



INFOR-Projekt Nr. 27

**Entwicklung und Anwendung einer
Benchmarking-Methode
zur technologisch-ökonomischen Optimierung
von Abwasserreinigungsanlagen**

SCHLUSSBERICHT

Mai 2002

Institut für Papierfabrikation
Technische Universität Darmstadt

Projektbearbeiter:
Dipl.-Ing. B. Bobek
Dr.-Ing. U. Hamm

Kooperationspartner:
Papiertechnische Stiftung
München

Projektlbearbeiter:
Dipl.-Ing. F. Schmid
Dipl.-Ing. I. Demel

INFOR-Projekt-Nr. 27

Entwicklung und Anwendung einer Benchmarking-Methode zur technologisch-ökonomischen Optimierung von Abwasserreinigungsanlagen

Forschungsstelle

INSTITUT FÜR PAPIERFABRIKATION, TU DARMSTADT

**Dipl.-Ing. Brigitte Bobek
Dr.-Ing. Udo Hamm**

in Kooperation mit

PTS MÜNCHEN

**Dipl.-Ing. Frank Schmid
Dipl.-Ing. Ingrid Demel**

Laufzeit: 01.12.2000 - 31.03.2002

Darmstadt, Mai 2002

Entwicklung und Anwendung einer Benchmarking-Methode zur technologisch-ökonomischen Optimierung von Abwasserreinigungsanlagen

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung	3
2. Benchmarking-Projekte in der Abwasserwirtschaft	6
3. Benchmarking im Bereich Abwasserreinigung der Papiererzeugung	8
4. Projektziel	9
5. Durchführung des Benchmarking-Projekts	10
5.1 Festlegung des Benchmarking-Objekts	10
5.2 Auswahl der Benchmarking Partner	10
5.3 Datenerhebung	11
5.4 Datenauswertung	12
5.4.1 Produktionsdaten	12
5.4.1.1 Rohstoffe und chemische Additive	12
5.4.1.2 Spez. Frischwasserbedarf und spez. Abwassermenge	13
5.4.2 Daten zur biologischen Abwasserreinigung	14
5.4.2.1 Auslegung der Prozessstufen	14
5.4.2.1.1 Anaerob-Stufe	14
5.4.2.1.2 Aerob-Stufe	15
5.4.2.2 Abwasserdurchsatz, -frachten und -parameter	24
5.4.2.3 Auszug aus den Genehmigungsbescheiden	26
5.4.2.4 Betriebskosten, Abwasserabgabe	27
6. Berechnung von Kenngrößen und Kennzahlen	29
6.1 Leistungsorientierte technische Kenngrößen und Kennzahlen	29
6.1.1 Technische Kenngrößen und Kennzahlen der Anaerob-Stufe	30
6.1.2 Technische Kenngrößen und Kennzahlen der Aerob-Stufe	33
6.1.3 Technische Kenngrößen und Kennzahlen der Gesamtanlage	35
6.2 Vergleich der technischen Leistung	39
6.3 Kostenorientierte Kenngrößen und Kennzahlen	42
6.3.1 Spez. Kosten, bezogen auf die eliminierte CSB-Fracht	42
6.3.2 Spez. Kosten, bezogen auf die Abwassermenge	47
6.3.3 Spez. Kosten, bezogen auf die Bruttoproduktion	50
6.3.4 Spez. Kosten, bezogen auf Abwassereinheiten	50

7.	Verknüpfung der leistungs- und kostenorientierten Anlageneffizienz	55
7.1	Beurteilung der Gesamteffizienz mittels Harrington-Funktion	55
7.2	Beurteilung der Gesamteffizienz mittels Punktesystem	59
8.	Diskussion der Benchmarks und Bewertung	63
8.1	Technische Effizienz	63
8.1.1	Anaerob-Stufe	63
8.1.2	Aerob-Stufe	64
8.1.3	Gesamtanlage	66
8.2	Wirtschaftliche Effizienz	69
8.2.1	Spez. Gesamtkosten	70
8.2.1.1	Spez. Chemikalienkosten	70
8.2.1.2	Spez. Energiekosten	73
8.2.1.3	Spez. Wartungs- und Instandhaltungskosten	74
8.2.1.4	Spez. Personalkosten	75
8.2.1.5	Spez. Kosten für die Überschussschlamm-Entsorgung	76
8.3	Spez. Gesamtkosten, bezogen auf Abwassereinheiten	76
9.	Zusammenfassung	78
10.	Dank	82
11.	Literatur	83
12.	Anhang	84

Entwicklung und Anwendung einer Benchmarking-Methode zur technologisch-ökonomischen Optimierung von Abwasserreinigungsanlagen

1. Einleitung

Der Begriff „Benchmark“ stammt ursprünglich aus dem Bau- und Vermessungswesen und bezeichnet im anglo-amerikanischen Sprachraum einen Orientierungs- und Markierungspunkt. Ende der siebziger Jahre fand der Begriff Eingang in die Betriebswirtschaftslehre, als Unternehmen auf Basis von Vergleichs- oder Richtwerten anderer Unternehmen in führender Position nachhaltige Verbesserungen der eigenen Unternehmensleistung zu realisieren versuchten. Dahinter stand die Absicht, durch einen kontinuierlichen Vergleich mit Leistungsführern die eigene Wettbewerbsfähigkeit zu sichern bzw. zu steigern.

Das in der Industrie entwickelte Benchmarking-Verfahren war ursprünglich eine wirtschaftlich orientierte Analysenmethode, die dazu diente, das Wirtschaftspotenzial von Unternehmen oder Unternehmensbereichen zu erfassen und mit konkurrierenden Unternehmen zu vergleichen. Aus den Ergebnissen ließen sich Maßnahmen zur Optimierung ableiten. Auf der Grundlage von eindeutig beschriebenen Abläufen und mit Messgrößen belegten Prozessen kann Benchmarking darüber hinaus auf Produkte, Dienstleistungen, Funktionen und technische Prozesse angewendet werden. Ziel einer solchen Analyse ist es zum einen, anhand geeigneter technischer und/oder wirtschaftlicher Kennzahlen, mit denen sich die Effizienz von Prozessen/Systemen beschreiben lässt, die Leistungsunterschiede zu anderen Prozessen oder Systemen zu erkennen und zum anderen Methoden und Vorgehensweisen, die zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit führen, zu finden und einzusetzen. Zum Aufzeigen von Leistungsunterschieden können sowohl quantitative Indikatoren als auch qualitative Messgrößen herangezogen werden, die aus der Analyse von Daten und Informationen der betrachteten Prozesse und Systeme stammen.

Abhängig von der Wahl der Vergleichsunternehmen unterscheidet man zwischen internem und externem Benchmarking. Beim internen Benchmarking erfolgt ein interner Vergleich von beispielsweise Prozessabläufen oder unternehmerischen Funktionen wie z.B. ein Vergleich der Produktionskosten an zwei verschiedenen Standorten eines Unternehmens. Das externe Benchmarking kann als Vergleich erfolgen mit

- Konkurrenzunternehmen (kompetitives oder konkurrenzbezogenes Benchmarking),
- einem Branchendurchschnitt (branchenbezogenes Benchmarking), oder
- dem „weltbesten“ Unternehmen im Hinblick auf den untersuchten Bereich.

Der letztgenannte Vergleich ist die spektakulärste Form des Benchmarking. Problematisch ist jedoch, das entsprechende Vergleichsunternehmen aufzufinden.

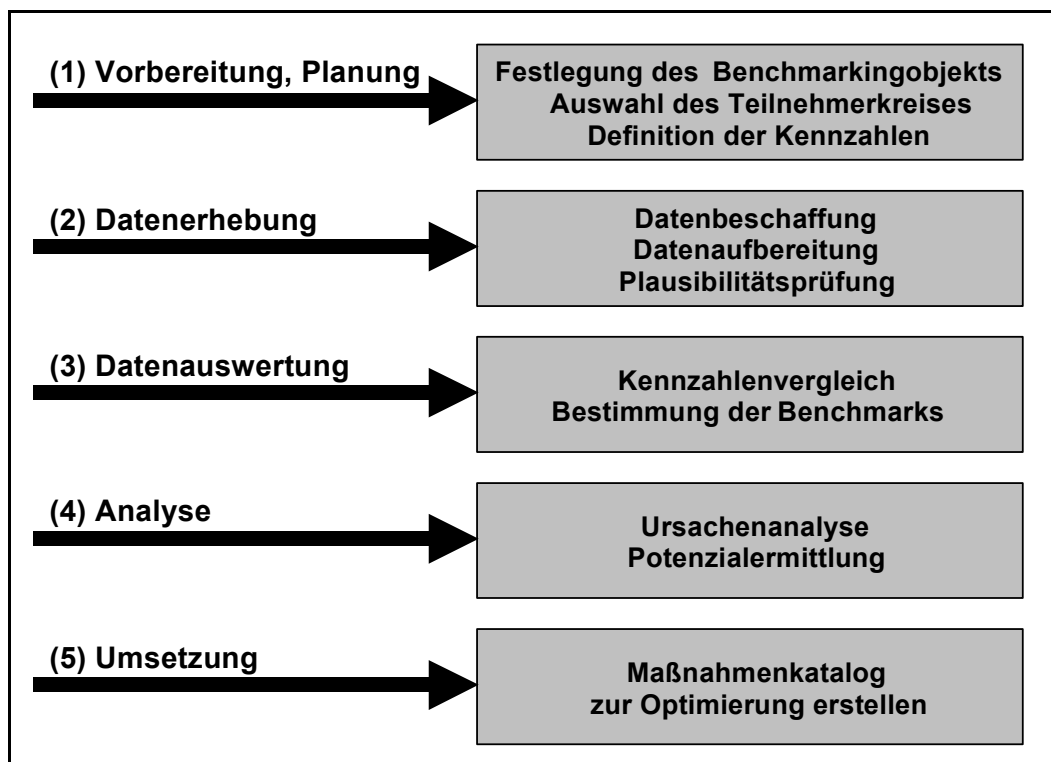


Abb.1: Arbeitsschritte beim Benchmarking

Die Durchführung eines Benchmarking kann gemäß **Abb.1** in fünf Phasen unterteilt werden:

- In der Vorbereitungs- und Planungsphase werden das zu untersuchende Benchmarking-Objekt (Prozess, System) definiert und die für den Leistungsvergleich relevanten Kennzahlen festgelegt. Danach werden die am Benchmarking teilnehmenden Unternehmen (Benchmarking-Partner) bestimmt.
- In der zweiten Phase erfolgen die Datenerhebung, die Aufbereitung der Daten und die Plausibilitätsprüfung. Dabei muss sichergestellt sein, dass das von den Benchmarking-Partnern bereitgestellte Datenmaterial in Umfang, Breite und Tiefe vergleichbar ist.

