0.120	0.761	-0.731	0.344	0.140	-0.117	-0.194

	O2-Schw.	VWZ	ges.-N	NO2-N	NO3-N	NH4-N	ges.-P	PO4-P
VWZ	0.201							
ges.-N	-0.256	-0.586						
NO2-N	-0.175	-0.321	0.646					
NO3-N	-0.135	-0.366	0.645	0.483				
NH4-N	-0.099	-0.067	0.429	-0.202	-0.199			
ges.-P	-0.363	-0.175	0.054	0.144	0.038	-0.081		
PO4-P	-0.037	-0.073	0.081	-0.128	0.024	0.190	0.070	
TS	-0.040	-0.660	0.329	-0.016	0.279	0.090	-0.105	0.237
orgFrach	0.003	-0.666	0.334	0.032	0.350	0.007	-0.020	0.205
Temp.BEI	-0.179	0.191	0.003	0.288	0.016	-0.286	0.460	0.284
CSB- Abb	0.331	-0.254	0.171	0.071	0.068	0.104	-0.139	0.199
BSB-Abba	0.491	0.103	0.035	-0.080	0.141	0.069	-0.085	0.186
CSB-SA-A	-0.191	-0.231	0.216	0.326	0.273	-0.183	-0.059	-0.019

	TS	orgFrach	Temp.BEI	CSB- Abb	BSB-Abba
orgFrach	0.949				
Temp.BEI	-0.298	-0.113			
CSB- Abb	0.346	0.338	-0.248		
BSB-Abba	0.021	0.132	0.086	0.596	
CSB-SA-A	0.090	0.033	-0.278	0.367	-0.076

## Ergebnisse der Korrelationsanalyse Stufe II für Phase II

	CSB	BSB	CSB-SA	BSB/CSB	PI	O2	O2-Schw.	VWZ
BSB	0.938							
CSB-SA	0.826	0.579						
BSB/CSB	0.411	0.690	-0.155					
PI	0.138	0.174	0.040	0.104				
O2	-0.494	-0.546	-0.273	-0.462	-0.181			
O2-Schw.	-0.186	-0.146	-0.200	-0.012	0.078	0.139		
VWZ	-0.071	0.104	-0.335	0.456	-0.054	-0.280	-0.043	
ges.-N	0.040	0.025	0.054	-0.013	-0.207	-0.005	0.122	0.069
NO2-N	-0.163	-0.225	-0.016	-0.297	-0.062	0.376	-0.097	-0.096
NO3-N	-0.063	-0.137	0.075	-0.276	-0.074	0.379	-0.097	-0.219
NH4-N	0.072	0.072	0.052	0.056	-0.190	-0.097	0.144	0.097
ges.-P	0.170	0.089	0.255	-0.080	-0.086	0.099	-0.135	-0.140
PO4-P	0.164	0.093	0.234	-0.063	-0.030	0.058	-0.106	-0.101
TS	0.708	0.717	0.499	0.507	-0.145	-0.546	-0.163	0.113
orgTS BE	0.682	0.694	0.475	0.500	-0.153	-0.535	-0.167	0.112
CSB-Abba	0.550	0.577	0.354	0.389	0.070	-0.491	-0.158	0.160
BSB-Abba	0.509	0.587	0.243	0.552	-0.073	-0.596	-0.073	0.434
CSB-SA-A	0.529	0.455	0.504	0.144	0.006	-0.388	-0.165	0.056
	ges.-N	NO2-N	NO3-N	NH4-N	ges.-P	PO4-P	TS	orgTS BE
NO2-N	0.089							
NO3-N	0.036	0.889						
NH4-N	0.973	-0.140	-0.181					
ges.-P	-0.098	0.058	0.054	-0.111				
PO4-P	-0.058	-0.016	-0.034	-0.054	0.960			
TS	0.062	-0.116	-0.151	0.092	0.338	0.285		
orgTS BE	0.036	-0.098	-0.141	0.063	0.346	0.288	0.996	
CSB-Abba	-0.076	-0.392	-0.373	0.017	0.133	0.114	0.616	0.593
BSB-Abba	0.122	-0.384	-0.378	0.213	0.108	0.103	0.661	0.648
CSB-SA-A	0.001	-0.158	-0.234	0.045	0.075	0.069	0.545	0.530
	CSB-Abba	BSB-Abba						
BSB-Abba	0.740							
CSB-SA-A	0.618	0.645						

## Untergruppen Stufe I für Phase I

CSB-SA-Fr. [kg]		BSB/CSB [kg]		CSB-Fracht [kg]		BSB-Fracht [kg]	
A	B	A	B	A	B	A	B
878,22	863,46	0,644860	0,624424	3657,87	3876,48	2630,72	2549,39
1204,50	1441,04	0,702857	0,698123	4724,68	5141,52	3430,86	3391,26
1481,55	2018,62	0,728682	0,771822	5419,72	6406,56	3887,40	4233,15
1797,32	2596,20	0,777778	0,845521	6128,16	7671,60	4631,17	5075,04
3173,76	3173,78	0,919220	0,919220	8936,64	8936,64	5916,93	5916,93

AOX [kg]		PI [kg]		Leuchtbakt. [GL]		VWZ [h]	
A	B	A	B	A	B	A	B
10,726	14,714	10,727	13,215	82,43	374,288	18,6856	20,90
13,571	25,697	16,286	22,577	156,04	684,196	20,0000	24,80
16,138	36,679	21,807	31,938	333,27	994,104	22,7997	28,69
23,380	47,661	33,805	41,300	477,33	1304,012	27,2454	32,58
58,643	58,643	50,661	50,661	1613,92	1613,92	36,4774	36,48

Sauerstoff [mg/l]		O <sub>2</sub> -Schwa. [mg/l]		Gesamt-N [kg]		NO <sub>2</sub> -N [kg]	
A	B	A	B	A	B	A	B
0,24912	0,578172	0,86479	1,40507	66,102	95,064	2,476	40,0834
0,64194	1,100864	2,01487	2,71036	110,817	156,016	15,786	79,9568
1,36934	1,623556	2,77263	4,01564	152,624	216,968	21,715	119,8302
2,18947	2,146248	3,17108	5,32093	167,293	277,920	37,850	159,7036
2,66894	2,668940	6,62622	6,62622	338,874	338,872	199,577	199,5770

NO <sub>3</sub> -N [kg]		Gesamt-P [kg]		PO <sub>4</sub> -P [kg]		NH <sub>4</sub> -N [kg]	
A	B	A	B	A	B	A	B
4,018	24,2752	6,1488	9,53288	1,3245	7,08736	12,6	15,76
9,643	47,9394	16,8202	18,14356	2,0997	13,73552	16,5	26,52
15,283	71,6036	22,7916	26,75424	2,5656	20,38368	22,6	37,28
36,395	95,2678	26,9315	35,36492	3,4119	27,03184	28,9	48,04
118,932	118,9320	43,9756	43,97560	33,6800	33,68000	58,8	58,80

TS [kg]		orgTS [kg]		Temperatur [°C]	
A	B	A	B	A	B
13624,0	14188,8	8060,6	8230,4	27,9	28,5
15758,4	20041,1	9567,9	12592,6	31,4	29,7
17570,3	25893,3	11378,9	16954,9	32,4	31,0
19919,5	31745,6	13207,7	21317,1	32,8	32,2
37597,9	37597,9	25679,4	25679,4	33,4	33,4

Dargestellt sind die oberen Grenzwerte der einzelnen Untergruppen (Level). Dabei erfolgte die Zuordnung der Werte in gleich stark besetzte Segmente (A) bzw. in gleich große Intervalle (B).

## Untergruppen Stufe II für Phase I

CSB-SA-Fr. [kg]		BSB/CSB [kg]		CSB-Fracht [kg]		BSB-Fracht [kg]	
A	B	A	B	A	B	A	B
805,59	858,52	0,436288	0,439288	1727,89	1916,35	698,33	945,85
975,09	1112,37	0,512835	0,513729	1935,27	2597,40	1119,46	1401,04
1054,88	1366,22	0,557026	0,588177	2400,85	3278,45	1342,84	1856,24
1228,29	1620,07	0,596186	0,662626	2827,07	3959,50	1624,11	2311,43
1873,92	1873,92	0,737075	0,737075	4640,55	4640,55	2766,63	2766,63

PI [kg]		VWZ [h]		Sauerstoff [mg/l]		O <sub>2</sub> -Schwa. [mg/l]	
A	B	A	B	A	B	A	B
4,363	6,772	22,24	21,49	2,16243	2,47251	1,36853	2,64278
6,748	11,547	24,02	24,86	2,46887	3,12714	1,84130	4,45840
9,042	16,322	25,67	28,22	2,73794	3,78178	2,56140	6,27403
10,998	21,098	28,79	31,59	3,10664	4,43641	3,88510	8,08965
48,313	25,873	34,95	34,95	5,09104	5,09104	9,90528	9,90528

Gesamt-N [kg]		NO <sub>2</sub> -N [kg]		NO <sub>3</sub> -N [kg]		NH <sub>4</sub> -N [kg]	
A	B	A	B	A	B	A	B
20,021	59,181	1,513	1,608	2,145	1,859	16,482	57,380
46,356	106,414	3,154	3,102	2,411	2,680	38,148	104,370
68,299	153,646	4,844	4,611	3,050	3,501	62,286	151,360
118,785	200,879	12,200	6,112	3,636	4,322	115,164	198,350
248,112	248,112	75,915	7,614	24,461	5,143	245,340	245,340

Gesamt-P [kg]		PO <sub>4</sub> -P [kg]		TS [kg]		orgTS [kg]	
A	B	A	B	A	B	A	B
8,233	23,395	2,058	7,887	20310,8	18619,5	13476,7	12315,9
15,654	44,294	7,273	15,067	28450,4	26788,4	18276,2	17431,3
19,634	65,193	11,705	22,246	32470,5	34957,2	20748,7	22546,6
25,305	86,092	15,297	29,426	35805,1	43126,1	22449,8	27662,0
106,991	106,991	102,438	36,606	51294,9	51294,9	32777,4	32777,4

Temperatur [°C]	
A	B
30,5	29,8
34,0	31,6
35,1	33,4
35,5	35,2
37,0	37,0

Dargestellt sind die oberen Grenzwerte der einzelnen Untergruppen (Level). Dabei erfolgte die Zuordnung der Werte in gleich stark besetzte Segmente (A) bzw. in gleich große Intervalle (B). Für die Faktoren PI, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N und PO<sub>4</sub>-P ist bei Bildung der Untergruppen nach B hohe Ausreißerwerte weggelassen worden um eine sinnvolle Einteilung zu erreichen.

### Ergebnisse der ANOVA Stufe I für Phase I

	CSB-Abbau				BSB-Abbau				CSB-SA-Abbau			
	A		B		A		B		A		B	
	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$
CSB-Fracht [kg]	0,112	16,4	0,187	13,7	0,416	9,1	0,296	11,3	0,050	20,6	0,067	19,3
BSB-Fracht [kg]	0,030	22,6	0,061	19,3	0,412	9,2	0,678	5,5	0,891	2,7	0,745	4,7
CSB-SA-Fracht [kg]	0,142	15,1	0,503	7,6	0,244	12,5	0,285	11,5	0,000	65,30	0,000	66,8
BSB/CSB [kg]	0,061	19,3	0,289	11,2	0,303	11,1	0,161	14,8	0,000	49,6	0,000	51,7
PI [kg]	0,360	9,8	0,126	15,8	0,032	22,7	0,129	16,0	0,602	6,5	0,118	16,5
VWZ [h]	0,600	6,4	0,331	10,4	0,812	3,8	0,396	9,4	0,099	17,3	1,161	14,8
AOX [kg]	0,568	7,8	0,426	10,2	0,792	4,6	0,444	9,9	0,124	18,2	0,240	14,2
Leuchtbakt. [GL]	0,786	4,0	0,690	3,4	0,167	14,6	0,113	13,4	0,535	7,4	0,567	4,8
Sauerstoff [mg/l]	0,070	19,0	0,052	20,4	0,000	48,9	0,000	54,3	0,394	9,5	0,752	4,6
O <sub>2</sub> -Schwank. [mg/l]	0,107	17,0	0,173	14,3	0,002	34,0	0,007	28,9	0,565	7,0	0,857	3,2
Gesamt-N [kg]	0,270	11,6	0,431	8,7	0,180	14,2	0,583	6,7	0,271	11,8	0,408	9,3
NO <sub>2</sub> -N [kg]	0,979	1,0	0,802	1,0	0,777	4,2	0,940	0,3	0,087	18,0	0,309	5,4
NO <sub>3</sub> -N [kg]	0,572	6,7	0,533	5,0	0,153	15,1	0,860	1,8	0,165	14,6	0,129	12,8
NH <sub>4</sub> -N [kg]	0,025	23,3	0,482	8,0	0,079	18,4	0,140	15,6	0,375	9,8	0,001	36,0
Gesamt-P [kg]	0,654	5,7	0,805	3,8	0,428	9,0	0,264	12,0	0,117	16,5	0,182	14,1
PO <sub>4</sub> -P [kg]	0,894	2,6	0,420	4,0	0,296	11,3	0,262	6,2	0,500	7,9	0,915	0,4
TS [kg]	0,356	10,2	0,271	11,8	0,403	9,3	0,875	2,9	0,979	1,0	0,818	3,7
orgTS [kg]	0,372	10,1	0,211	10,5	0,730	5,0	0,435	6,5	0,891	2,8	0,917	1,3
Temperatur [°C]	0,292	24,1					0,602	14,2	0,373	21,1		