- In der dritten Phase werden die leistungsrelevanten Kennzahlen verglichen und die Benchmarks bzw. Bestwerte bestimmt.
- In der vierten Phase werden die Ursachen der Leistungsunterschiede analysiert. Darauf aufbauend werden Verbesserungspotenziale ermittelt, die eine Annäherung an die Bestwerte ermöglichen.
- In der letzten Phase wird ein Maßnahmenkatalog zur Optimierung der Prozesse/Systeme erstellt, der in die täglichen Arbeitsabläufe zu integrieren ist.

Der Erfolg der Optimierungsmaßnahmen bzw. die Sicherstellung des Leistungsniveaus ist durch ein erneutes Benchmarking in bestimmten Zeitabständen zu kontrollieren.

2. Benchmarking-Projekte in der Abwasserwirtschaft

In der Wasserwirtschaft gewinnt die Frage der Wirtschaftlichkeit zunehmend an Bedeutung. So werden beispielsweise Gebührenerhöhungen vom Bürger nicht mehr hingenommen, ohne dass nachgewiesen wird, wie die Gebühren zusammengesetzt sind, auf welchen Kosten sie beruhen und welche Umweltqualitätsziele erreicht werden. Um Kostensteigerungen gegenzusteuern bzw. Kostenstrukturen transparent zu machen, wurden in den vergangenen Jahren in der deutschen, niederländischen und österreichischen Abwasserwirtschaft eine Reihe von Benchmarking-Projekten in verschiedenen Bereichen der Abwasserbeseitigung durchgeführt, die zum Teil noch nicht abgeschlossen sind oder für die bereits Folgeprojekte laufen.²⁻⁹⁾

Da zu Beginn der Benchmarking-Projekte weder einheitliche Begriffe noch Kostenstrukturen, Vorgehensweisen und Ergebnisbewertungen verwendet wurden, gründete die ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, im November 1998 eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe¹⁾ Benchmarking, in der Vertreter von Verbänden, Betreibern und der Wissenschaft zusammenarbeiten. In einem 2001 herausgegebenen Arbeitsbericht dieser Ad-hoc-Arbeitsgruppe sind sechs Benchmarking-Projekte in der deutschen Abwasserentsorgung aufgeführt, die sich mit den Benchmarking-Objekten Kanalnetze und kommunale Kläranlagen bzw. Verbandskläranlagen befassen.

In den Benchmarking-Projekten erfolgt in der Regel eine Untergliederung des Betrachtungsobjekts Kläranlage in die Teilprozesse

- Mechanische Reinigung
- Biologische Reinigung
- Weitergehende Reinigung
- Schlammbehandlung
- Schlammverwertung
- Sonstiges

denen alle Aufwandspositionen zugeordnet werden. Mit der Zerlegung in verschiedene Teilprozesse soll sichergestellt werden, dass das Benchmarking-Objekt Abwasserbehandlung bzw. die betrachteten Kläranlagen zweifelsfrei und eindeutig definiert sind. Eine besondere Bedeutung kommt einer genauen Definition der Schnittstellen zwischen den Teilprozessen und zu anderen Prozessen der Abwasserbeseitigung zu. Dadurch soll verhindert werden, dass Auslassungen bzw. Überschneidungen entstehen, die zu Kosten- und Ergebnisverfälschungen führen.

Bisher vorliegenden Projektergebnisse zeigen, dass ein Benchmarking mit der Zerlegung des Gesamtprozesses der Abwasserreinigung in wesentliche Teilprozesse un-

ter Einbezug weniger Kennzahlen als operatives Steuerungsinstrument zur Ermittlung von Verbesserungspotenzialen genutzt werden kann. Dies gelingt trotz großer Unterschiedlichkeiten zwischen den als Benchmarking-Objekten herangezogenen Kläranlagen in Bezug auf Auslegungsdaten und Ausstattung.

3. Benchmarking im Bereich Abwasserreinigung der Papiererzeugung

In der deutschen Papierindustrie wurde das Instrument Benchmarking für den Betrieb von Abwassereinigungsanlagen zumindest zwischen Wettbewerbern bisher nicht genutzt. Möglicherweise wurden bereits konzerninterne Benchmarking-Projekte durchgeführt mit dem Ziel, die eine oder andere Abwassereinigungsanlage in ihrer Reinigungseffizienz an die Konzernbesten heranzuführen. Entsprechende Untersuchungen sind allerdings nicht in der Fachliteratur veröffentlicht.

Möbius¹¹⁾ führte die vor dem Start des vorliegenden Projektes noch bestehenden Vorbehalte der deutschen Papierfabriken gegenüber einem firmenübergreifenden Benchmarking ihrer Abwasserreinigungsanlagen u.a. darauf zurück, dass im Benchmarking-Prozess neben Emissionsdaten zugleich auch sensible Produktionsdaten offengelegt werden müssen, die Wettbewerbern Einblicke in die Wirtschaftlichkeit des eigenen Erzeugungsprozesses erlauben würden. Er schlug vor, diese Barriere durch die Einrichtung einer neutralen Clearingstelle zu überwinden, die die Daten verschlüsselt veröffentlicht, so dass nicht mehr erkennbar ist, welcher Betrieb hinter welchen Daten steht.

Als wesentliche Voraussetzung zur Erreichung des gesetzten Zieles des Benchmarking fordert der Autor, dass jeder einzelne Benchmarking-Partner die relevanten Informationen seiner Wettbewerber einsehen kann, ohne deren Identität zu kennen. Sollte es für Insider möglich sein, über das Sortenprogramm oder Detailinformationen zur Abwasserreinigungsanlage die Daten einem bestimmten Betrieb zuzuordnen, ist es nach Möbius nicht erkennbar, wie sich daraus ein Nachteil für den Umgang mit Behörden, der Öffentlichkeit und den Wettbewerbern ergeben könnte, sofern der Betrieb nicht gravierende Mängel gegenüber dem allgemeinen Stand der Branche oder gar den rechtlichen Anforderungen aufweist. Die meisten deutschen Papierfabriken würden in ihren Umweltberichten ohnehin bereits sehr offen mit detaillierten Angaben zur Abwassereinleitung umgehen. Problematischer könnte es sich für kostenbezogene Einzeldaten darstellen, die bisher sowohl in Umweltberichten als auch bei der Erhebung von statistischen Daten durch Verbände in der Regel nicht veröffentlicht werden.

4. Projektziel

Das zu bearbeitende Forschungsvorhaben hatte den Charakter eines Pilotprojektes. Zunächst sollte geprüft werden, welche Methodik andere Industriebranchen bzw. die öffentliche Hand im Rahmen von Benchmarking-Projekten anwenden, und ob deren Vorgehensweise auf die spezifischen Randbedingungen von Papierfabriken (z.B. unterschiedlicher Roh- und Hilfsstoffeinsatz, sich unterscheidende Belastungen der zu reinigenden Abwässer) zu übertragen ist. Das Benchmarking sollte sich auf Altpapier verarbeitende Papierfabriken beschränken, deren Abwasserreinigung aus einer anaeroben-aeroben Verfahrenskombination besteht. Die Auswahl der Benchmarking-Partner sollte in Abstimmung mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses erfolgen. Der Vergleich der Abwasserreinigungsanlagen sollte nicht auf qualitative und quantitative Aspekte der Reinigungsleistung beschränkt sein, sondern auch wirtschaftliche Aspekte einbeziehen. Für Betriebe, die sich in Teilstufen oder im gesamten Abwasserreinigungsprozess unterhalb des Durchschnitts wiederfinden, sollten Schwachstellenanalysen durchgeführt werden und es sollten Anregungen zu einer technisch-wirtschaftlichen Optimierung der betreffenden Anlagen gegeben werden.

5. Durchführung des Benchmarking

5.1 Festlegung des Benchmarking-Objekts

Als Benchmarking-Objekt wurde eine zweistufige anaerobe/aerobe biologische Abwasserreinigungsanlage, bestehend aus Anaerob-Stufe einschließlich Biogasreinigung sowie Aerob-Stufe mit Nachklärung und Überschussschlamm-Behandlung, festgelegt. Die den biologischen Reinigungsstufen vorgeschaltete mechanische Reinigungsstufe sollte nicht in das Benchmarking-Verfahren einbezogen werden. Bei der Datenerhebung sollten Angaben zur mechanischen Vorreinigung der Vollständigkeit halber abgefragt werden, damit bei einer eventuellen Detailanalyse die entsprechenden Daten verfügbar sind. **Abb.2** zeigt das Schema des Benchmarking-Objekts Abwasserreinigungsanlage mit der Systemgrenze.

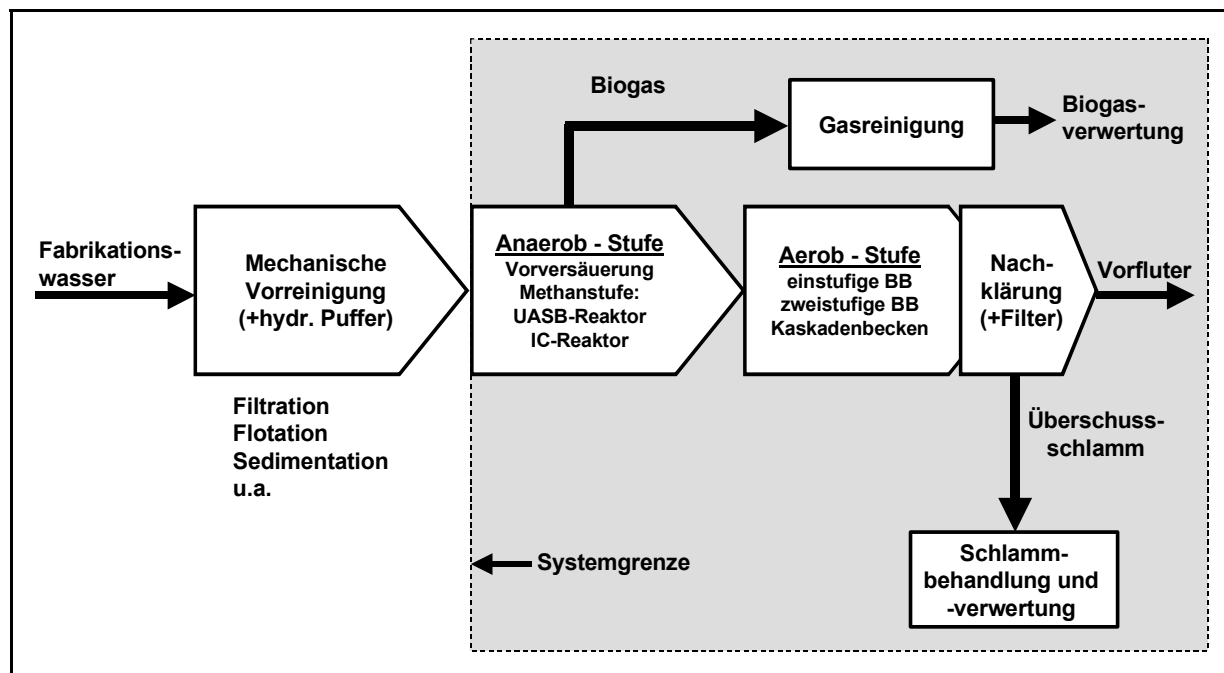


Abb.2: Benchmarking-Objekt zweistufige biologische Abwasserreinigung

5.2 Auswahl der Benchmarking-Partner

Für das Projekt wurden in der ersten Projektbegleitersitzung sechs Altpapier verarbeitende Papierfabriken aus dem Sortenbereich Verpackungspapiere und -karton als Benchmarking-Partner ausgewählt. Die Auswahl dieser Firmen orientierte sich an der Vergleichbarkeit der Verfahrenskonzepte ihrer biologischen Abwasserreinigung. Vor-

ausgesetzt wurde, dass in der Anaerob-Stufe UASB-Reaktoren betrieben werden. Daneben sollte der Aerob-Stufe keine weitergehende Reinigungsstufe, z.B. eine Ozon- oder Membranbehandlung, angeschlossen sein.

Tab.1 gibt einen Überblick über die Produktsorten und die Jahres-Brutto-Produktionen der am Benchmarking beteiligten Papierfabriken. Die Papierfabriken sind mit den Buchstaben A bis F bezeichnet, diese Codierung wird im gesamten Bericht beibehalten.

Tab.1: Produktsorten und Jahres-Bruttoproduktion der am Benchmarking beteiligten Papierfabriken

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Produkt-sorten		Faltschachtel-karton Gipsplatten-karton	Graukarton Testliner	Pappe Testliner Wellenstoff Kaschierpapier	Wellenstoff Testliner Graukarton	Testliner Wellenstoff	Wellpappen-rohpapier
Brutto-Produktion	t/a	392.000	118.000	263.000	370.000	294.800	280.800

5.3 Datenerhebung

Zur Datenerhebung wurde ein Fragebogen ausgearbeitet, der den Benchmarking-Partnern zur Beantwortung zugeschickt wurde (siehe Anhang). In diesem Fragenkatalog wurden die für das Benchmarking notwendigen Angaben zur Produktion und zur Abwasserreinigungsanlage aufgenommen. Daneben wurden auch die im Genehmigungsbescheid festgelegten Parameter und Grenzwerte abgefragt.

Die produktionsbezogenen Daten umfassten Angaben zu Art und Menge der eingesetzten Rohstoffe und chemischen Additive sowie Angaben zu Produktionsmengen, spez. Frischwasserbedarf und spez. Abwasseranfall. In Bezug auf die Abwasserreinigungsanlage waren die Konzentrationen der Abwasserinhaltsstoffe, detaillierte Daten zur Auslegung der einzelnen Prozessstufen sowie Höhe und Zusammensetzung der jährlichen Betriebskosten einschließlich der jährlichen Abwasserabgabe anzugeben. Die Betriebskosten sollten, sofern dies den Benchmarking-Partnern möglich war, für jede Prozessstufe der ARA getrennt angegeben werden.

Nach Eingang der ausgefüllten Fragebogen wurde während der Phase der Plausibilitätsprüfung mit den zuständigen Mitarbeitern in den am Benchmarking beteiligten Werke persönlich Kontakt aufgenommen oder telefonisch und per E-Mail korrespondiert, um Unklarheiten zu beseitigen oder um eine erneute Überprüfung der Daten zu bitten.

5.4 Datenauswertung

5.4.1 Produktionsdaten

5.4.1.1 Rohstoffe und chemische Additive

Kenntnisse über den Rohstoffeinsatz und den Einsatz chemischer Additive sind zur Beurteilung der Abbauleistung von Abwasserreinigungsanlagen von großer Bedeutung. Die bei der Papierproduktion eingesetzten Rohstoffe führen bei ihrer Verarbeitung entsprechend ihrem spez. initialen CSB-Wert zu unterschiedlich hohen CSB-Belastungen des Kreislaufwassers. So haben beispielsweise die AP-Sorten 1.02 (Sortiertes gemischtes Altpapier), 1.04 (Kaufhausaltpapier) und 4.03 (Gebrauchte Kraftwellpappe 2) mit 25 bis 30 kg CSB/t einen höheren spez. initialen CSB-Wert als die AP-Sorten 2.01 (Zeitungen) und 1.01 (Unsortiertes gemischtes Altpapier) mit ca. 5 kg CSB/t bis 15 kg CSB/t. Auch die biologische Abbaubarkeit der aus dem Altpapier stammenden CSB-verursachenden Substanzen, ausgedrückt durch das CSB/BSB₅-Verhältnis, kann variieren und somit die Leistungsbilanz der ARA zusätzlich beeinflussen. In gleicher Weise wirken sich die bei der Produktion eingesetzten chemischen Additive auf die CSB-Belastung des Abwassers aus. Entsprechende Untersuchungen haben gezeigt, dass der Rest-CSB von biologisch gereinigtem Abwasser teilweise auf schwer abbaubare chemische Additive zurückzuführen ist.

In den **Tab.2 und 3** sind die Rohstoffe und die CSB-relevanten chemischen Additive aufgeführt, die in den am Benchmarking beteiligten Papierfabriken eingesetzt werden. Auf die Angabe der Einsatzmengen der einzelnen AP-Sorten wurde verzichtet und stattdessen die Gesamtmenge des eingesetzten Altpapiers bzw. Zellstoffs angegeben. Die genannten chemischen Additive beschränken sich auf die für die CSB-Belastung des Abwassers relevanten Produkte. Die angegebenen Einsatzmengen gelten für die Gesamtproduktion und sind nicht nach Einsatz an den diversen Papier- bzw. Kartonmaschinen differenziert.

Tab.2: Rohstoffeinsatz in den am Benchmarking beteiligten Papierfabriken

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Zellstoff	t/a	26.422	1.020	-	6000	-	-
Altpapier	t/a	374.317	122.640	251.600	381.000	303.266	299.541
AP-Sorten		4.03	1.02/1.04	1.02	1.01/1.02	1.04	1.01
		1.04	5.01/1.03/	2.01	1.04	4.01	1.04
		1.02	4.01/4.03	1.04	4.01/4.03	1.01	
		3.12	3.18.01	4.03	2.01	1.02	
		2.03.01	3.04/3.15/ 2.03.01/2.12			5.03/2.10	

Tab.3: Einsatz chemischer Additive in den am Benchmarking beteiligten Papierfabriken

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Leimungsmittel	t/a	905	430	1.200	2.385	633	–
Stärkeprodukte	t/a	3.580	1.620	5.000	10.690	8.516	6.057
Retentionsmittel	t/a	1.455	122	590	140	956	1.013
Nassfestmittel	t/a	483	-	-	-	-	-
Pigmente	t/a	20.193	-	-	-	-	-
Binder	t/a	4.240	-	-	-	-	-

5.4.1.2 Spez. Frischwasserbedarf und spez. Abwassermenge

Die beim Produktionsprozess anfallende Abwassermenge, die in den Vorfluter eingeleitet wird, hängt vom Schließungsgrad des Wasserkreislaufs ab. Mit zunehmender Einengung des Wasserkreislaufs verringert sich die Abwassermenge, wobei sich gleichzeitig die Konzentration der Abwasserinhaltsstoffe erhöht. In gleichem Maße, wie sich die Abwassermenge bei der Einengung des Wasserkreislaufs verringert, reduziert sich der Frischwasserbedarf, der sich theoretisch aus der Abwassermenge und den Verdampfungsverlusten in der Trockenpartie errechnen lässt.