### Ergebnisse der ANOVA Stufe II für Phase I

	CSB-Abbau				BSB-Abbau				CSB-SA-Abbau			
	A		B		A		B		A		B	
	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$
CSB-Fracht [kg]	0,000	42,2	0,000	42,4	0,000	48,5	0,000	51,7	0,006	29,8	0,015	25,9
BSB-Fracht [kg]	0,000	57,6	0,000	54,9	0,000	69,0	0,000	64,4	0,014	26,4	0,028	23,2
CSB-SA-Fracht [kg]	0,272	11,5	0,221	12,7	0,413	9,0	0,468	8,2	0,011	27,2	0,009	28,3
BSB/CSB [kg]	0,001	34,4	0,002	33,4	0,000	50,4	0,000	51,1	0,775	4,3	0,891	2,7
PI [kg]	0,366	9,8	0,365	7,2	0,367	9,7	0,577	4,5	0,365	10,0	0,195	10,7
VWZ [h]	0,336	10,3	0,004	30,7	0,058	19,5	0,000	38,6	0,719	5,0	0,121	16,3
Sauerstoff [mg/l]	0,003	32,8	0,003	28,1	0,005	30,5	0,002	30,7	0,147	15,3	0,068	15,8
O <sub>2</sub> -Schwank. [mg/l]	0,426	9,0	0,625	6,2	0,401	9,4	0,788	4,1	0,305	11,1	0,365	10,0
Gesamt-N [kg]	0,092	17,3	0,924	2,1	0,329	10,4	0,476	8,0	0,022	24,5	0,883	2,8
NO <sub>2</sub> -N [kg]	0,136	15,4	0,914	1,2	0,050	20,2	0,393	7,0	0,623	6,2	0,607	4,4
NO <sub>3</sub> -N [kg]	0,212	13,0	0,312	11,2	0,139	15,2	0,381	9,9	0,629	6,1	0,432	9,3
NH <sub>4</sub> -N [kg]	0,173	14,1	0,811	3,7	0,214	12,9	0,622	6,1	0,023	24,2	0,796	4,0
Gesamt-P [kg]	0,730	4,8	0,953	0,8	0,744	4,7	0,849	1,9	0,636	6,2	0,912	1,2
PO <sub>4</sub> -P [kg]	0,176	14,3	0,835	8,6	0,174	14,3	0,522	30,5	0,538	7,5	0,769	1,3
TS [kg]	0,000	44,4	0,000	51,8	0,000	41,6	0,000	50,1	0,015	26,0	0,005	30,1
orgTS [kg]	0,000	41,6	0,000	47,2	0,002	34,0	0,000	46,0	0,006	29,7	0,007	29,0
Temperatur [°C]	0,196	15,7	0,321	23,0	0,473	7,6	0,532	16,1	0,130	19,4	0,152	31,2

## ANOVAs der signifikanten System-Parameter der Stufe I in Phase I

### Für CSB-Abbau:

Analysis of Variance for csb Abbau

Source	DF	SS	MS	F	P
BSBfr. c	4	198,5	49,6	2,46	0,061
Error	41	828,1	20,2		
Total	45	1026,7			

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev	CI Lower	CI Upper
1	8	79,624	5,709	77,0	80,5
2	8	84,562	4,116	80,5	84,0
3	16	85,101	4,347	84,0	87,5
4	7	83,317	3,490	80,5	84,0
5	7	85,724	4,561	84,0	87,5

Pooled StDev = 4,494

Fisher's pairwise comparisons

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	1	2	3	4
2	-9,477 -0,399			
3	-9,409 -1,547	-4,471 3,392		
4	-8,392 1,005	-3,454 5,944	-2,330 5,898	
5	-10,799 -1,402	-5,861 3,536	-4,737 3,491	-7,260 2,445

Analysis of Variance for csb Abbau

Source	DF	SS	MS	F	P
sauer co	4	209,4	52,3	2,57	0,052
Error	40	813,5	20,3		
Total	44	1022,9			

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev	CI Lower	CI Upper
1	17	81,183	3,802	81,0	84,0
2	6	86,103	4,652	84,0	87,0
3	5	85,321	5,860	84,0	87,0
4	6	84,969	2,364	84,0	87,0
5	11	85,754	5,556	84,0	87,0

Pooled StDev = 4,510

Fortsetzung nächste Seite



Source	DF	SS	MS	F	P
pi cod.	4	78,0	19,5	1,90	0,129
Error	40	410,1	10,3		
Total	44	488,2			

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean			
1	13	96,869	2,008	(-----*-----)			
2	14	96,168	3,981	(-----*-----)			
3	7	95,886	3,863	(-----*-----)			
4	6	94,472	2,989	(-----*-----)			
5	5	92,605	2,321	(-----*-----)			
Pooled StDev = 3,202				90,0	92,5	95,0	97,5

Fisher's pairwise comparisons

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	1	2	3	4
2	-1,791 3,194			
3	-2,051 4,017	-2,714 3,278		
4	-0,797 5,591	-1,462 4,854	-2,186 5,014	
5	0,859 7,670	0,192 6,935	-0,508 7,071	-2,051 5,786

## Für den CSB-SA-Abbau

Source	DF	SS	MS	F	P
CSB-Fr.	4	3928	982	2,39	0,067
Error	40	16416	410		
Total	44	20344			

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean			
1	10	35,65	18,76	(-----*-----)			
2	13	45,88	23,62	(-----*-----)			
3	14	54,64	15,86	(-----*-----)			
4	5	47,05	27,88	(-----*-----)			
5	3	71,99	9,32	(-----*-----)			
Pooled StDev = 20,26				40	60	80	

Fisher's pairwise comparisons

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	1	2	3	4
2	-27,45 6,99			
3	-35,93 -2,03	-24,53 7,01		
4	-33,82 11,03	-22,71 20,38	-13,74 28,92	
5	-63,29 -9,38	-52,33 0,12	-43,40 8,70	-54,84 4,96

Analysis of Variance for Abbau CSB-SA

Source	DF	SS	MS	F	P
CSB-SA	4	13581	3395	20,08	0,000
Error	40	6763	169		
Total	44	20344			

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean		
1	8	16,41	20,95	-----+-----+-----+-----+-----		
2	17	45,40	12,73	(---*--)	(-*--)	
3	13	59,25	7,96		(--*--)	
4	2	62,63	6,18		(-----*-----)	
5	5	74,12	8,67		(----*----)	
				-----+-----+-----+-----+-----		
Pooled StDev =		13,00		25	50	75

Fisher's pairwise comparisons

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	1	2	3	4
2	-40,26 -17,72			
3	-54,65 -31,03	-23,53 -4,17		
4	-67,00 -25,45	-36,88 2,41	-23,34 16,58	
5	-72,69 -42,73	-42,09 -15,35	-28,70 -1,04	-33,47 10,50

Analysis of Variance for Abbau CSB-SA

Source	DF	SS	MS	F	P
BSB/CSB	4	10518	2629	10,70	0,000
Error	40	9827	246		
Total	44	20344			

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean			
1	4	67,55	13,34	-----+-----+-----+-----+-----			
2	12	59,48	15,49		(-----*-----)		
3	18	48,94	14,28		(--*--)		
4	7	39,79	14,55		(---*---)		
5	4	6,40	25,28	(----*----)			
				-----+-----+-----+-----+-----			
Pooled StDev =		15,67		0	30	60	90

Fisher's pairwise comparisons

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	1	2	3	4
2	-10,22 26,36			
3	1,10 36,12	-1,26 22,35		
4	7,91 47,62	4,63 34,76	-4,96 23,26	
5	38,75 83,55	34,79 71,37	25,03 60,05	13,53 53,24

## ANOVAs für die signifikanten Inputvariablen in Stufe II für Phase I

### Für CSB-Abbau:

Analysis of Variance for CSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
CSB-Fr.	4	3963	991	7,55	0,000
Error	41	5382	131		
Total	45	9345			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	16	52,33	17,57
2	14	68,34	5,33
3	12	72,27	5,62
4	3	75,13	4,20
5	1	82,53	0,00

Pooled StDev = 11,46

Analysis of Variance for CSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
BSB-Fr.	4	5129	1282	12,47	0,000
Error	41	4216	103		
Total	45	9345			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	13	48,30	16,58
2	16	68,30	5,92
3	11	71,85	5,83
4	5	75,13	3,58
5	1	82,53	0,00

Pooled StDev = 10,14

Analysis of Variance for CSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
BSB/CSB	4	3117	779	5,13	0,002
Error	41	6228	152		
Total	45	9345			

Individual 95% CIs For Mean			
Based on Pooled StDev			
Level	N	Mean	StDev
1	9	49,95	20,31
2	10	63,25	11,20
3	13	66,09	10,58
4	12	72,68	6,44
5	2	77,94	0,02

Pooled StDev = 12,32

Analysis of Variance for CSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sauerstoff	3	2622	874	5,34	0,003
Error	41	6717	164		
Total	44	9339			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	18	71,89	7,64
2	18	63,34	15,59
3	5	56,39	15,27
5	4	46,57	14,83

Pooled StDev = 12,80

Analysis of Variance for CSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
Verweilz	4	2867	717	4,54	0,004
Error	41	6478	158		
Total	45	9345			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	4	41,71	24,11
2	16	63,14	13,52
3	13	72,00	6,50
4	6	65,12	12,11
5	7	66,49	11,19

Pooled StDev = 12,57

Analysis of Variance for CSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
TS	4	4838	1209	10,75	0,000
Error	40	4502	113		
Total	44	9339			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	7	44,69	20,88
2	6	54,03	11,28
3	22	69,27	6,62
4	9	74,35	6,42
5	1	72,29	0,00

Pooled StDev = 10,61

Analysis of Variance for CSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
OrgTs	4	4408	1102	8,94	0,000
Error	40	4932	123		
Total	44	9339			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	7	44,69	20,88
2	8	58,27	13,18
3	21	69,25	6,22
4	8	74,60	6,82
5	1	72,29	0,00

Pooled StDev = 11,10

## Für den BSB-Abbau:

Analysis of Variance for BSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
CSB-Fr.	4	279,64	69,91	10,97	0,000
Error	41	261,37	6,37		
Total	45	541,01			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	16	92,31	4,06
2	14	96,98	0,75
3	12	97,63	0,80
4	3	98,25	0,29
5	1	98,77	0,00

Pooled StDev = 2,52

Analysis of Variance for BSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
BSB-Fr.	4	348,16	87,04	18,50	0,000
Error	41	192,85	4,70		
Total	45	541,01			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	13	91,33	3,76
2	16	96,86	1,06
3	11	97,48	0,78
4	5	98,33	0,26
5	1	98,77	0,00

Pooled StDev = 2,17

92,0    96,0    100,0    104,0

Analysis of Variance for BSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
BSB/CSB	4	276,24	69,06	10,69	0,000
Error	41	264,77	6,46		
Total	45	541,01			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	9	91,02	4,31
2	10	95,74	2,11
3	13	96,22	2,48
4	12	97,96	0,45
5	2	98,36	0,36

Pooled StDev = 2,54

91,0    94,5    98,0    101,5

Analysis of Variance for BSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sauerstoff	3	165,92	55,31	6,05	0,002
Error	41	375,08	9,15		
Total	44	541,01			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	18	97,218	1,404
2	18	95,790	3,183
3	5	93,370	4,757
5	4	90,768	5,124

Pooled StDev = 3,025

90,0    93,0    96,0

Analysis of Variance for BSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
Verweilz	4	208,80	52,20	6,44	0,000
Error	41	332,21	8,10		
Total	45	541,01			

Individual 95% CIs For Mean			
Based on Pooled StDev			
Level	N	Mean	StDev
1	4	89,429	4,457
2	16	95,067	3,798
3	13	97,303	1,462
4	6	96,346	1,612
5	7	96,853	1,714

Pooled StDev = 2,847

87,5    91,0    94,5    98,0



Analysis of Variance for BSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
TS	4	271,25	67,81	10,06	0,000
Error	40	269,75	6,74		
Total	44	541,01			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	7	90,57	3,87
2	6	93,77	4,43
3	22	97,15	1,16
4	9	96,90	2,59
5	1	97,98	0,00

Pooled StDev = 2,60

92,0      96,0      100,0

Analysis of Variance for BSB-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
OrgTS	4	248,85	62,21	8,52	0,000
Error	40	292,15	7,30		
Total	44	541,01			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	7	90,57	3,87
2	8	94,77	4,18
3	21	97,15	1,20
4	8	96,73	2,72
5	1	97,98	0,00

Pooled StDev = 2,70

90,0      95,0      100,0      105,0

### Für CSB-SA-Abbau:

Analysis of Variance for CSB-SA-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
CSB-Fr.	4	4715	1179	3,50	0,015
Error	40	13475	337		
Total	44	18190			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	16	17,60	23,99
2	13	31,95	15,25
3	12	36,93	12,55
4	3	46,49	12,65
5	1	58,55	0,00

Pooled StDev = 18,35

25      50      75

Analysis of Variance for CSB-SA-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
BSB-Fr	4	4227	1057	3,03	0,028
Error	40	13963	349		
Total	44	18190			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	13	16,19	26,58
2	15	31,75	13,59
3	11	35,42	15,22
4	5	40,65	12,06
5	1	58,55	0,00

Pooled StDev = 18,68

25      50      75

Analysis of Variance for CSB-SA-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
CSB-SA-F	4	5155	1289	3,95	0,009
Error	40	13035	326		
Total	44	18190			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	9	15,13	17,76
2	20	31,11	16,75
3	8	25,26	26,25
4	4	38,64	5,96
5	4	55,81	9,18

Pooled StDev = 18,05

Analysis of Variance for CSB-SA-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sauerstoff	3	2875	958	2,57	0,068
Error	41	15315	374		
Total	44	18190			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	18	36,92	16,38
2	18	28,09	20,35
3	5	27,10	22,87
5	4	8,16	23,22

Pooled StDev = 19,33

Analysis of Variance for CSB-SA-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
TS	4	5469	1367	4,30	0,005
Error	40	12721	318		
Total	44	18190			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	7	10,73	33,36
2	6	17,86	12,18
3	22	32,78	13,45
4	9	43,62	13,69
5	1	42,19	0,00

Pooled StDev = 17,83

Analysis of Variance for CSB-SA-Abbau					
Source	DF	SS	MS	F	P
OrgTS	4	5268	1317	4,08	0,007
Error	40	12922	323		
Total	44	18190			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	7	10,73	33,36
2	8	21,97	15,33
3	21	32,51	12,85
4	8	45,31	13,60
5	1	42,19	0,00

Pooled StDev = 17,97

### Gegenüberstellung der Streubereiche für Phase I und Phase II

	STUFE I Phase I		STUFE I Phase II		STUFE II Phase I		STUFE II Phase II	
	MINIMUM	MAXIMUM	MINIMUM	MAXIMUM	MINIMUM	MAXIMUM	MINIMUM	MAXIMUM
CSB-Fracht [kg]	2611,44	8936,04	2158,0	18452,0	1235,3	4640,55	416,2	6952,8
CSB-Fracht/R. [kg]							416,0	6980,0
BSB-Fracht [kg]	1707,48	5916,93	1306,9	12384,0	490,65	2766,63	27,8	4299,6
CSB-SA-Fracht [kg]	285,88	3173,76	206,7	6096,5	465,23	1873,92	377,2	4054,5
BSB/CSB	0,550725	0,919220	0,34951	1,05263	0,364831	0,737075	0,02376	0,73039
PI [kg]	3,8544	50,6619	1,750	177,766	1,9968	48,3135	2,149	122,912
VWZ [h]	17,0142	36,4774	8,625	34,547	18,1265	34,9515	16,649	40,630
AOX [kg]	3,7328	58,6434	5,309	137,446				
Leuchtbakt. [GL]	64,38	1613,92	16,0	370				
Sauerstoff [mg/l]	0,05548	2,66894	0,4	3,1	1,81788	5,09104	1,3	9,7
O <sub>2</sub> -Schwankungen	0,09978	6,62622			0,82715	9,90528		
Gesamt-N [kg]	34,112	338,874	16,53	661,49	11,948	248,112	0,170	76,715
NO <sub>2</sub> -N [kg]	0,210	199,577	0,06	327,22	0,1073	75,9150	0,10	277,67
NO <sub>3</sub> -N [kg]	0,611	118,932	0,61	462,5	1,0390	24,4615	0,2	233,29
NH <sub>4</sub> -N [kg]	20,365	180,340	3,05	384,06	10,390	245,340	8,36	330,20
Gesamt-P [kg]	0,9222	43,9756	0,266	165,964	2,496	106,991	0,386	69,977
PO <sub>4</sub> -P [kg]	0,4392	33,680	0,062	82,871	0,707	102,438	0,0727	17,9442
TS [kg]	8336,5	37597,9	4452	86961	10450,7	51294,9	4163	110689
OrgTS [kg]	3868,1	25679,4	3213	57047	7200,5	32777,4	5140	81246
Temperatur [°C]	27,3	33,4	19,8	32,2	28,0	37,0	17,9	29,8

## Ergebnisse der Korrelationsanalyse Stufe I für Phase II

	CSB	BSB	CSB-SA	BSB/CSB	AOX	PI	Leuchtba	O2
BSB	0.938							
CSB-SA	0.680	0.385						
BSB/CSB	0.050	0.373	-0.658					
AOX	0.246	0.226	0.176	-0.049				
PI	0.121	0.139	0.027	0.103	-0.134			
Leuchtba	0.156	0.134	0.131	-0.007	0.020	0.101		
O2	-0.388	-0.376	-0.231	-0.084	-0.275	0.112	-0.195	
VWZ	-0.309	-0.317	-0.161	-0.065	0.006	-0.141	-0.114	-0.015
ges.-N	0.202	0.196	0.131	-0.004	0.132	0.072	-0.009	-0.010
NO2	0.048	0.025	0.076	-0.079	-0.004	0.063	-0.066	0.091
NO3	0.149	0.122	0.139	-0.068	0.202	0.014	-0.116	0.016
NH4	0.146	0.168	0.040	0.079	0.029	0.064	0.095	-0.059
ges-P	0.167	0.172	0.082	0.050	-0.111	0.100	0.103	0.061
PO4	0.104	0.102	0.062	0.017	-0.067	0.009	0.023	0.004
TS	0.035	0.003	0.088	-0.084	0.017	0.018	-0.012	-0.577
orgTS	0.215	0.204	0.145	-0.010	0.136	-0.054	-0.087	-0.722
Temp.	0.146	0.037	0.315	-0.265	0.069	-0.414	0.006	0.015
CSB-Abb	0.300	0.298	0.162	0.104	0.031	0.003	0.015	-0.417
BSB-Abb.	-0.075	-0.047	-0.101	0.073	-0.055	-0.110	-0.063	-0.205
CSB-SA-A	0.373	0.165	0.645	-0.551	0.092	0.032	0.068	-0.339
	VWZ	ges.-N	NO2	NO3	NH4	ges-P	PO4	TS
ges.-N	-0.293							
NO2	-0.123	0.416						
NO3	-0.039	0.570	0.197					
NH4	-0.308	0.775	0.034	0.016				
ges-P	-0.204	-0.005	0.053	-0.091	0.030			
PO4	-0.110	0.018	-0.015	-0.063	0.069	0.459		
TS	-0.051	0.003	0.047	0.034	-0.037	0.036	0.010	
orgTS	-0.055	0.034	-0.022	0.115	0.002	-0.035	0.081	0.956
Temp.	-0.080	0.219	0.267	0.006	0.209	-0.041	0.061	-0.084
CSB-Abb	0.036	-0.077	-0.077	0.085	-0.131	-0.032	-0.056	-0.010
BSB-Abb.	0.080	-0.047	0.030	0.093	-0.136	-0.075	-0.096	0.005
CSB-SA-A	0.042	-0.069	-0.045	0.078	-0.132	0.016	0.015	0.038
	orgTS	Temp.	CSB-Abb	BSB-Abb.				
Temp.	-0.175							
CSB-Abb	0.145	0.136						
BSB-Abb.	0.049	0.197	0.750					
CSB-SA-A	0.189	0.158	0.520	0.159				

## Ergebnisse der Korrelationsanalyse Stufe II für Phase II

	CSB	BSB	CSB-SA S	BSB/CSB	PI	O2	VWZ	ges.-N
BSB	0.907							
CSB-SA S	0.765	0.421						
BSB/CSB	0.458	0.733	-0.135					
PI	0.114	0.122	0.059	0.131				
O2	-0.307	-0.189	-0.360	-0.086	-0.135			
VWZ	-0.066	0.080	-0.263	0.299	-0.028	-0.090		
ges.-N	-0.031	-0.131	0.121	-0.279	0.076	-0.168	-0.162	
NO2	-0.032	-0.095	0.080	-0.168	-0.005	-0.068	-0.087	0.695
NO3	-0.008	-0.046	0.059	-0.088	-0.012	-0.023	-0.086	0.606
NH4	0.058	-0.007	0.136	-0.204	0.068	-0.201	-0.086	0.743
ges.-P	0.136	0.096	0.148	0.033	-0.148	-0.021	-0.102	-0.127
PO4	0.065	0.039	0.083	0.015	-0.116	-0.120	-0.097	-0.002
TS	0.203	0.175	0.175	0.109	0.049	-0.192	-0.265	0.004
orgTS	0.189	0.206	0.096	0.187	0.212	-0.108	-0.257	0.040
Temp.	-0.299	-0.390	-0.003	-0.526	-0.437	0.107	-0.195	-0.063
CSB-Abb.	0.476	0.548	0.184	0.671	0.131	-0.191	0.137	-0.230
BSB-Abb.	0.150	0.219	-0.012	0.484	-0.059	-0.200	0.151	-0.107
CSB-SA-A	0.435	0.379	0.356	0.300	0.130	-0.180	-0.013	-0.135
	NO2	NO3	NH4	ges.-P	PO4	TS	orgTS	Temp.
NO3	0.697							
NH4	0.116	0.051						
ges.-P	-0.044	-0.105	-0.105					
PO4	0.100	-0.030	-0.031	0.538				
TS	-0.016	-0.156	0.119	0.241	0.237			
orgTS	0.012	-0.044	0.111	0.021	0.071	0.978		
Temp.	-0.071	-0.118	0.037	0.105	0.167	-0.013	-0.086	
CSB-Abb.	-0.067	-0.016	-0.241	0.127	0.076	0.134	0.162	-0.636
BSB-Abb.	-0.029	0.002	-0.112	0.113	0.068	0.172	0.127	-0.208
CSB-SA-A	0.013	0.038	-0.154	0.129	0.089	0.065	0.065	-0.604
	CSB-Abb.	BSB-Abb.						
BSB-Abb.	0.515							
CSB-SA-A	0.852	0.254						

## Untergruppen Stufe I für Phase II

CSB-SA-Fr. [kg]		BSB/CSB [kg]		CSB-Fracht [kg]		BSB-Fracht [kg]	
A	B	A	B	A	B	A	B
1019,2	1258,9	0,671	0,477	4567	5416,8	3310	3522
1401,8	2468,3	0,721	0,604	5632	8675,8	4108	5738
1732,6	3677,7	0,761	0,732	6657	11934,4	4943	7953
2206,4	4887,1	0,806	0,859	7956	15193,2	5989	10169
6095,5	6096,5	0,987	0,987	18452	18452	12384	12384

AOX [kg]		PI [kg]		Leuchtbakt. [GL]		VWZ [h]	
A	B	A	B	A	B	A	B
14,81	31,74	8,01	36,95	32	87	15,14	13,81
19,13	58,16	15,25	72,16	46	158	16,55	19,00
24,09	84,59	24,12	107,36	64	229	17,83	24,18
33,62	111,02	36,25	142,56	88	300	19,85	29,36
137,45	137,45	177,77	177,77	370	370	34,55	34,55

Sauerstoff [mg/l]		Gesamt-N [kg]		NO <sub>2</sub> -N [kg]		NO <sub>3</sub> -N [kg]	
A	B	A	B	A	B	A	B
1,2	0,9	86,48	145,52	2,82	65,49	6,70	92,99
1,6	1,5	127,45	274,51	6,15	130,922	14,10	185,37
1,9	2,0	176,20	403,51	11,33	196,36	21,93	277,74
2,0	2,6	235,21	532,51	24,21	261,79	41,99	370,12
3,1	3,1	661,49	661,49	327,22	327,22	462,50	462,50

NH <sub>4</sub> -N [kg]		Gesamt-P [kg]		PO <sub>4</sub> -P [kg]		TS [kg]	
A	B	A	B	A	B	A	B
54,82	79,25	1,70	33,41	0,41	16,62	15668	20954
85,83	155,45	5,33	66,55	0,47	33,19	20283	37456
122,96	231,65	12,46	99,69	0,96	49,75	24122	53957
173,71	307,86	24,65	132,83	2,31	66,31	27641	70459
384,06	384,06	165,96	165,96	82,87	82,87	86961	86961

orgTS [kg]		Temperatur [°C]	
A	B	A	B
10825	13979	22,1	22,3
14168	24746	23,1	24,8
17090	35512	24,2	27,3
20116	46279	26,1	29,8
57047	57047	32,2	32,2

Dargestellt sind die oberen Grenzwerte der einzelnen Untergruppen (Level). Dabei erfolgte die Zuordnung der Werte in gleich stark besetzte Segmente (A) bzw. in gleich große Intervalle (B).

## Untergruppen Stufe II für Phase II

CSB-SA-Fr. [kg]		BSB/CSB [kg]		CSB-Fracht [kg]		BSB-Fracht [kg]	
A	B	A	B	A	B	A	B
711	1112	0,327	0,165	1244	1723	434	882
832	1847	0,397	0,306	1414	3030	580	1736
942	2582	0,447	0,448	1652	4337	719	2590
1144	3317	0,516	0,589	1970	5644	923	3444
4055	4055	0,730	0,731	6953	6953	4300	4300

PI [kg]		VWZ [h]		Sauerstoff [mg/l]		Gesamt-N [kg]	
A	B	A	B	A	B	A	B
7,1	26,3	23,2	21,4	3,64	2,98	8,0	15,5
10,0	50,5	24,78	26,2	5,78	4,66	12,6	30,8
15,1	74,6	26,47	31,0	7,09	6,35	18,6	46,1
26,4	98,8	28,79	35,8	7,82	8,03	29,9	61,4
122,9	123,0	40,63	40,6	9,71	9,71	76,7	76,8

NO <sub>2</sub> -N [kg]		NO <sub>3</sub> -N [kg]		NH <sub>4</sub> -N [kg]		Gesamt-P [kg]	
A	B	A	B	A	B	A	B
0,8	55,6	3,8	46,8	18,0	72,7	1,1	14,3
2,0	111,1	6,1	93,4	38,8	137,1	2,2	28,2
6,4	166,6	9,6	140,0	72,5	201,5	5,1	42,1
28,1	222,2	18,6	186,7	117,5	265,8	10,0	56,1
277,7	277,7	233,3	233,3	330,3	330,3	70,0	70,0

PO <sub>4</sub> -P [kg]		TS [kg]		orgTS [kg]		Temperatur [°C]	
A	B	A	B	A	B	A	B
0,47	3,6	24216	25468	19435	20361	19,5	20,3
0,53	7,2	31176	46773	23351	35582	20,6	22,7
0,62	10,8	39919	68078	28469	50803	22,0	25,1
1,09	14,4	48443	89384	32905	66025	25,1	27,5
18,0	18,0	110690	110690	81247	81247	29,9	29,9

Dargestellt sind die oberen Grenzwerte der einzelnen Untergruppen (Level). Dabei erfolgte die Zuordnung der Werte in gleich stark besetzte Segmente (A) bzw. in gleich große Intervalle (B).