In **Tab.4** sind die spez. Frischwasser- und Abwassermengen der am Projekt beteiligten Papierfabriken zusammengefasst. Die Angaben zeigen, dass die Papierfabriken C und D die niedrigsten spez. Abwassermengen bzw. den geringsten spez. Frischwasserbedarf aufweisen. Diese Papierfabriken führen 30 % bzw. 45 % des biologisch gereinigten Abwassers in die Produktion zurück und erreichen damit eine engere Schließung des Wasserkreislaufs.

Tab.4: Spez. Frischwasserbedarf und spez. Abwassermengen der am Benchmarking beteiligten Papierfabriken

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Spez. Frischwasserbedarf, bez. auf Bruttoproduktion	m³/t	6,1	8,6	3,1	3,3	6,3	7,2
Spez. Abwassermenge, bez. auf Bruttoproduktion	m³/t	4,7	7,8	1,5	2,5	4,8	5,0

5.4.2 Daten zur biologischen Abwasserreinigungsanlage

5.4.2.1 Auslegung der Prozessstufen

Die Auslegung von biologischen Abwasserreinigungsanlagen bzw. der einzelnen Prozessstufen hängt von der CSB- bzw. BSB -Belastung des Abwassers und der zu behandelnden Abwassermenge ab. Unabhängig vom Bau- und Auslegungskonzept der Anaerobreaktoren und Belebungsstufen muss das Arbeitsvolumen der Reaktoren und Belebungsbecken so bemessen sein, dass die Verweilzeit des Abwassers im Reaktionsraum der mikrobiellen Abbaugeschwindigkeit angepasst ist. Daneben hat auch die Anordnung der Reaktoren bzw. Belebungsbecken (Reihen- oder Parallelschaltung) Einfluss auf die Reinigungseffizienz der Anlage.

Die im Rahmen des Projekts betrachteten Abwasserreinigungsanlagen erfüllen zwar die bei der Bestimmung des Benchmarking-Objekts festgelegte Voraussetzung einer zweistufigen anaerob/aeroben Anlage, unterscheiden sich jedoch teilweise in der Prozessführung.

5.4.2.1.1 Anaerob-Stufe

Alle Anaerob-Stufen der betrachteten Abwasserreinigungsanlagen umfassen eine Versäuerungsstufe und eine Methanstufe. In der Methanstufe werden, mit Ausnahme

von Papierfabrik C, ein bzw. mehrere parallel geschaltete UASB-Reaktoren eingesetzt. Papierfabrik C betreibt in der Methan-Stufe einen IC-Reaktor (Internal Circuit), der eine Weiterentwicklung des UASB-Reaktors ist.

Das Arbeitsvolumen der Versäuerungsstufen liegt zwischen 400 m³ (PF-B) und 1000 m³ (PF-F). Das Gesamtarbeitsvolumen der in den Methanstufen betriebenen Reaktoren liegt zwischen 465 m³ (IC-Reaktor von PF-C) und 3000 m³ (sechs UASB-Reaktoren in PF-D) (**Tab.5**).

Zur Berechnung der spezifischen CSB-Abbauleistung in der Methanisierungs-Stufe wird das Volumen der Methanreaktoren zugrundegelegt. Das Volumen der vorgeschalteten Versäuerungsstufe wird nicht berücksichtigt, ist aber im Einzelfall zur Dimensionierung hinsichtlich Verweilzeit und Reaktorumwälzung zu beachten. Der betrachtete CSB-Abbau bezieht sich auf Zulauf Versäuerung versus Ablauf Methanreaktor. Erfahrungsgemäß beträgt der CSB-Abbau in der Versäuerungsstufe 10 – 15%.

5.4.2.1.2 Aerob-Stufe

In den Aerob-Stufen der untersuchten Anlagen werden ein oder mehrere Belebungsbecken betrieben, denen sich Nachklärbecken anschließen. Das Gesamtarbeitsvolumen der Belebungsbecken (**Tab.6**) liegt bei den Anlagen zwischen 1.350 m³ (PF-B) und 8.000 m³ (PF-A).

Im Einzelnen sind die Aerob-Stufen wie folgt konzipiert:

Papierfabrik A: Vier Belebungsbecken unterschiedlicher Größe werden als Kaskade in Reihenschaltung betrieben. Alternativ ist auch eine Parallelschaltung bzw. Parallel- und Reihenschaltung der Belebungsbecken möglich. Den Belebungsbecken (Belüftung durch feinblasige Membranteller, Wendebelüfter und Tauchmotor-Rührwerk) schließt sich ein Nachklärbecken an (**Abb.4**).

Papierfabrik B: Ein Belebungsbecken (feinblasige Tiefenbelüftung) mit nachgeschaltetem Nachklärbecken (**Abb.5**).

Papierfabrik C: Ein Belebungsbecken (grobblasige Belüftung) wird als dreistufige Kaskade betrieben. Der Ablauf wird auf zwei parallel angeordnete Nachklärbecken verteilt (**Abb.6**).

Papierfabrik D: Zweistraßige Anlage mit je einem Belebungsbecken und einem Nachklärbecken. Die Belebungsbecken (Oberflächen-Kreiselsbelüfter, Mattenbelüftung) sind als dreistufige Kaskaden ausgelegt (**Abb.7**).

Papierfabrik E: Zweistufige Anlage mit Zwischenklärung und Nachklärbecken (Oberflächenbelüftung mit Rotoren). Das erste Belebungsbecken ist als dreistufige Kaskade ausgelegt. (**Abb.8**).

Papierfabrik F: Ein Belebungsbecken (Oberflächenbelüftung mit Mammutrotoren) mit nachgeschaltetem Nachklärbecken (**Abb.9**).

Tab.5: Auslegung der Anaerob-Stufen in den am Benchmarking beteiligten Papierfabriken

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Versäuerungsstufe							
Nutzvolumen	m ³	900	500	1.000	800	2.100	1.200
Füllgrad	%	65	80	50	85	34	87
Methanstufe							
Anzahl der Reaktoren		3	2	1	6	3	1
Reaktortyp		UASB	UASB	IC	UASB	UASB	UASB
Nutzvolumen/Reaktor	m ³	515	460	465	500	967	1940
Gesamtvolumen	m ³	1545	920	465	3.000	2.900	1940
Reaktorhöhe (Ablauf)	m	6,75	5	25	5,95	6,6	4

Tab.6: Auslegung der Aerob-Stufen in den am Benchmarking beteiligten Papierfabriken

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Belebungsbecken							
Anzahl		4	1	1	2	2	1
Betriebsform		Vierstufige Kaskade	Einstufig	Einstufige Kaskade	Zweistufig	Einstufig Parallel	Einstufig
Nutzvolumen	m ³	2.900	1.350	2.400	1.520	2.300	3.000
	m ³	1.900			1.415	2.300	
	m ³	900					
	m ³	2.300					
Gesamtvolumen	m ³	8.000	1.350	2.400	2.935	4.600	3.000
Nachklärbecken							
Anzahl		1	1	2	2	2	1
Nutzvolumen	m ³	1.000	1.270	500	881	1.630	1.600
	m ³			500	1.080	1.630	
Gesamtvolumen	m ³	1.000	1.270	1.000	1.960	3.260	1.600
Nutzfläche	m ²	440	410	200	441	480	700
	m ²			200	470	480	
Nutztiefe	M	2,1	3,1	k.A.	2,0	3,4	2,0
	M			k.A.	2,3	3,4	