## Ergebnisse der ANOVA Stufe I für Phase II

	CSB-Abbau				BSB-Abbau				CSB-SA-Abbau			
	A		B		A		B		A		B	
	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$
CSB-Fracht [kg]	<0,001	11,4	<0,001	9,2	0,356	0,8	0,758	0,4	<0,001	15,1	<0,001	12,1
BSB-Fracht [kg]	<0,001	10,9	<0,001	8,2	0,888	0,2	0,757	0,4	0,001	3,6	0,007	2,7
CSB-SA-Fracht [kg]	0,008	2,6	0,009	2,6	0,170	1,2	0,152	1,3	<0,001	51,1	<0,001	45,1
BSB/CSB [kg]	0,048	1,8	0,186	1,2	0,436	0,7	0,238	1,1	<0,001	36,1	<0,001	30,7
PI [kg]	0,068	1,7	0,059	1,7	<0,001	4,6	0,745	0,4	0,045	1,9	0,014	2,4
VWZ [h]	0,232	1,1	0,414	0,8	0,330	0,9	0,360	0,8	0,149	1,3	0,395	0,8
AOX [kg]	0,191	1,5	0,824	0,4	0,175	1,5	0,945	0,2	0,465	0,9	0,281	1,2
Leuchtbakt. [GL]	0,142	1,3	0,499	0,6	0,281	1,0	0,153	1,3	0,021	2,2	0,926	0,2
Sauerstoff [mg/l]	<0,001	17,5	<0,001	23,6	0,000	12,3	0,000	25,6	0,002	12,8	0,001	13,3
Gesamt-N [kg]	0,052	1,8	0,333	0,9	0,107	1,5	0,639	0,5	0,433	0,8	0,132	1,4
NO <sub>2</sub> -N [kg]	0,954	0,1	0,167	1,0	0,172	1,2	0,956	0,1	0,803	0,3	0,888	0,1
NO <sub>3</sub> -N [kg]	0,497	0,7	0,408	0,8	0,095	1,5	0,459	0,7	0,422	0,8	0,198	1,2
NH <sub>4</sub> -N [kg]	0,061	1,7	0,015	2,4	0,019	2,3	0,007	2,7	0,039	2,0	0,066	1,7
Gesamt-P [kg]	0,012	2,5	0,780	0,3	0,003	3,1	0,557	0,6	0,501	0,67	0,787	0,3
PO <sub>4</sub> -P [kg]	0,126	1,4	0,534	0,2	0,104	1,5	0,050	1,2	0,888	0,2	0,884	0,1
TS [kg]	0,100	1,5	0,040	1,6	0,014	2,4	0,075	1,3	0,017	2,3	0,024	1,8
orgTS [kg]	0,348	1,8	0,081	2,8	0,004	6,4	0,312	1,5	0,167	2,7	0,010	4,7
Temperatur [°C]	0,083	6,0	0,025	8,0	0,144	5,0	0,046	7,0	0,007	10,1	0,047	7,0



## Ergebnisse der ANOVA Stufe II für Phase II

	CSB-Abbau				BSB-Abbau				CSB-SA-Abbau			
	A		B		A		B		A		B	
	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$	p-Wert	$\epsilon^2$
CSB-Fracht [kg]	<0,001	29,1	<0,001	16,9	<0,001	7,9	0,031	2,1	<0,001	21,9	<0,001	15,4
BSB-Fracht [kg]	<0,001	45,9	<0,001	17,6	<0,001	16,0	0,016	2,4	<0,001	19,5	<0,001	8,7
CSB-SA-Fracht [kg]	0,002	3,3	0,028	2,1	0,344	0,8	0,655	0,5	<0,001	12,8	<0,001	8,1
BSB/CSB [kg]	<0,001	40,1	<0,001	45,5	<0,001	16,5	<0,001	43,5	<0,001	10,3	<0,001	12,2
PI [kg]	<0,001	4,9	0,451	0,7	0,797	0,3	0,099	1,6	0,008	2,8	0,161	1,3
VWZ [h]	<0,001	4,4	0,022	2,2	0,015	2,4	0,001	3,5	0,335	0,9	0,440	0,7
Sauerstoff [mg/l]	<0,001	17,7	<0,001	20,7	<0,001	17,9	<0,001	20,6	0,007	10,1	<0,001	15,7
Gesamt-N [kg]	<0,001	6,0	<0,001	6,0	0,033	2,2	0,032	2,2	0,013	2,7	0,014	2,6
NO <sub>2</sub> -N [kg]	<0,001	6,2	0,894	0,2	0,243	1,1	0,898	0,2	<0,001	4,2	0,381	0,8
NO <sub>3</sub> -N [kg]	0,008	2,7	0,984	0,07	0,500	0,7	0,966	0,1	0,011	2,5	0,945	0,1
NH <sub>4</sub> -N [kg]	<0,001	6,4	<0,001	5,5	0,037	2,0	0,048	1,9	0,002	3,3	0,029	2,1
Gesamt-P [kg]	0,010	2,6	0,409	0,8	0,101	1,5	0,406	0,8	0,049	1,9	0,350	0,9
PO <sub>4</sub> -P [kg]	0,005	2,9	0,839	0,3	0,031	2,1	0,499	0,7	0,001	3,8	0,601	0,5
TS [kg]	0,002	3,3	0,012	2,5	<0,001	4,4	0,006	2,9	0,030	2,1	0,113	1,5
orgTS [kg]	0,057	3,8	0,045	4,0	0,290	2,1	0,436	1,6	0,056	3,9	0,090	3,3
Temperatur [°C]	<0,001	49,2	<0,001	50,7	<0,001	14,4	<0,001	20,1	<0,001	43,7	<0,001	42,1

## ANOVAs der signifikanten System-Parameter der Stufe I für Phase II

### CSB-Abbau

Analysis of Variance for CSB-Abb

Source	DF	SS	MS	F	P
CSBfr. c	4	4734.6	1183.6	16.50	0.000
Error	520	37298.4	71.7		
Total	524	42033.0			

Individual 95% CIs For Mean  
Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
1	105	78.762	8.794
2	105	82.495	8.431
3	105	83.771	10.681
4	105	87.010	5.001
5	105	86.581	8.434

Pooled StDev = 8.469

Analysis of Variance for CSB-Abba

Source	DF	SS	MS	F	P
CSBfr. c	4	3898.0	974.5	13.22	0.000
Error	521	38399.4	73.7		
Total	525	42297.4			

Individual 95% CIs For Mean  
Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
1	186	80.22	8.74
2	271	85.26	8.40
3	62	87.11	8.89
4	6	88.83	9.24
5	1	94.00	0.00

Pooled StDev = 8.59

Analysis of Variance for CSB-Abb

Source	DF	SS	MS	F	P
BSBfr. c	4	4537.4	1134.4	15.71	0.000
Error	519	37477.2	72.2		
Total	523	42014.6			

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	105	78.581	8.115
2	105	82.495	9.500
3	105	84.781	8.395
4	105	86.086	8.574
5	104	86.663	7.799

Pooled StDev = 8.498

Analysis of Variance for CSB-Abba			
Source	DF	SS	MS
BSBfr. c	4	3478.9	869.7
Error	520	38800.4	74.6
Total	524	42279.3	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	131	79.527	9.123
2	259	84.494	8.610
3	117	86.197	8.080
4	13	88.154	6.543
5	5	86.800	13.882

Pooled StDev = 8.638

Analysis of Variance for CSB-Abb			
Source	DF	SS	MS
CSB-SA c	4	1048.0	262.0
Error	519	40966.6	78.9
Total	523	42014.6	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	105	81.790	8.704
2	105	82.514	9.255
3	105	83.971	9.235
4	105	84.600	8.523
5	104	85.721	8.677

Pooled StDev = 8.884

Analysis of Variance for CSB-Abba			
Source	DF	SS	MS
CSB-SA c	4	1091.9	273.0
Error	520	41187.5	79.2
Total	524	42279.3	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	116	82.27	8.44
2	324	83.53	9.42
3	70	86.49	7.30
4	13	86.00	7.54
5	2	94.50	0.71

Pooled StDev = 8.90

Analysis of Variance for CSBAbbSt			
Source	DF	SS	MS
O2 cod.A	4	3020	755
Error	132	14233	108
Total	136	17254	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	25	88.12	12.00
2	29	87.93	4.30
3	6	84.83	6.24
4	54	83.85	6.61
5	23	74.35	18.77

Pooled StDev = 10.38

Analysis of Variance for CSB-Abba			
Source	DF	SS	MS
sauer co	4	4075.4	1018.9
Error	132	13178.1	99.8
Total	136	17253.5	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	6	91.000	2.000
2	42	87.643	9.471
3	66	84.288	6.570
4	17	78.412	17.041
5	6	62.833	20.144

Pooled StDev = 9.992

Analysis of Variance for CSB-Abb			
Source	DF	SS	MS
nh4 cod.	4	768.1	192.0
Error	514	41098.5	80.0
Total	518	41866.7	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	105	85.429	7.030
2	105	84.695	8.273
3	105	83.324	9.746
4	104	82.413	10.995
5	100	82.420	8.109

Pooled StDev = 8.942

Analysis of Variance for CSB-Abba			
Source	DF	SS	MS
nh4 cod.	4	993.5	248.4
Error	515	41139.3	79.9
Total	519	42132.8	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	188	85.170	7.899
2	195	83.282	9.616
3	96	82.865	9.219
4	34	81.853	7.439
5	7	76.429	16.511

Pooled StDev = 8.938

Analysis of Variance for CSB-Abb			
Source	DF	SS	MS
ts cod.	4	661.5	165.4
Error	520	41371.5	79.6
Total	524	42033.0	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	104	82.567	8.805
2	105	82.295	10.302
3	105	83.962	8.525
4	105	85.171	8.330
5	106	84.604	8.493

Pooled StDev = 8.920

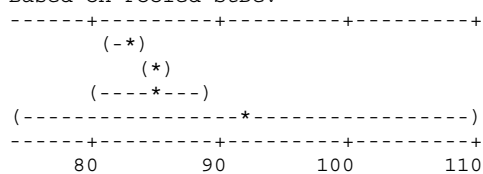
Analysis of Variance for CSB-Abba			
Source	DF	SS	MS
ts cod.	3	670.3	223.4
Error	521	41593.9	79.8
Total	524	42264.2	

F            P  
2.80        0.040

Individual 95% CIs For Mean  
Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
1	227	82.52	9.61
2	281	84.68	8.45
3	16	84.87	6.94
5	1	92.00	0.00

Pooled StDev = 8.94



## BSB-Abbau

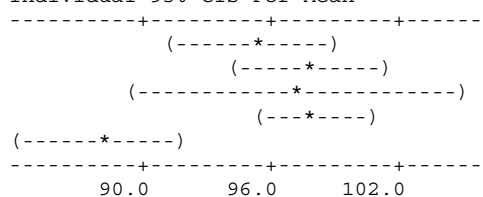
Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
O2 cod.A	4	1776.4	444.1
Error	132	12629.0	95.7
Total	136	14405.4	

F            P  
4.64        0.002

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	25	95.31	13.91
2	29	97.70	1.96
3	6	97.27	1.27
4	54	98.06	2.33
5	23	88.06	18.56

Pooled StDev = 9.78



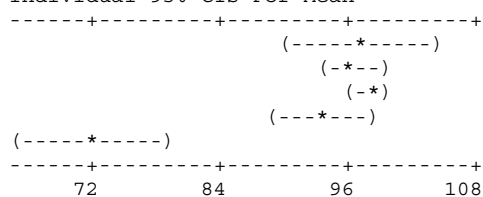
Analysis of Variance for BSB-Abba			
Source	DF	SS	MS
sauer co	4	3684.8	921.2
Error	132	10720.6	81.2
Total	136	14405.4	

F            P  
11.34       0.000

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	6	97.03	2.01
2	42	96.46	10.75
3	66	97.90	2.41
4	17	93.59	11.46
5	6	72.41	26.42

Pooled StDev = 9.01



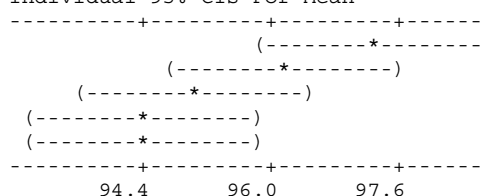
Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
nh4 cod.	4	669.1	167.3
Error	510	28158.5	55.2
Total	514	28827.6	

F            P  
3.03        0.017

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	104	97.313	3.121
2	105	96.212	5.296
3	105	94.993	8.515
4	103	94.392	10.399
5	98	94.390	7.645

Pooled StDev = 7.431



Analysis of Variance for BSB-Abba					
Source	DF	SS	MS	F	P
nh4 cod.	4	780.0	195.0	3.55	0.007
Error	511	28068.0	54.9		
Total	515	28848.0			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	187	96.953	4.215
2	195	94.936	8.358
3	94	94.476	9.174
4	33	94.345	8.173
5	7	90.414	14.404

Pooled StDev = 7.411

88.0      92.0      96.0

Analysis of Variance for BSB-Abb.					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp. co	4	724	181	1.75	0.144
Error	132	13682	104		
Total	136	14405			

Individual 95% CIs For Mean			
Level	N	Mean	StDev
1	27	92.21	14.16
2	26	94.97	11.98
3	28	94.98	13.21
4	27	98.21	1.25
5	29	98.30	2.14

Pooled StDev = 10.18

92.0      96.0      100.0

Analysis of Variance for BSB-Abba					
Source	DF	SS	MS	F	P
Tempcod.	4	1014	254	2.50	0.046
Error	132	13391	101		
Total	136	14405			

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev			
Level	N	Mean	StDev
1	30	91.00	16.19
2	59	96.09	9.87
3	27	98.28	1.88
4	12	98.79	0.75
5	9	98.01	2.18

Pooled StDev = 10.07

90.0      95.0      100.0      105.0

## CSB-SA-Abbau

Analysis of Variance for CSB-SA-A

Source	DF	SS	MS	F	P
CSBfr. c	4	67690	16922	22.90	0.000
Error	512	378404	739		
Total	516	446093			

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	101	26.37	33.50
2	104	41.63	27.91
3	104	46.04	25.91
4	103	54.01	23.62
5	105	59.89	23.99

Pooled StDev = 27.19

Analysis of Variance for CSB-SA-Abb

Source	DF	SS	MS	F	P
CSBfr. c	4	54353	13588	17.66	0.000
Error	513	394682	769		
Total	517	449035			

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	181	33.00	32.50
2	268	50.29	24.32
3	62	60.85	27.60
4	6	70.04	6.85
5	1	87.42	0.00

Pooled StDev = 27.74

Analysis of Variance for CSB-SA-A

Source	DF	SS	MS	F	P
BSBfr. c	4	15953	3988	4.75	0.001
Error	512	430140	840		
Total	516	446093			

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	103	36.37	28.10
2	103	42.56	32.77
3	104	48.00	29.43
4	104	51.45	25.02
5	103	50.09	29.10

Pooled StDev = 28.98

Analysis of Variance for CSB-SA-Abb

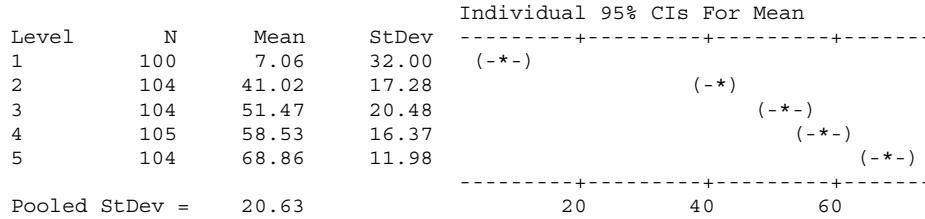
Source	DF	SS	MS	F	P
BSBfr. c	4	12121	3030	3.56	0.007
Error	513	436914	852		
Total	517	449035			

Individual 95% CIs For Mean

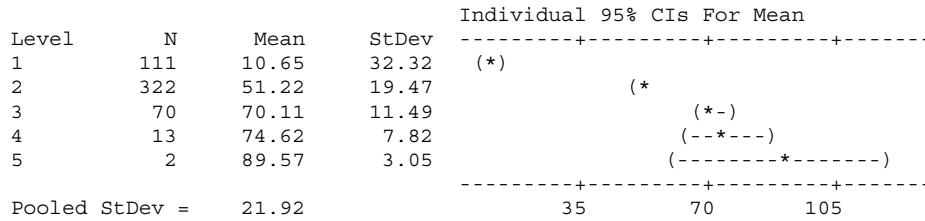
Level	N	Mean	StDev
1	129	37.89	30.09
2	255	47.23	28.66
3	116	50.39	28.40
4	13	54.71	25.29
5	5	48.84	54.64

Pooled StDev = 29.18

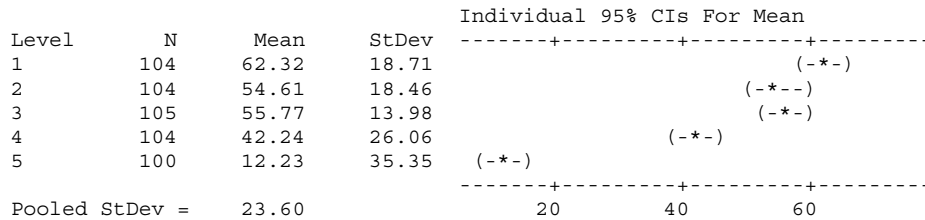
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
CSB-SA c	4	228096	57024	133.93	0.000
Error	512	217997	426		
Total	516	446093			



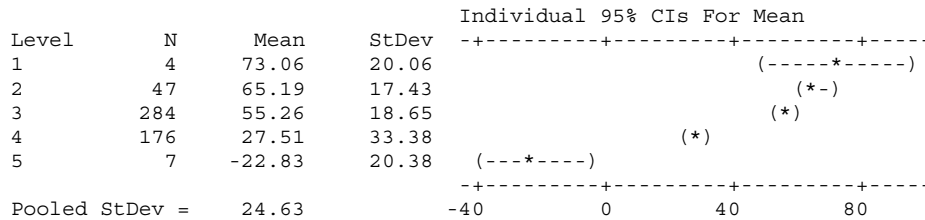
Analysis of Variance for CSB-SA-Abb					
Source	DF	SS	MS	F	P
CSB-SA c	4	202580	50645	105.42	0.000
Error	513	246455	480		
Total	517	449035			



Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
bsb/csb	4	160900	40225	72.21	0.000
Error	512	285193	557		
Total	516	446093			

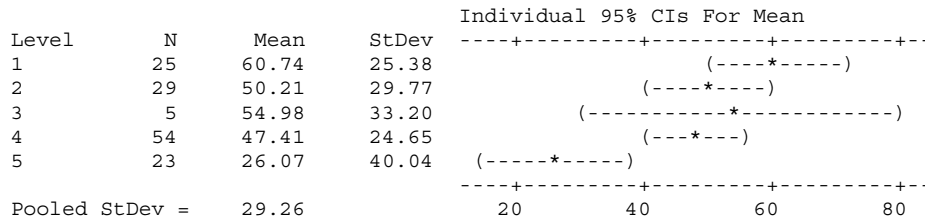


Analysis of Variance for CSB-SA-Abb					
Source	DF	SS	MS	F	P
bsb/csb	4	137955	34489	56.88	0.000
Error	513	311079	606		
Total	517	449035			

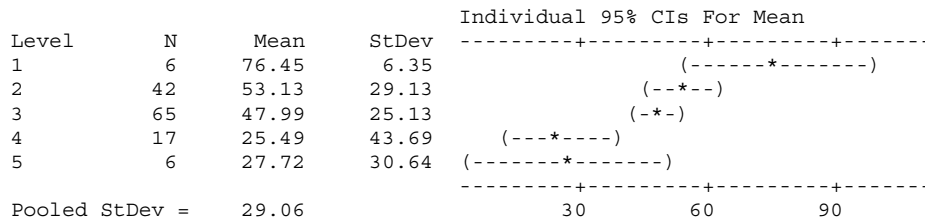




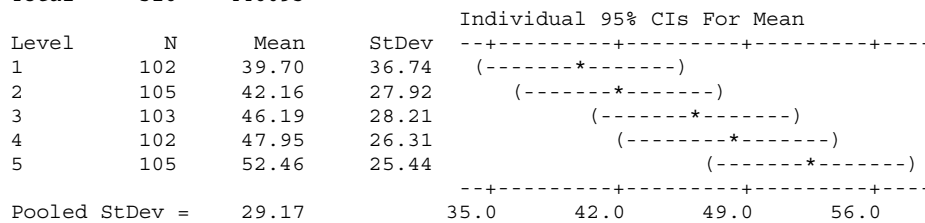
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
O2 cod.A	4	15422	3856	4.50	0.002
Error	131	112157	856		
Total	135	127579			



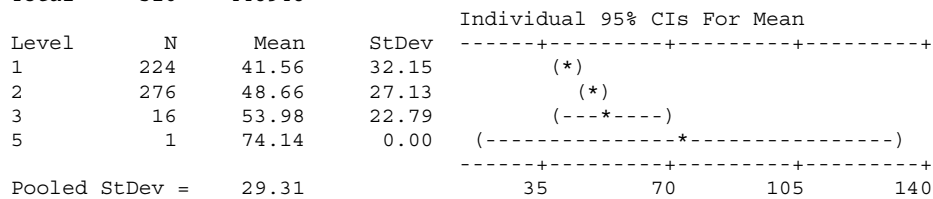
Analysis of Variance for CSB-SA-Abb					
Source	DF	SS	MS	F	P
sauer co	4	16944	4236	5.02	0.001
Error	131	110636	845		
Total	135	127579			



Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
ts cod.	4	10322	2581	3.03	0.017
Error	512	435771	851		
Total	516	446093			



Analysis of Variance for CSB-SA-Abb					
Source	DF	SS	MS	F	P
ts cod.	3	8162	2721	3.17	0.024
Error	513	440786	859		
Total	516	448948			



## ANOVAs der signifikanten System-Parameter der Stufe II für Phase II

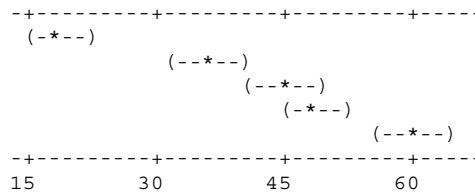
### CSB-Abbau

#### One-way Analysis of Variance

Analysis of Variance for CSB-Abb.					
Source	DF	SS	MS	F	P
CSBfr. c	4	100197	25049	52.23	0.000
Error	506	242682	480		
Total	510	342880			

Level	N	Mean	StDev
1	102	18.55	32.77
2	100	35.96	23.48
3	100	45.10	16.30
4	104	48.56	17.00
5	105	60.27	15.06

#### Individual 95% CIs For Mean

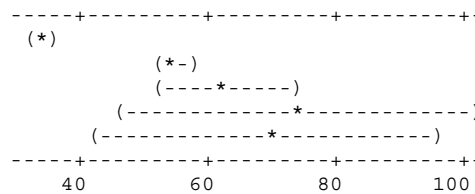


Pooled StDev = 21.90

Analysis of Variance for CSB-Abb.					
Source	DF	SS	MS	F	P
CSBfr. c	4	58468	14617	25.75	0.000
Error	507	287788	568		
Total	511	346256			

Level	N	Mean	StDev
1	334	34.31	27.20
2	153	54.87	15.35
3	19	62.63	16.55
4	3	74.00	12.53
5	3	69.33	13.65

#### Individual 95% CIs For Mean

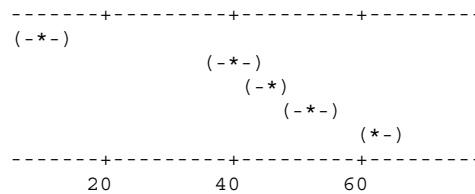


Pooled StDev = 23.82

Analysis of Variance for CSB-Abb.					
Source	DF	SS	MS	F	P
BSBfr. c	4	163265	40816	114.76	0.000
Error	502	178552	356		
Total	506	341818			

Level	N	Mean	StDev
1	103	9.68	32.08
2	100	40.14	16.23
3	102	45.15	14.04
4	101	52.03	11.97
5	101	62.91	11.51

#### Individual 95% CIs For Mean



Pooled StDev = 18.86

Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
BSBfr. c	4	60604	15151
Error	503	284587	566
Total	507	345191	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	391	36.06	26.32
2	94	60.51	10.54
3	14	67.36	12.62
4	8	63.87	16.69
5	1	84.00	0.00

Pooled StDev = 23.79

Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
CSB-SA c	4	11261	2815
Error	502	330557	658
Total	506	341818	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	99	35.09	30.60
2	102	37.90	25.35
3	104	46.25	20.95
4	100	42.44	23.01
5	102	47.36	27.48

Pooled StDev = 25.66

Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
CSB-SA c	4	7392	1848
Error	503	337799	672
Total	507	345191	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	397	40.41	25.49
2	102	46.66	28.03
3	7	50.29	14.33
4	1	84.00	0.00
5	1	86.00	0.00

Pooled StDev = 25.91

Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
bsb/csb	4	142749	35687
Error	502	199068	397
Total	506	341818	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	102	11.36	33.99
2	104	40.90	17.23
3	101	44.52	14.06
4	102	52.32	13.24
5	98	61.00	12.15

Pooled StDev = 19.91

Analysis of Variance for CSB-Abb.					
Source	DF	SS	MS	F	P
bsb/csb	4	156896	39224	104.78	0.000
Error	503	188294	374		
Total	507	345191			

Individual 95% CIs For Mean  
Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
1	28	-9.21	37.95
2	60	16.82	31.65
3	223	42.16	16.12
4	157	54.83	12.70
5	40	64.10	13.81

Pooled StDev = 19.35

Analysis of Variance for CSB-Abb.					
Source	DF	SS	MS	F	P
pi cod.	4	16116	4029	6.30	0.000
Error	494	315983	640		
Total	498	332099			

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	105	32.50	36.53
2	104	39.47	25.36
3	100	44.90	20.73
4	102	47.54	21.86
5	88	46.78	15.21

Pooled StDev = 25.29

Analysis of Variance for CSB-Abb.					
Source	DF	SS	MS	F	P
pi cod.	4	2481	620	0.92	0.451
Error	495	332972	673		
Total	499	335453			

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	410	41.11	27.61
2	77	47.03	15.49
3	10	46.70	18.29
4	2	43.50	3.54
5	1	42.00	0.00

Pooled StDev = 25.94

Analysis of Variance for CSB-Abb.					
Source	DF	SS	MS	F	P
verweilz	4	14543	3636	5.60	0.000
Error	506	328336	649		
Total	510	342880			

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	105	33.54	31.85
2	104	46.87	19.08
3	103	39.55	28.99
4	103	41.36	26.79
5	96	48.40	16.66

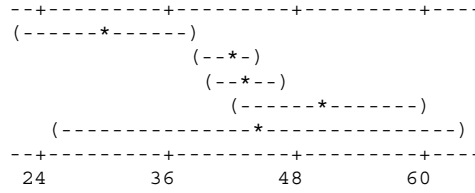
Pooled StDev = 25.47

Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
verweilz	4	7721	1930
Error	507	338535	668
Total	511	346256	

F            P  
2.89        0.022

Level	N	Mean	StDev
1	38	30.29	33.14
2	264	41.84	25.93
3	171	42.99	25.25
4	32	50.47	18.43
5	7	44.43	18.82

Individual 95% CIs For Mean



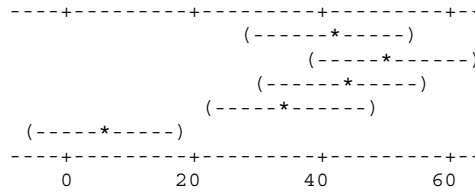
Pooled StDev = 25.84

Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
O2	4	32203	8051
Error	130	149515	1150
Total	134	181718	

F            P  
7.00        0.000

Level	N	Mean	StDev
1	27	41.89	31.22
2	27	50.19	23.43
3	26	43.77	28.15
4	28	34.93	30.07
5	27	6.00	50.26