k.A.: keine Angaben

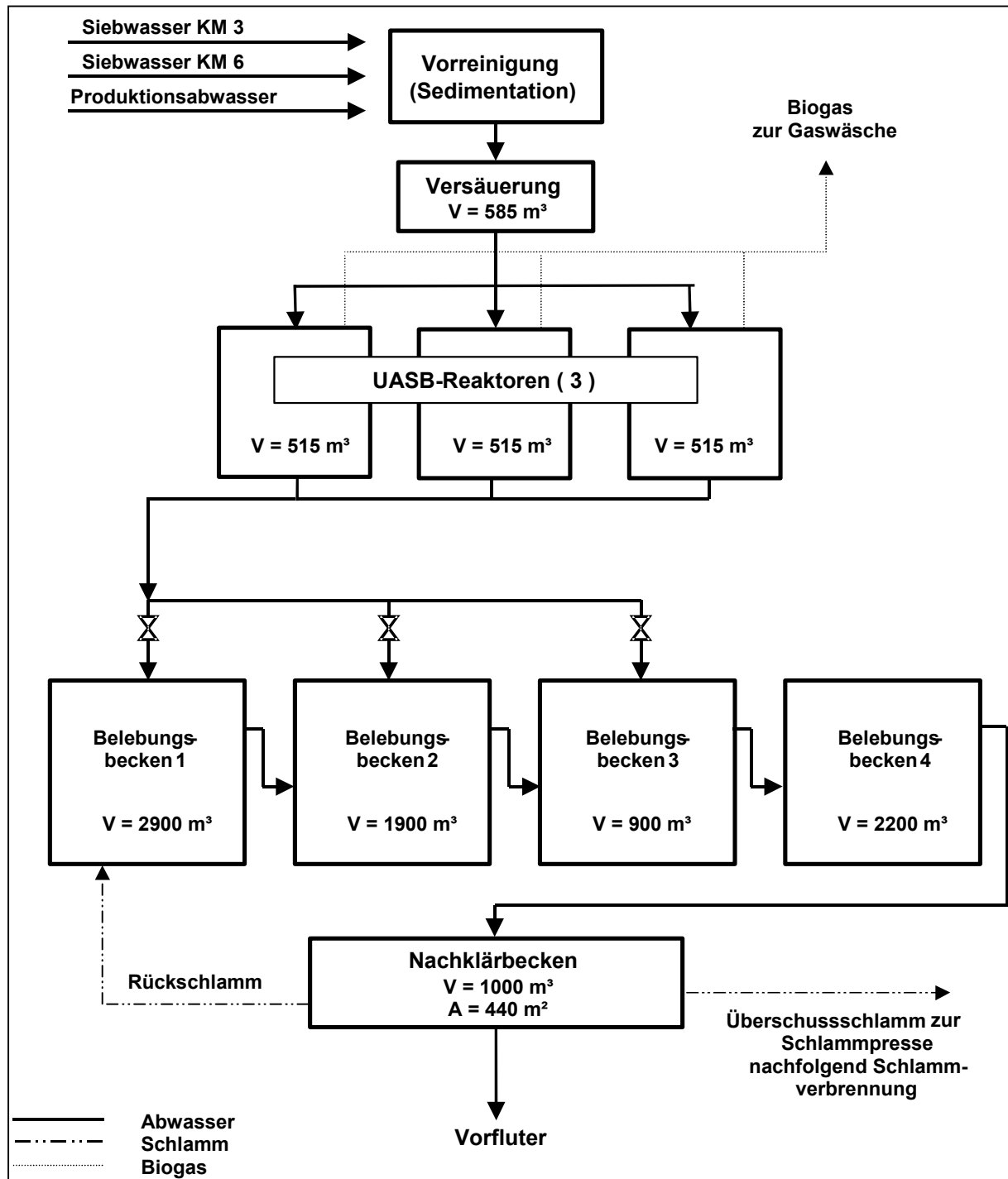


Abb.4: Abwasserreinigungsanlage der Papierfabrik A

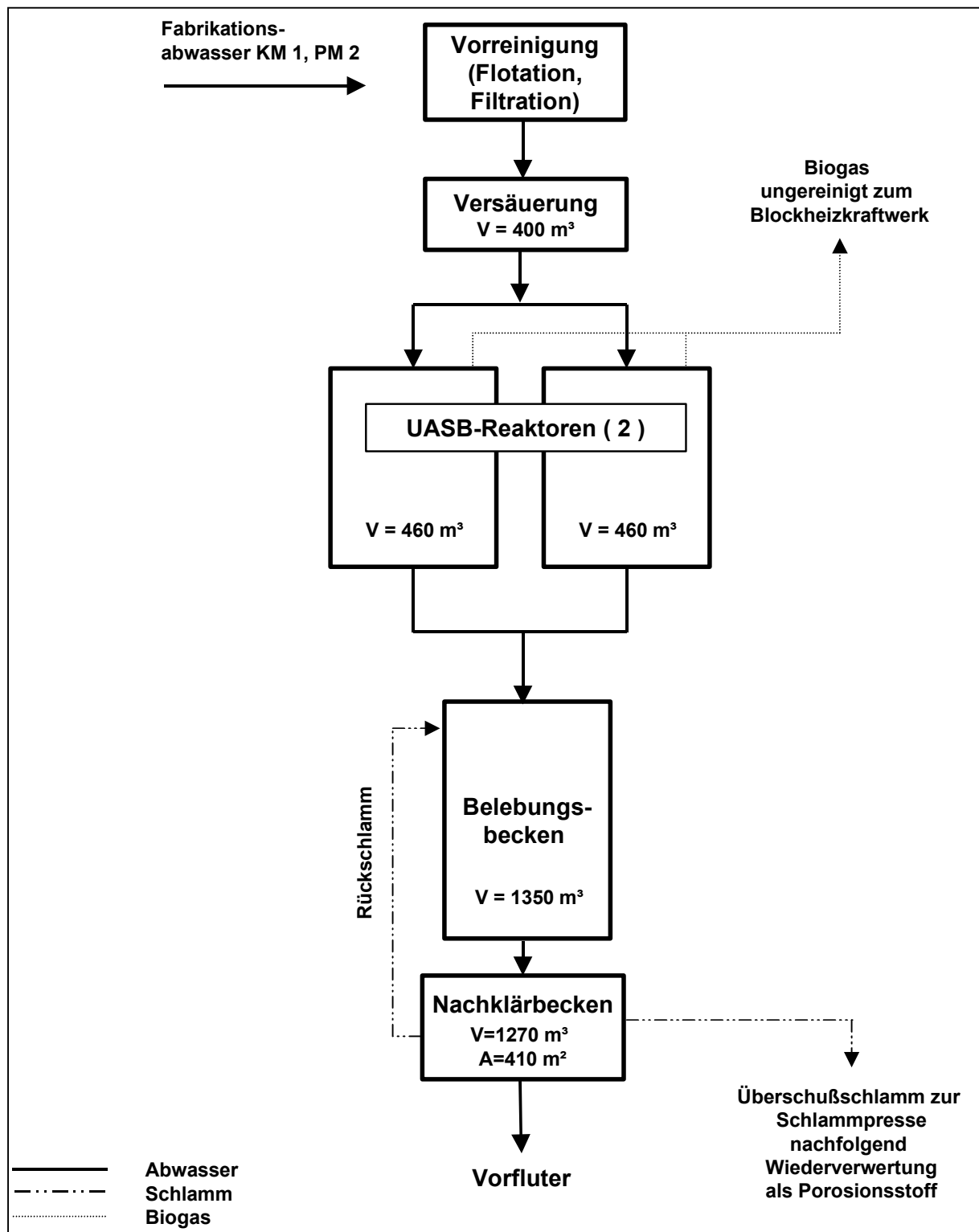


Abb.5: Abwasserreinigungsanlage der Papierfabrik B

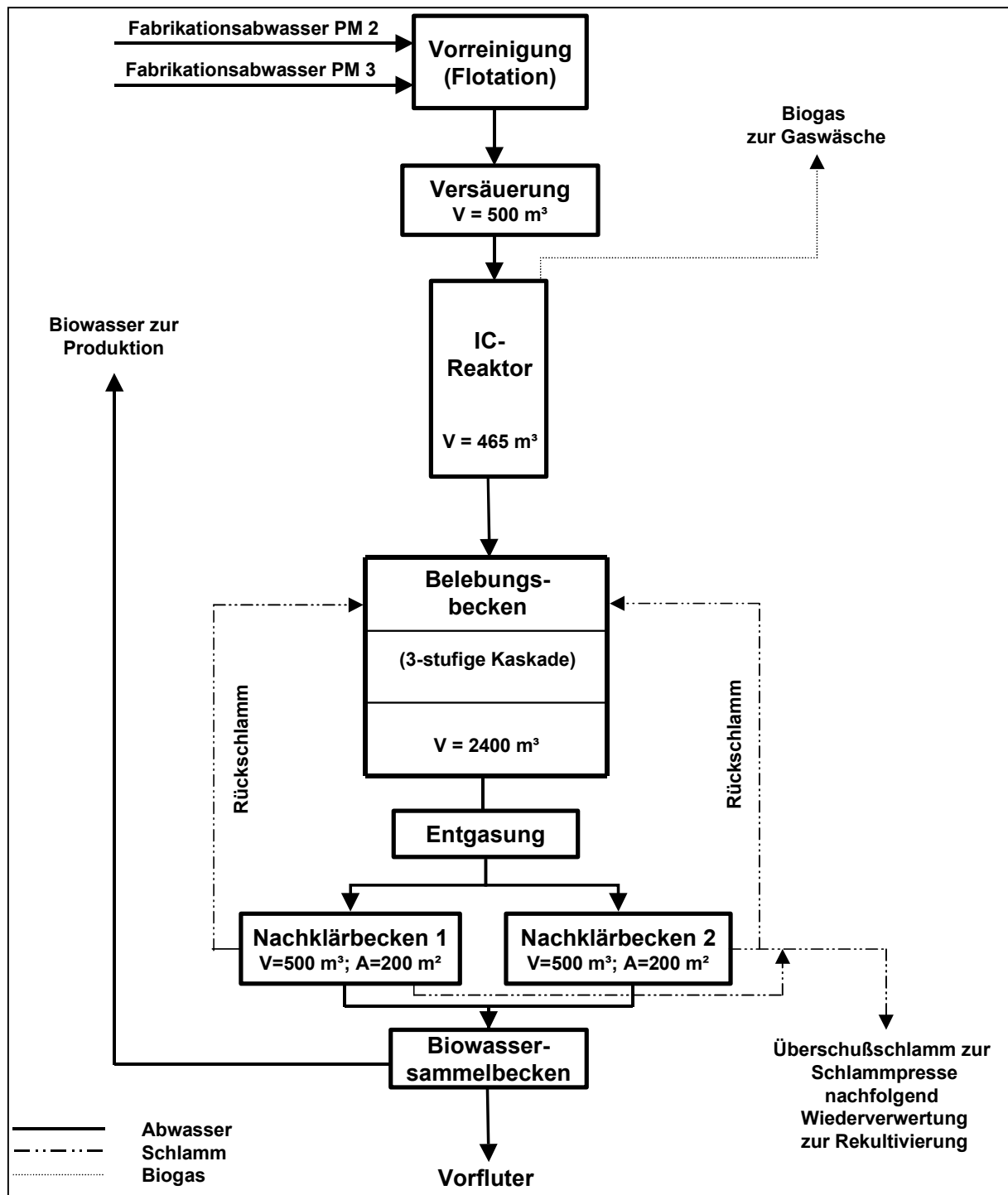


Abb.6: Abwasserreinigungsanlage der Papierfabrik C

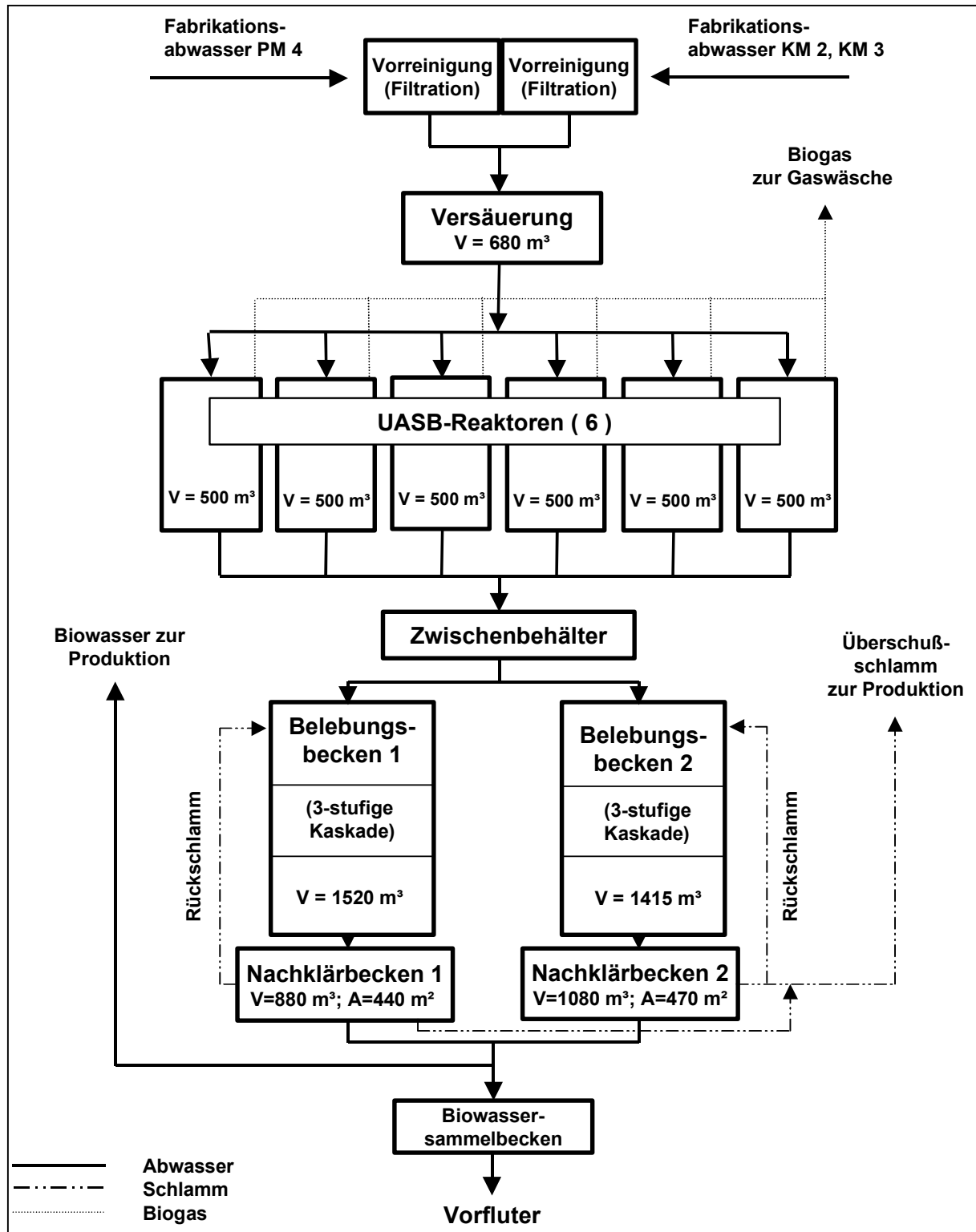


Abb.7: Abwasserreinigungsanlage der Papierfabrik D

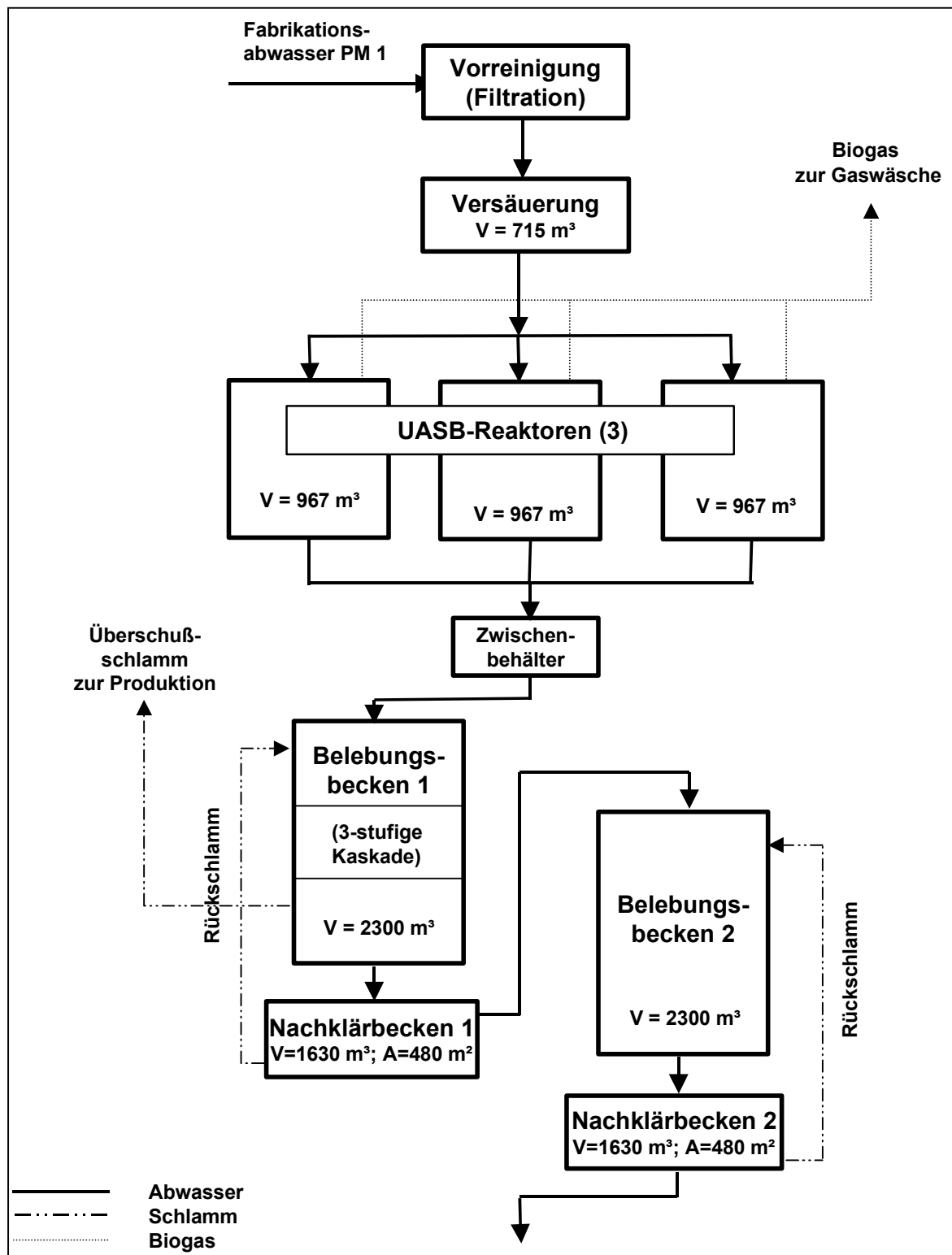


Abb.8: Abwasserreinigungsanlage der Papierfabrik E

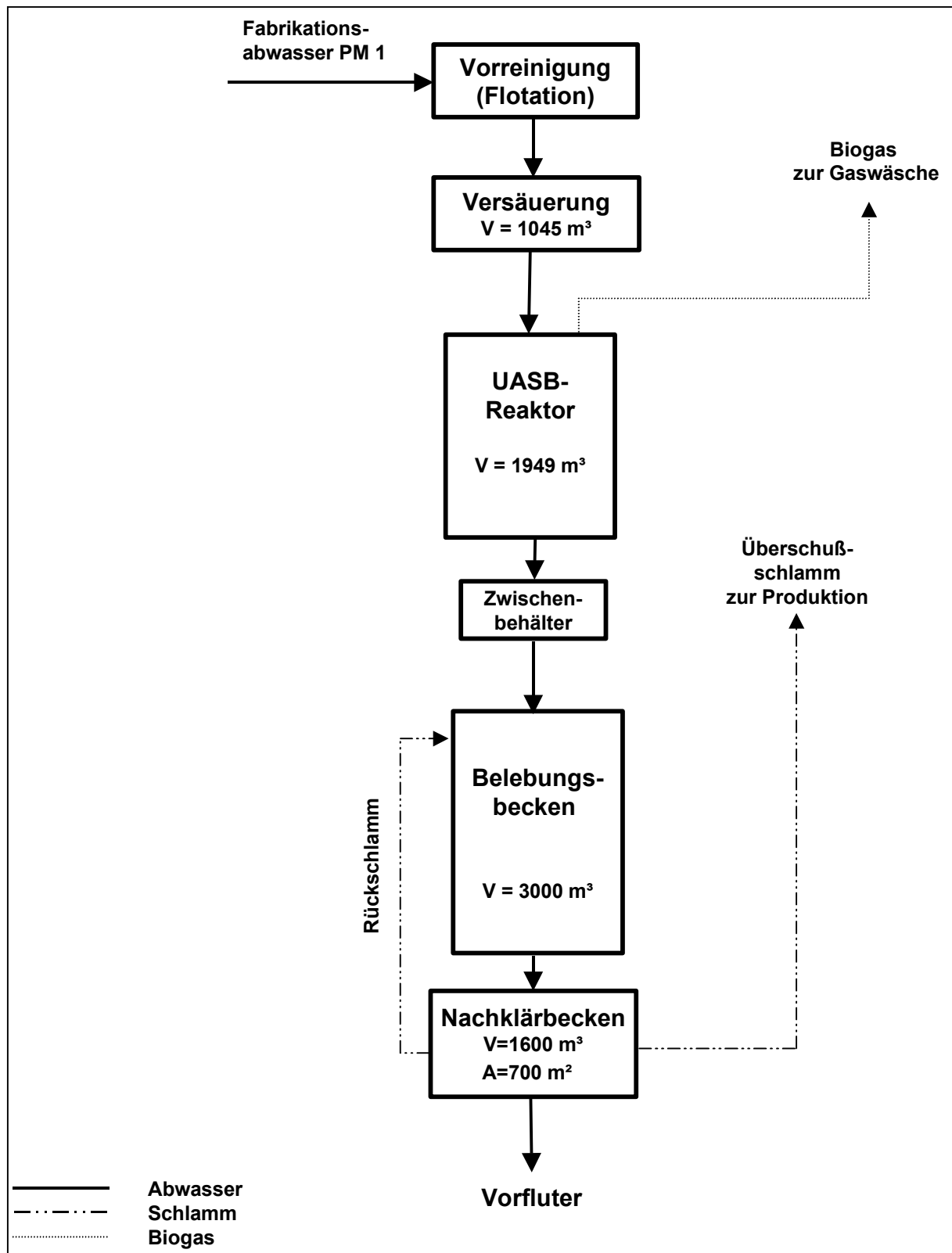


Abb.9: Abwasserreinigungsanlage der Papierfabrik F

5.4.2.2 Abwasserdurchsatz, -frachten und -parameter

Die CSB- bzw. BSB₅-Konzentrationen der Abwässer und die Abwasserdurchsätze sind in **Tab.7** als Mittelwerte des Jahres 2000 aufgeführt. Der Abwasserdurchsatz der Anlagen liegt bei den Benchmarking-Partnern zwischen 1.800 m³/d (PF-C) und 5.500 m³/d (PF-A).

Für die CSB- und BSB₅-Werte sind zusätzlich die Schwankungsbreiten bzw. der Minimum- und Maximum-Wert angegeben. Diese Information ist insofern wichtig, da, abhängig vom Sortenprogramm und dem entsprechenden Rohstoffeinsatz, größere Schwankungen der CSB-Belastung des Abwassers auftreten, die kurzfristig auch zu Leistungsschwankungen der ARA führen können.

Die CSB- und BSB₅-Konzentrationen im Zulauf zur ARA sind erwartungsgemäß bei den Papierfabriken mit den niedrigsten spez. Abwassermengen bzw. der engsten Kreislaufwasserführung am höchsten (PF-C: 6.500 mg/l; PF-D: 5.500 mg/l). Neben den Werten von CSB und BSB₅ sind in Tab.7 die CSB/BSB₅-Verhältnisse, die als Indikator für die biologische Abbaubarkeit der Abwasserinhaltsstoffe gelten, von den ARA-Zuläufen sowie den Abläufen der Anaerob-Stufe und der Aerob-Stufe aufgeführt. Im Zulauf zur ARA (Anaerob-Stufe) liegt das CSB/BSB₅-Verhältnis bei allen Papierfabriken bei ≤ 2 , was auf eine gute biologische Abbaubarkeit der Abwasserinhaltsstoffe hinweist. Im Zulauf zur Aerob-Stufe liegen die CSB/BSB₅-Verhältnisse in einem Bereich von 2,4 bis 3,8, was gleichbedeutend mit einer Verringerung der biologischen Abbaubarkeit der im Ablauf der Anaerobstufe verbliebenen Inhaltsstoffe ist. Daneben kann der CSB im Ablauf der Anaerob-Stufe durch H₂S bzw. Sulfid, das beim anaeroben Abbauprozess aus Sulfat gebildet wird, erhöht sein. Die im Ablauf der Nachklärung ermittelten CSB/BSB₅-Verhältnisse (9,9 bis 53,5) sind mit Skepsis zu betrachten, da die entsprechenden BSB₅-Werte im Bereich der analytischen Nachweisgrenze liegen. Es ist aber davon auszugehen, dass es sich beim CSB in den Abläufen der Nachklärung um biologisch schwer oder nicht abbaubaren Rest-CSB (refraktärer CSB) handelt.

Auf die Angabe weiterer Parameter, wie den Summenparameter AOX, den Gehalt an Calcium, Stickstoffverbindungen, Phosphate und Sulfate wurde in Tab.7 verzichtet. Diese Parameter werden durch den biologischen Abbau teilweise zwar verändert und/oder eliminiert bzw. beeinflussen den Abbauprozess, sind aber, mit Ausnahme der erforderlichen Restablaufkonzentrationen für Stickstoff (als N-NH₄) und Phosphor (als P-PO₄) aus der Nährstoffdosierung, kein unmittelbarer Maßstab für das Leistungspotential einer biologischen Abwasserreinigungsanlage. Sie wurden zudem nicht von allen Benchmarking-Partnern angegeben.

Tab.7: Abwasserdurchsatz, CSB-, BSB₅-Frachten, CSB-, BSB₅-Konzentrationen, CSB/BSB₅-Verhältnisse

Papierfabrik	Einheit	A	B	C	D	E	F
<u>Abwasserdurchsatz</u>	m³/d	5.511	2.500	1.800	4.000	4.117	3.850
<u>CSB-Fracht, ARA-Zul.</u>	kg/d	15.524	6.000	11.700	22.000	17.497	11.858
<u>BSB₅-Fracht, ARA-Zul.</u>	kg/d	8.382	3.168	5.940	14.000	11.112	7.739
<u>Zulauf Anaerob-Stufe</u>							