Individual 95% CIs For Mean



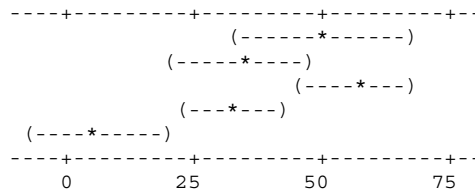
Pooled StDev = 33.91

Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
O2	4	37692	9423
Error	130	144026	1108
Total	134	181718	

F            P  
8.51        0.000

Level	N	Mean	StDev
1	16	50.12	22.42
2	22	34.32	32.86
3	29	56.45	16.66
4	44	32.50	31.57
5	24	5.83	52.41

Individual 95% CIs For Mean



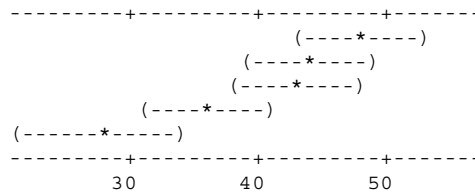
Pooled StDev = 33.29

Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
ges-N	4	19722	4930
Error	471	309453	657
Total	475	329175	

F            P  
7.50        0.000

Level	N	Mean	StDev
1	104	48.02	20.55
2	105	43.98	25.97
3	104	42.67	25.36
4	100	36.29	28.13
5	63	27.68	28.75

Individual 95% CIs For Mean



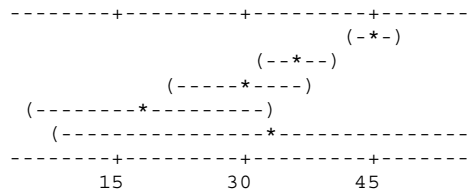
Pooled StDev = 25.63

Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
ges-N	4	19827	4957
Error	471	309348	657
Total	475	329175	

F            P  
7.55        0.000

Level	N	Mean	StDev
1	293	45.29	23.38
2	127	36.46	28.77
3	40	29.30	29.01
4	12	18.50	33.51
5	4	32.50	9.61

Individual 95% CIs For Mean



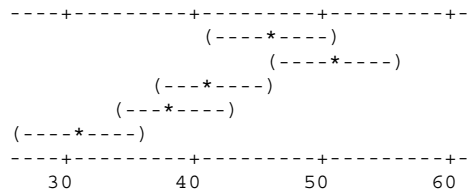
Pooled StDev = 25.63

Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
nh4 cod.	4	22267	5567
Error	504	320311	636
Total	508	342579	

F            P  
8.76        0.000

Level	N	Mean	StDev
1	104	45.88	21.44
2	105	51.10	17.07
3	102	41.44	27.79
4	104	38.39	27.64
5	94	31.36	30.40

Individual 95% CIs For Mean



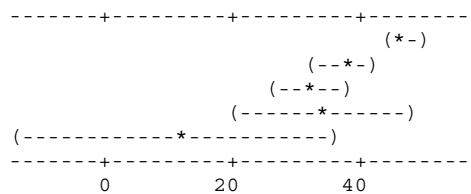
Pooled StDev = 25.21

Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
nh4 cod.	4	19064	4766
Error	505	326888	647
Total	509	345953	

F            P  
7.36        0.000

Level	N	Mean	StDev
1	312	46.36	22.92
2	123	37.50	27.74
3	58	31.84	29.92
4	13	33.46	26.64
5	4	11.50	58.00

Individual 95% CIs For Mean



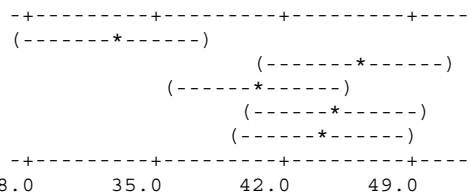
Pooled StDev = 25.44

Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
ts cod.	4	11284	2821
Error	506	331595	655
Total	510	342880	

F            P  
4.30        0.002

Level	N	Mean	StDev
1	95	32.66	33.34
2	101	45.95	25.42
3	105	40.87	26.83
4	105	44.73	20.10
5	105	44.23	20.95

Individual 95% CIs For Mean



Pooled StDev = 25.60

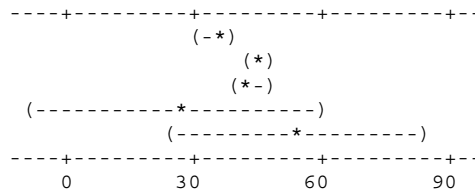
Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
ts cod.	4	8709	2177
Error	507	337547	666
Total	511	346256	

F            P  
3.27        0.012

Level	N	Mean	StDev
1	112	34.63	32.37
2	270	44.29	24.51
3	125	43.43	21.75
4	2	25.50	16.26
5	3	53.67	18.58

Individual 95% CIs For Mean

Pooled StDev = 25.80



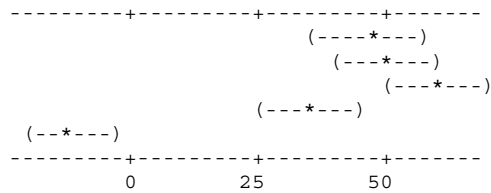
Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
Temper.	4	89399	22350
Error	130	92319	710
Total	134	181718	

F            P  
31.47        0.000

Level	N	Mean	StDev
1	24	46.71	15.75
2	28	50.61	11.57
3	27	59.96	11.33
4	27	34.74	45.48
5	29	-11.41	30.40

Individual 95% CIs For Mean

Pooled StDev = 26.65



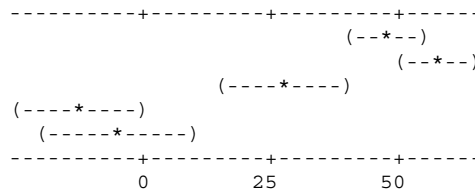
Analysis of Variance for CSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
Tempcod.	4	92043	23011
Error	130	89674	690
Total	134	181718	

F            P  
33.36        0.000

Level	N	Mean	StDev
1	41	47.73	14.34
2	45	57.93	11.73
3	18	26.72	51.55
4	18	-11.78	36.18
5	13	-5.31	25.76

Individual 95% CIs For Mean

Pooled StDev = 26.26



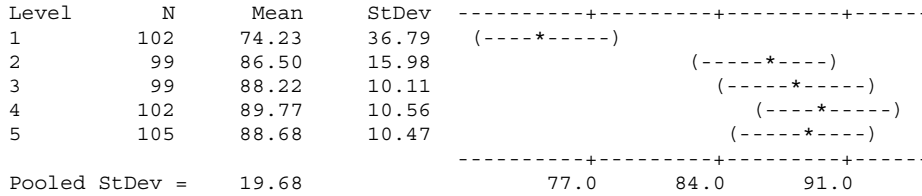
## BSB-Abbau

Analysis of Variance for BSB-Abb.

Source	DF	SS	MS	F	P
CSBfr. c	4	16712	4178	10.79	0.000
Error	502	194428	387		
Total	506	211140			

Level	N	Mean	StDev
1	102	74.23	36.79
2	99	86.50	15.98
3	99	88.22	10.11
4	102	89.77	10.56
5	105	88.68	10.47

Individual 95% CIs For Mean

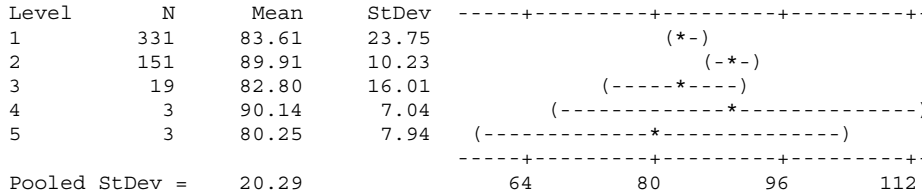


Analysis of Variance for BSB-Abb.

Source	DF	SS	MS	F	P
CSBfr. c	4	4402	1101	2.67	0.031
Error	502	206738	412		
Total	506	211140			

Level	N	Mean	StDev
1	331	83.61	23.75
2	151	89.91	10.23
3	19	82.80	16.01
4	3	90.14	7.04
5	3	80.25	7.94

Individual 95% CIs For Mean

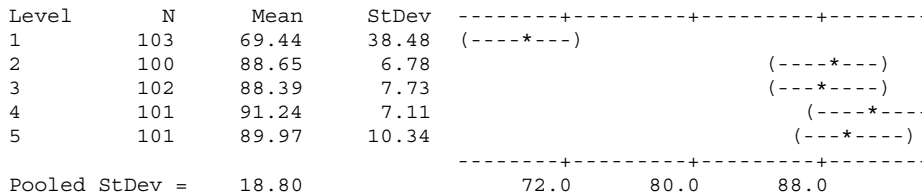


Analysis of Variance for BSB-Abb.

Source	DF	SS	MS	F	P
BSBfr. c	4	33746	8436	23.87	0.000
Error	502	177394	353		
Total	506	211140			

Level	N	Mean	StDev
1	103	69.44	38.48
2	100	88.65	6.78
3	102	88.39	7.73
4	101	91.24	7.11
5	101	89.97	10.34

Individual 95% CIs For Mean

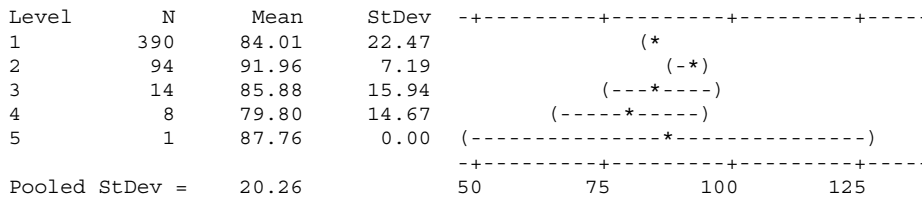


Analysis of Variance for BSB-Abb.

Source	DF	SS	MS	F	P
BSBfr. c	4	5052	1263	3.08	0.016
Error	502	206088	411		
Total	506	211140			

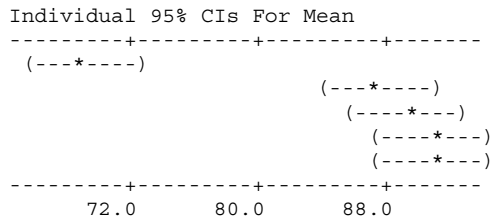
Level	N	Mean	StDev
1	390	84.01	22.47
2	94	91.96	7.19
3	14	85.88	15.94
4	8	79.80	14.67
5	1	87.76	0.00

Individual 95% CIs For Mean

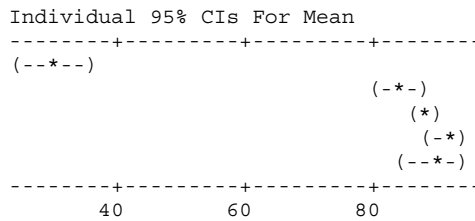




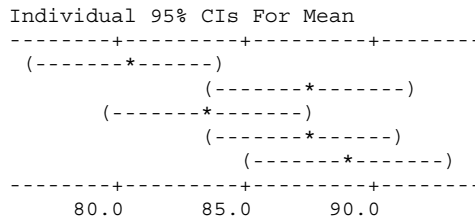
Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
bsb/csb	4	34736	8684
Error	502	176404	351
Total	506	211140	



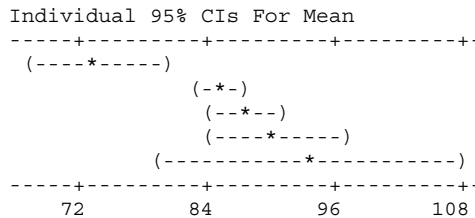
Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
bsb/csb	4	91855	22964
Error	502	119285	238
Total	506	211140	



Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
verweilz	4	5097	1274
Error	502	206043	410
Total	506	211140	



Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
verweilz	4	7367	1842
Error	502	203773	406
Total	506	211140	

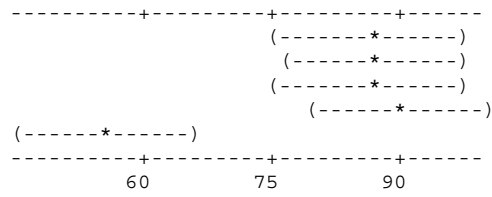


Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
O2	4	22038	5510
Error	130	101258	779
Total	134	123296	

F            P  
7.07        0.000

Level	N	Mean	StDev
1	27	86.31	9.34
2	27	87.59	11.81
3	26	86.49	12.60
4	28	89.53	7.65
5	27	55.70	58.78

Individual 95% CIs For Mean



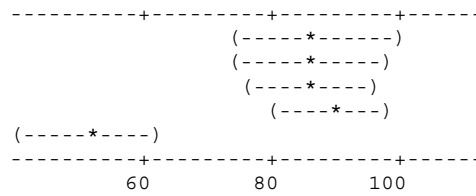
Pooled StDev = 27.91

Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
O2	4	25409	6352
Error	130	97887	753
Total	134	123296	

F            P  
8.44        0.000

Level	N	Mean	StDev
1	16	86.58	10.48
2	22	85.68	11.90
3	29	86.89	11.99
4	44	89.14	8.16
5	24	51.77	61.28

Individual 95% CIs For Mean



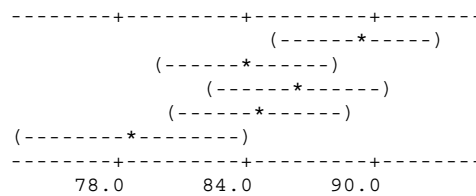
Pooled StDev = 27.44

Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
Ges.-N	4	4651	1163
Error	467	204930	439
Total	471	209581	

F            P  
2.65        0.033

Level	N	Mean	StDev
1	104	89.24	18.03
2	105	84.07	29.14
3	104	86.49	12.46
4	97	84.44	14.64
5	62	78.73	27.63

Individual 95% CIs For Mean



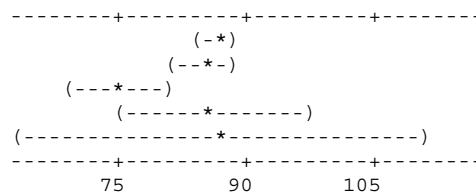
Pooled StDev = 20.95

Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
Ges.-N	4	4682	1171
Error	467	204899	439
Total	471	209581	