CSB	mg/l	2.817	2.400	6.500	5.500	4.250	3.080
CSB Min./Max.	mg/l	1.430/3.830	1.400/3.300	1.200/2.200	4.500/7.000	2.360/7.130	k.A.
BSB ₅	mg/l	1.521	1.267	3.300	3.500	2.699	2.010
BSB ₅ Min./Max.	mg/l	1.010/2.080	650/2.070	k.A.	2.500/4.500	600/6.900	k.A.
CSB/BSB ₅		1,85	1,89	1,97	1,57	1,57	1,53
<u>Ablauf Methanstufe = Zulauf Aerob-Stufe</u>							
CSB	mg/l	610	480	1600	850	796	765
CSB Min./Max.	mg/l	368/1.260	290/700	1.200/2.200	700/1.100	520/1.120	k.A.
BSB ₅	mg/l	160	175	570	350	275	269
BSB ₅ Min./Max.	mg/l	65/595	60/405	360/900	295/450	120/730	k.A.
CSB/BSB ₅		3,81	2,74	2,81	2,43	2,89	2,84
<u>Ablauf Nachklärbecken</u>							
CSB	mg/l	107	99	350	190	189	107
CSB Min./Max.	mg/l	72/160	60/206	200/400	160/250	134/259	k.A.
BSB ₅	mg/l	2	10	20	8	10	2,8
BSB ₅ Min./Max.	mg/l	1 / 6	2 / 31	10 / 30	6 / 17	2 / 38	k.A.
CSB/BSB ₅		53,5	9,9	17,5	23,8	18,9	35,7

k.A.: keine Angaben

5.4.2.3 Auszug aus den Genehmigungsbescheiden

Die in den Genehmigungsbescheiden der beteiligten Papierfabriken festgelegten Überwachungswerte für die Parameter CSB und BSB₅ sind in **Tab.8** zusammengestellt. Der Vergleich mit den entsprechenden Konzentrationswerten der Abläufe aus der Nachklärung in **Abb.10** zeigt, dass auch die angegebenen maximalen Konzentrationswerte zum Teil noch deutlich unterhalb der jeweils gültigen Überwachungswerte liegen. Lediglich Papierfabrik B überschreitet mit den als maximalen CSB-Wert angegebenen 206 mg/l den vorgegebenen Überwachungswert von 140 mg CSB/l.

Tab.8: CSB- und BSB₅-Überwachungswerte aus den Genehmigungsbescheiden der Benchmarking-Partner

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
CSB	mg/l	180	140	480	300	260	200
BSB ₅	mg/l	10	25	35	30	50	25

Die BSB-Überwachungswerte liegen zwischen 10 und 50 mg/l und werden in allen Anlagen gesichert eingehalten.