F            P  
2.67        0.032

Level	N	Mean	StDev
1	293	86.53	21.62
2	124	84.86	13.97
3	40	75.05	33.65
4	12	86.21	4.42
5	3	87.51	3.79

Individual 95% CIs For Mean



Pooled StDev = 20.95

Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
nh4 cod.	4	4264	1066
Error	500	206812	414
Total	504	211076	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	104	88.44	17.90
2	105	87.94	16.00
3	102	83.84	27.40
4	101	86.20	12.64
5	93	80.41	24.53

Pooled StDev = 20.34

Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
nh4 cod.	4	3998	1000
Error	500	207078	414
Total	504	211076	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	311	86.76	21.00
2	119	85.94	12.01
3	58	77.76	30.01
4	13	85.03	12.80
5	4	85.62	1.25

Pooled StDev = 20.35

Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
ts cod.	4	9217	2304
Error	502	201923	402
Total	506	211140	

Individual 95% CIs For Mean

Level	N	Mean	StDev
1	94	77.00	35.02
2	101	89.06	11.16
3	103	86.55	18.95
4	105	85.43	17.56
5	104	88.64	8.09

Pooled StDev = 20.06

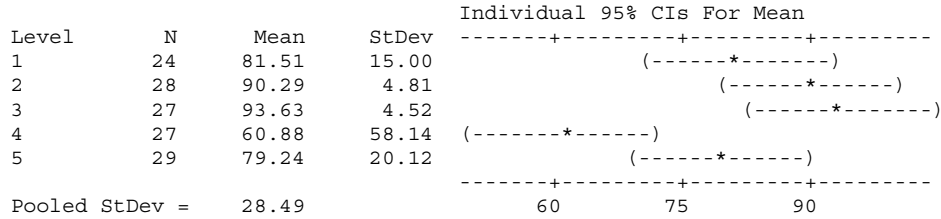
Analysis of Variance for BSB-Abb.			
Source	DF	SS	MS
ts cod.	4	6033	1508
Error	502	205106	409
Total	506	211140	

Individual 95% CIs For Mean

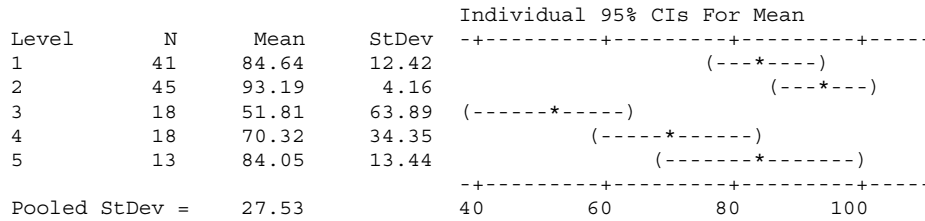
Level	N	Mean	StDev
1	111	79.05	32.66
2	268	86.86	17.18
3	123	88.12	8.52
4	2	85.72	11.36
5	3	90.69	2.48

Pooled StDev = 20.21

Analysis of Variance for BSB-Abb.					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temcod.A	4	17744	4436	5.46	0.000
Error	130	105552	812		
Total	134	123296			

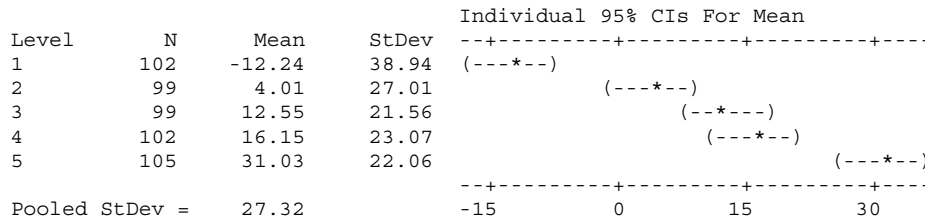


Analysis of Variance for BSB-Abb.					
Source	DF	SS	MS	F	P
Tempcod.	4	24743	6186	8.16	0.000
Error	130	98553	758		
Total	134	123296			

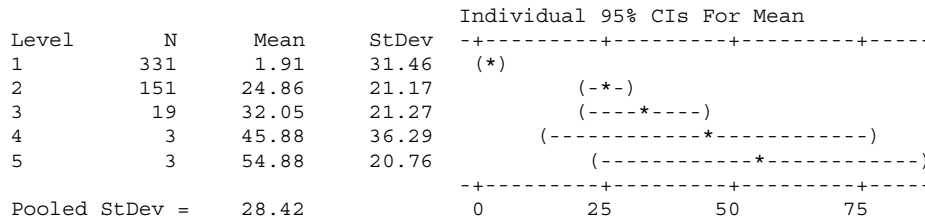


## CSB-SA-Abbau

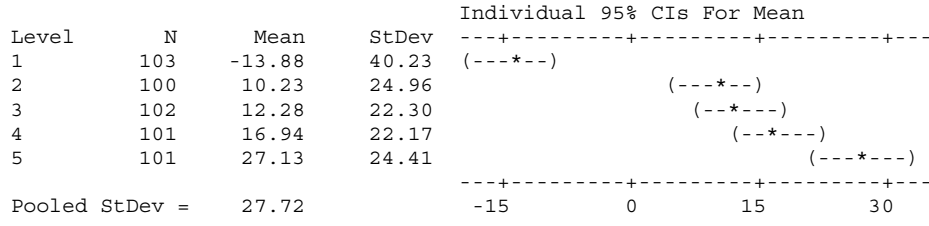
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
CSBfr. c	4	104843	26211	35.13	0.000
Error	502	374554	746		
Total	506	479397			



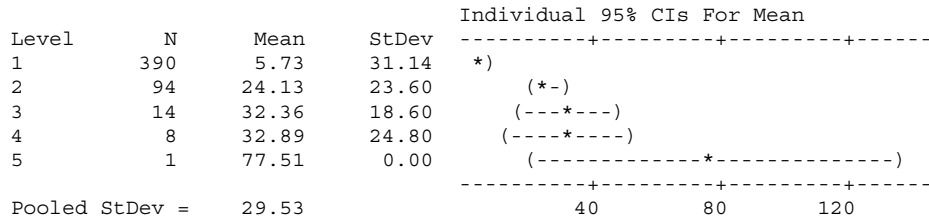
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
CSBfr. c	4	74033	18508	22.92	0.000
Error	502	405364	807		
Total	506	479397			



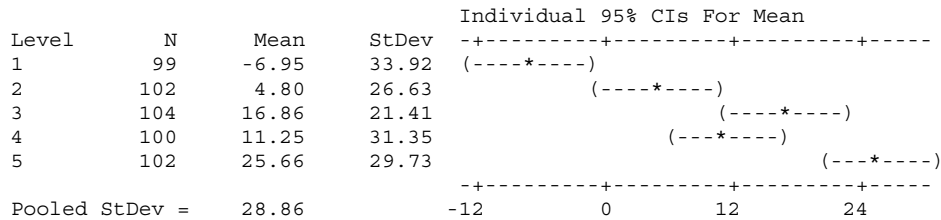
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
BSBfr. c	4	93658	23414	30.47	0.000
Error	502	385740	768		
Total	506	479397			



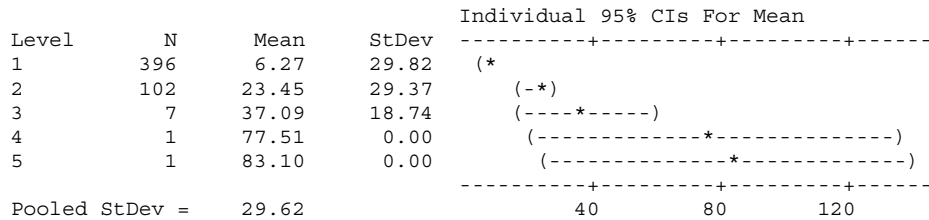
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
BSBfr. c	4	41526	10382	11.90	0.000
Error	502	437871	872		
Total	506	479397			



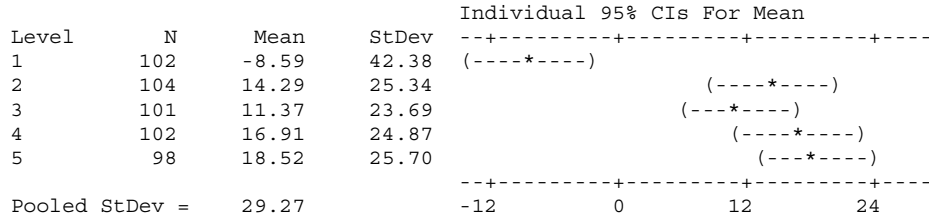
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
CSB-SA c	4	61170	15293	18.36	0.000
Error	502	418227	833		
Total	506	479397			



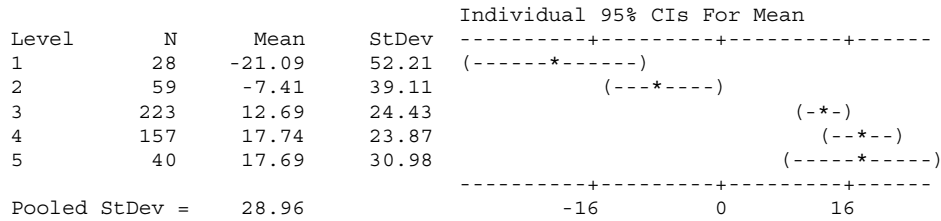
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
CSB-SA c	4	38898	9725	11.08	0.000
Error	502	440499	877		
Total	506	479397			



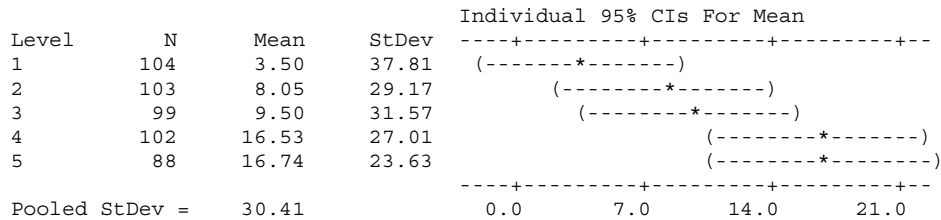
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
bsb/csb	4	49231	12308	14.36	0.000
Error	502	430167	857		
Total	506	479397			



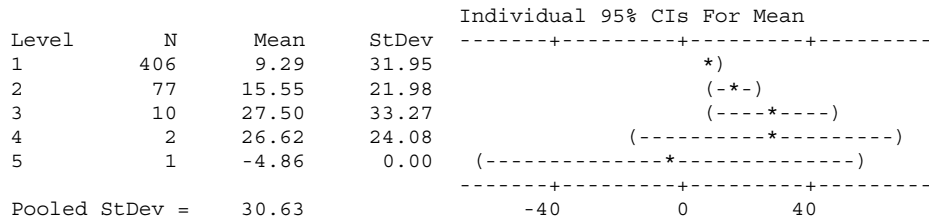
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
bsb/csb	4	58248	14562	17.36	0.000
Error	502	421150	839		
Total	506	479397			



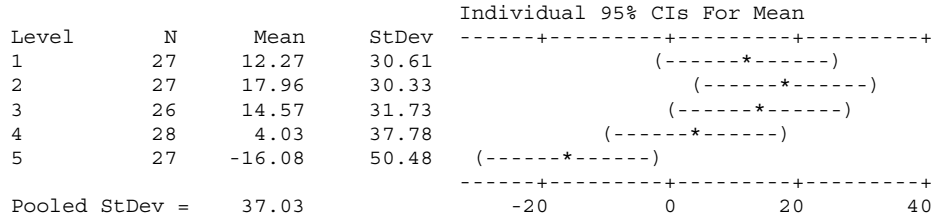
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
pi cod.	4	12940	3235	3.50	0.008
Error	491	453936	925		
Total	495	466877			



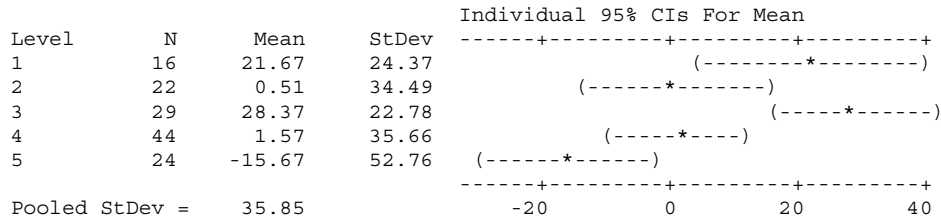
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
pi cod.	4	6187	1547	1.65	0.161
Error	491	460689	938		
Total	495	466877			



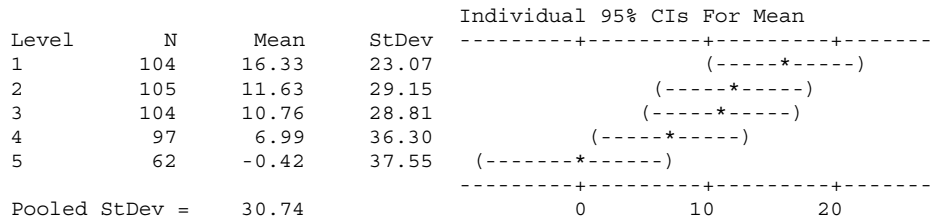
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
O2	4	20079	5020	3.66	0.007
Error	130	178243	1371		
Total	134	198322			



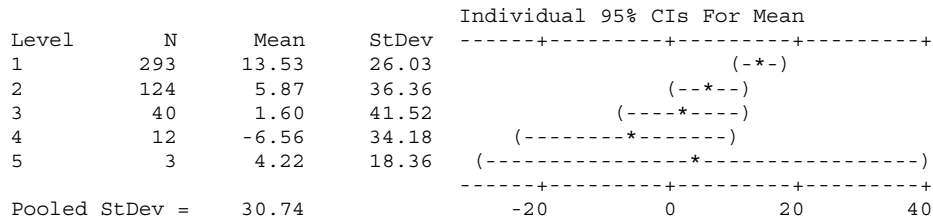
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
O2	4	31202	7800	6.07	0.000
Error	130	167120	1286		
Total	134	198322			



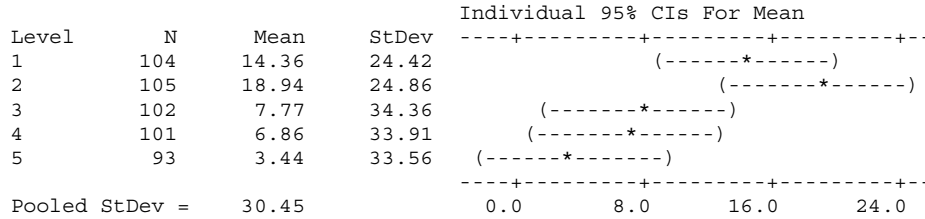
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
Ges.-N	4	12128	3032	3.21	0.013
Error	467	441151	945		
Total	471	453279			



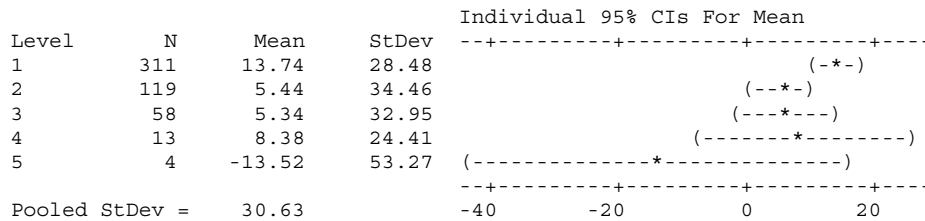
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
Ges.-N	4	11986	2996	3.17	0.014
Error	467	441293	945		
Total	471	453279			



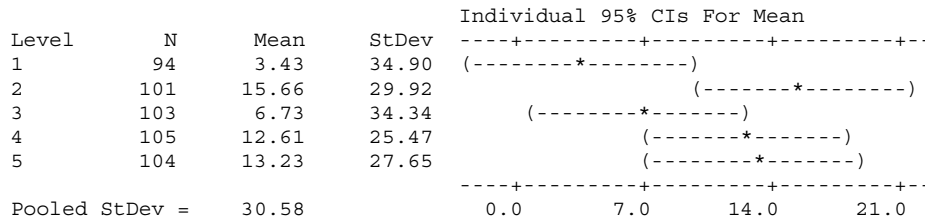
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
nh4 cod.	4	15758	3939	4.25	0.002
Error	500	463485	927		
Total	504	479243			



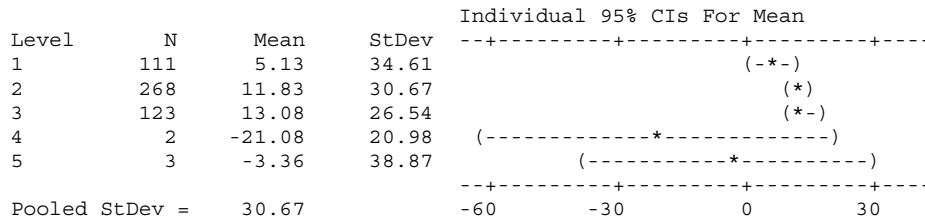
Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
nh4 cod.	4	10220	2555	2.72	0.029
Error	500	469022	938		
Total	504	479243			



Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
ts cod.	4	10096	2524	2.70	0.030
Error	502	469302	935		
Total	506	479397			

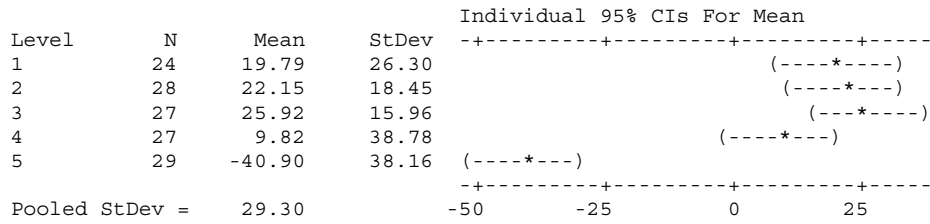


Analysis of Variance for CSB-SA-A					
Source	DF	SS	MS	F	P
ts cod.	4	7059	1765	1.88	0.113
Error	502	472338	941		
Total	506	479397			

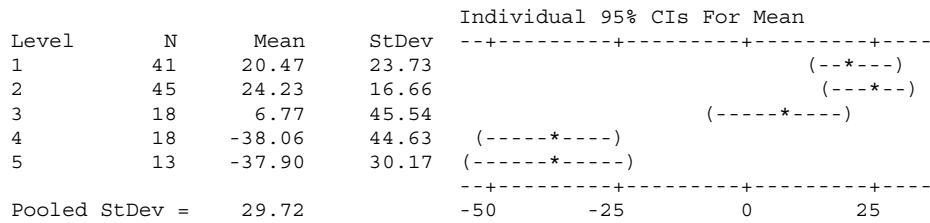




Analysis of Variance for CSB-SA-A				
Source	DF	SS	MS	
Temper.	4	86731	21683	F 25.26
Error	130	111591	858	P 0.000
Total	134	198322		



Analysis of Variance for CSB-SA-A				
Source	DF	SS	MS	
Tempcod.	4	83522	20880	F 23.64
Error	130	114800	883	P 0.000
Total	134	198322		



## Literaturverzeichnis

- [1] Hand-Out, Die Abwasserreinigungsanlage der Riedel de Haën AG
- [2] H.-P. Lühr, Wasserrecht und betriebliche Abwasserentsorgung, (1998), UB Media Verlag GmbH (CD-ROM)
- [3] K. Imhoff, Taschenbuch der Stadtentwässerung, Verlag R. Oldenbourg, München
- [4] ATV-Handbuch, Biologische und weitergehende Abwasserreinigung, 4. Aufl. (1997), Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin
- [5] P. M. Kunz, Eigen- und Prozeßkontrolle in Kläranlagen, 1. Aufl. (1995), VCH, Weinheim
- [6] ATV, Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik Bd. III, (1983), Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin
- [7] V. Neitzel, U. Iske, Abwasser – Technik und Kontrolle, 1. Aufl. (1998), VCH, Weinheim
- [8] M. Mudrach, S. Kunst, Biologie der Abwasserreinigung, 4. Aufl. (1994), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart
- [9] L.A. Hütter, Wasser und Wasseruntersuchung, 2. Aufl. (1984), Dieserweg Salle Sauerländer, Frankfurt/Main
- [10] E. Scheffler; Statistische Versuchsplanung und –auswertung, 3. Aufl. (1997), Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart
- [11] Hand-Out, Seminar zum Process Improvement Master, Allied Signal, (1997)
- [12] M. Otto, Chemometrie, 1. Aufl. (1997), VCH, Weinheim
- [13] G. Retzlaff, G. Waibel, J. Rust, Statistische Versuchsplanung, (1975), Verlag Chemie, Weinheim
- [14] M. Nowak, Dissertation, (1999), Hannover
- [15] S.Müller, Diplomarbeit, (1997), Hannover
- [16] K. Doerffel, Statistik in der analytischen Chemie, 5. Aufl. (1990), Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig
- [17] J.T. Lorenzen, V.L. Virgil, Design of Experiments – A no name approach, 1. Aufl. (1993), Marcel Dekker Inc., New York

- [18] G.E.P. Box, W.G. Hunter, S.J. Hunter, *Statistics for Experimenters*, (1978), John Wiley & Sons
- [19] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 3. Aufl. (1991), John Wiley & Sons
- [20] G. E. P. Box, D.W. Behnken, *Technometrics*, 2(4), (1969), 455-475
- [21] R.B. D'Augustino, M.A. Stevens, *Goodness-of-Fit-Techniques*, (1986), Marcel Dekker, New York
- [22] T.A. Ryan, J. Joiner, B.L. Joiner, *Normal Probability Plots and Tests for Normality*, Technical Report, Statistics Department, The Pennsylvania State University,
- [23] *Minitab User's Guide Pt. 1 + 2*, Minitab Inc., State College, PA, USA
- [24] Hand-Out, Seminar zum Process Improvement Master, Allied Signal, (1997)
- [25] K. Doerffel, K. Eckschläger, *Optimale Strategien in der Analytik*, 1. Aufl. (1981), Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig
- [26] E. Dietrich, A. Schulze, *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozeßqualifikation*, 2. Aufl. (1996), Carl Hanser Verlag, München
- [27] G. Wünsch, *Vorlesung Chemometrie (2000)*, Universität Hannover
- [28] W. Funk, V. Dammann, G. Donnentert, *Qualitätssicherung in der analytischen Chemie*, 1. Aufl. (1992), Verlag Chemie, Weinheim
- [29] O. L. Davies, *The Design and Analysis of Industrial Experiments*, 1. Aufl. (1978), Longman Group Ltd., New York
- [30] W.G. Cochran, G.M. Cox, *Experimental Designs*, 1. Aufl. (1968), John Wiley & Sons Inc., New York
- [31] G.E.P. Box, J.S. Hunter, *Ann. Math. Stat.*, 28, 1957, 1955-241
- [32] R.A. Mc Lean, V.L. Anderson, *Applied factorial and fractional Designs*, 1. Aufl. (1984), Marcel Dekker Inc., New York
- [33] E. Mittenecker, *Planung und statistische Auswertung von Experimenten*, 1. Aufl. (1983), Franz Deuticke Verlagsgesellschaft, Wien
- [34] H. Wildner, G. Wünsch, *J. prakt. Chem.*, 339 (1997), 107-113
- [35] G. Wünsch, *J. prakt. Chem.*, 336, (1994), 319
- [36] A. Wölke, *Dissertation*, (1999), Hannover

- [37] M. Hendriks, J.H: De Boer, A.K. Smilde, Robustness of Analytical Chemical Methods and Pharmaceutical Technical Products, 1. Aufl. (1996), Elsevier
- [38] The United States Pharmacopeia XXII, The Formulary XVII, United States Pharmaceutical Convention Rockville, (1990), 1712
- [39] Drugs Directorate Guidelines, Acceptable Methods, Health Protection Branch – Health and Welfare Canada (1992), 20-22
- [40] W.J. Youden, E.H: Steiner, Statistical Manual of the Association of Official Analytical Chemists, (1975), Arlington, USA
- [41] J. Caporal-Gaultier, Guide de Validation Analytique, S.T.P. Pharma Pratiques,2(4)(1992), 205-226
- [42] M. Mullholland, Ruggedness Testing in Analytical Chemistry, TRAC, 7 (1988), 383-389
- [43] M. Mullholland, J. Waterhouse, Chromatographia, 25(9), (1988), 769-774
- [44] J.A. Van Leeuwen, L.M.C. Buydens, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 10 (1991), 337-347
- [45] M. Mullholland, J. Waterhouse, Journal of Chromatography, 395(1987), 539-551
- [46] G. Wynia, P. Post, J. Broernsen, F.A. Maris, Chromatographia, 39(5/6) (1994), 355-362
- [47] T.B. Barker, Engineering Quality by Design: Interpreting The Taguchi Approach,(1990), Marcel Dekker Inc., New York
- [48] J. Cullen, An Introduction to Taguchi Methods, Quality Today, 9 (1987)
- [49] G.S. Peace, Taguchi Methods, (1993), Addison-Wesley Publishing Company, New York
- [50] S.P. Jones, Design for Minimizing The Effect of Environmental Variables, PhD Thesis (1990), University of Wisconsin-Madison, Madison
- [51] M. Hendriks, J.H: De Boer, A.K. Smilde, Robustness of Analytical Chemical Methods and Pharmaceutical Technical Products, 1. Aufl. (1996), Elsevier
- [52] J.H. De Boer, A.K. Smilde, D.A. Doornbos, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 7 (1990), 223-236
- [53] H. De Boer, A.K. Smilde, D.A. Doornbos, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 10 (1991), 325-336

- [54] F. H. C. Marriot, A Dictionary of Statistical Terms, 5. Aufl. (1990), Longman Scientific & Technical, Harlow, UK
- [55] Mathematik Lexikon, 2. Aufl. (1991), Verlag Vieweg, Braunschweig
- [56] J. Glenn, R.C. James, Mathematics Dictionary, 5. Aufl. (1992), Van Nostrand Reinhold, New York

## Lebenslauf

### Persönliche Daten

Sabine Müller  
geboren am 17.2.1970  
in Berlin

### Schule

1976 - 1980  
1980 - 1986  
1986 - 1989

Grundschule Stelingen  
Orientierungstufe und Gymnasium Berenbostel  
Bismarckschule Hannover

### Studium

1989 – 1997  
Sep`91  
Jun`96 - Jan`97

Studium der Chemie an der Universität Hannover  
Vordiplom

Jan`97  
Jan`97 – Jun`00

Diplomarbeit in Analytischer Chemie mit dem Thema  
„Das Konzept der Robustheit, entwickelt an einem  
biotechnologischen Prozeß“

Abschluss als Diplom-Chemikerin

Promotion in Analytischer Chemie mit dem Thema  
„Strategien zur Optimierung der Abbauleistung einer  
betrieblichen Abwasserreinigungsanlage“

Okt`97 – Apr`00

Nebenfachstudium BWL an der Universität Hannover

### Praktikum

Jul`99 – Sep`99

Praktikum bei Albonova in Quito, Ecuador

### Tätigkeiten

1992 - 1996

Studentische Hilfskraft an der Medizinischen  
Hochschule Hannover, Institut für medizinische  
Chemie: Praktikumbetreuung und Seminare für  
Medizinstudenten

seit Jul`97

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität  
Hannover, Institut für Anorganische Chemie,  
Lehrgebiet Analytik

## **Eidesstattliche Versicherung**

Hiermit versichere ich,

Sabine Müller, geboren am 17. Februar 1970 in Berlin,

an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt,  
alle Hilfsmittel angegeben und nur diese verwendet habe.

Hannover, den 5. Juni 2000