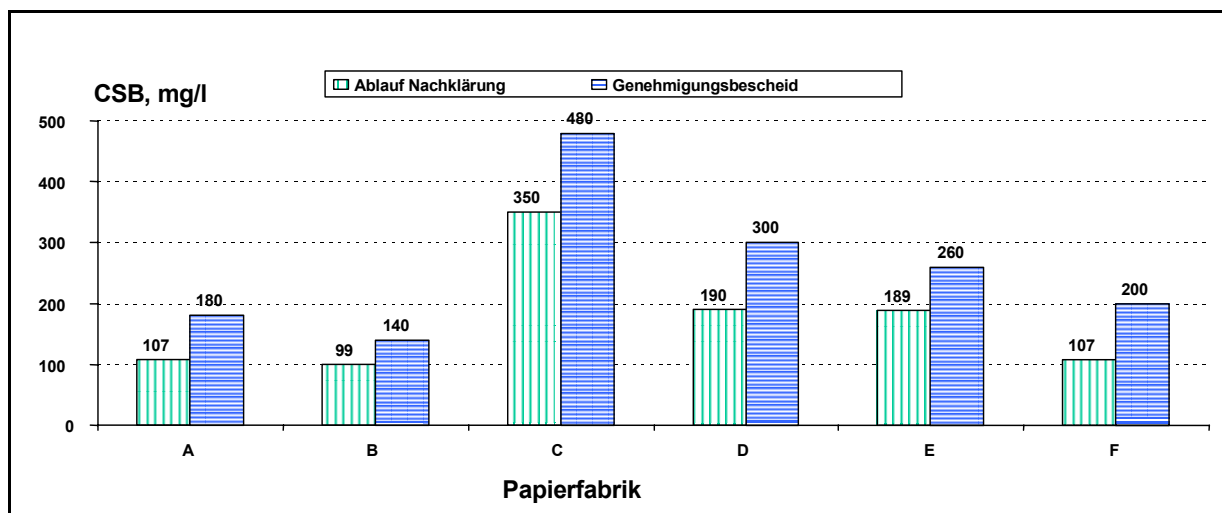


Abb.10: Vergleich der mittleren CSB-Werte im Ablauf der Nachklärung mit den CSB-Überwachungswerten aus dem Genehmigungsbescheid

5.4.2.4 Betriebskosten, Abwasserabgabe

Die jährlich für die Behandlung und Ableitung des Abwassers aufzubringenden Kosten setzen sich zusammen aus den Betriebskosten der Anlage, den Entsorgungskosten für den Überschussschlamm und der jährlich zu entrichtenden Abwasserabgabe.

Die Höhe der Kosten hängt dabei im Wesentlichen von der zu behandelnden Abwassermenge und der CSB- bzw. BSB- Fracht ab. Mit steigender Abwassermenge erhöht sich z. B. der Bedarf an Pumpenenergie. Mit zunehmender CSB- bzw. BSB-Fracht steigen die Belüftungs-(Energie) und Chemikalienkosten, da entsprechend mehr Energie zum Sauerstoffeintrag bereitgestellt werden muss und mehr Harnstoff und Phosphorsäure zudosiert werden müssen. Höhere Durchsatzmengen und CSB- bzw. BSB-Frachten sind aufgrund der resultierenden Anlagengröße im Allgemeinen mit höheren Personal- und Wartungskosten verbunden. Die CSB- bzw. BSB-Fracht wirkt sich zudem auf die Menge des produzierten Überschussschlammes bzw. auf die Kosten für die Schlammentwässerung- und -entsorgung aus. Kosten für die Schlamm Entsorgung entstehen nur in den Papierfabriken B und C. Bei den übrigen Papierfabriken entfallen die Schlamm Entsorgungskosten, da diese den gesamten Überschussschlamm in die Produktion zurückführen (Papierfabriken D, E, F) bzw. energetisch nutzen (Papierfabrik A).

Die in der **Tab.9** angegebenen Kosten entsprechen den jährlich anfallenden Betriebskosten für die **gesamte** biologische Abwasserreinigungsanlage. Eine getrennte Erfassung der Kosten für die Anaerob-Stufe bzw. die Aerob-Stufe war nicht möglich, da alle Benchmarking-Partner nicht in der Lage waren, die Gesamtkosten den verschiedenen Prozessstufen zuzuordnen. Um Einsparungspotenziale in den einzelnen Prozessstufen besser erkennen zu können, wäre es wünschenswert, wenn über die bisherige Praxis hinaus eine Zuordnung der Kosten auf die verschiedenen Prozessstufen erfolgen würde. Auf der anderen Seite haben manche Papierfabriken immer noch Schwierigkeiten, die auf die gesamte Abwasserreinigungsanlage bezogenen Kosten in Abgrenzung von anderen Produktionsbereichen anzugeben. Die Zuordnung der Kosten auf einzelne Prozessstufen der Abwasserreinigung würde speziell in diesen Werken einen erheblichen Mehraufwand im innerbetrieblichen Rechnungswesen und Controlling bedeuten.

Tab.9: Jährliche Betriebskosten und Abwasserabgabe der Benchmarking-Partner

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Chemikalien	€/a	208.009	38.680	97.174	111.078	109.777	45.194
Energie	€/a	178.500	81.807	69.150	174.494	109.330	26.970
Personal	€/a	140.605	51.129	102.258	61.355	56.934	55.578
Wartung	€/a	204.517	64.934	240.307	127.823	197.870	86.408
Schlamm- entsorgung	€/a	0	17.384	92.033	0	0	0
Summe Betriebs- kosten der Gesamtanlage	€/a	731.631	253.934	600.922	474.750	473.911	214.151
Abwasserabgabe	€/a	148.826	65.445	56.242	130.474	167.714	118.722
Summe Betriebs- kosten+ Abwasserabgabe	€/a	880.457	319.379	657.164	605.224	641.625	332.872

6. Berechnung von Kenngrößen und Kennzahlen

Im Benchmarking wird bei den auszuwertenden bzw. zu berechnenden Daten zwischen Kenngrößen und Kennzahlen unterschieden.

Kenngrößen sind technische und wirtschaftliche Größen, die die Leistungsanforderungen an das Benchmarking-Objekt, den technischen Aufwand (z.B. Auslegung der Anlage) oder den wirtschaftlichen Aufwand für das Benchmarking-Objekt beschreiben. Beispiele dafür sind die in die ARA eingeleitete Abwassermenge in m^3/a , der zum Betreiben der ARA notwendige Energiebedarf in kWh/a , das verfügbare Reaktorvolumen (m^3) oder der jährliche Kostenaufwand für die Abwasserbehandlung in €/a .

Kennzahlen werden rechnerisch auf Basis von Kenngrößen ermittelt. Sie werden in leistungsorientierte und kostenorientierte oder monetäre Kennzahlen unterteilt und stellen eine Beziehung her zwischen der vom Benchmarking-Objekt erbrachten Leistung und dem dazu erbrachten technischen bzw. wirtschaftlichen Aufwand.

Beispiele für leistungsorientierte Kennzahlen sind die CSB-Raumbelastung ($\text{kg CSB}/\text{m}^3\cdot\text{d}$) und die auf das Reaktorvolumen bezogene spezifische CSB-Abbaurrate ($\text{kg CSB}_{\text{elim}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$). Zu den kostenorientierten Kennzahlen gehören z. B. die auf die eliminierte CSB-Fracht bezogenen spez. Betriebskosten ($\text{€/kg CSB}_{\text{elim}}$) oder die auf Bruttoproduktion bezogenen spez. Betriebskosten (€/t). Die letztgenannte Kennzahl beziffert die Kosten, mit denen jede Tonne produziertes Papier durch die Abwasserbehandlung belastet wird.

6.1 Leistungsorientierte technische Kenngrößen und Kennzahlen

Zur Beurteilung des Leistungsniveaus von biologischen Abwasserreinigungsanlagen, deren Ziel die Reduzierung bzw. Eliminierung organischer Verbindungen im Abwasser ist, werden in diesem Projekt hauptsächlich CSB-bezogene Kenngrößen und Kennzahlen herangezogen. Diese Kenngrößen bzw. Kennzahlen lassen sich aus der Abwassermenge, der CSB-Konzentration des Abwassers und den Auslegungsdaten der Prozessstufen errechnen. Im Einzelnen sind das die eingeleitete CSB-Fracht ($\text{kg CSB}/\text{d}$), die CSB-Raumbelastung, $B_R\text{-CSB}$ ($\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$), der CSB-Abbaugrad (%) und die auf das Reaktorvolumen bezogene spez. CSB-Abbaurrate ($\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$). Neben dem CSB-Abbaugrad wird zum Vergleich der technischen Leistung vor allem die spez. CSB-Abbaurrate herangezogen, die ausdrückt, welche CSB-Fracht pro Volumeneinheit des biologisch aktiven Reaktionsvolumens (Methanreaktor, Belebungsbecken) eliminiert wird. Häufig wird die spez. CSB-Abbaurrate auch als CSB-Raumumsatzleistung bezeichnet. Anhand dieser Kennzahlen kann sowohl die Leis-

tungsfähigkeit der einzelnen Prozessstufen als auch die Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage bewertet werden.

Weitere wichtige technische Kenngrößen und Kennzahlen sind die hydraulische Verweilzeit (h), die auf Kilogramm eliminierten CSB bezogene spez. Methanrate ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg CSB}_{\text{elim}}$), die CSB- bzw. BSB-Schlammbelastung (kg CSB/kg OTS , kg BSB/kg OTS) sowie die spez. Biomasseproduktion ($\text{kg OTS/kg BSB}_{5\text{elim}}$). Diese Kenngrößen und Kennzahlen ermöglichen detailliertere Aussagen vor allem über den Verlauf des biologischen Abbauprozesses. Auf den BSB bezogene Kenngrößen und Kennzahlen sind insbesondere zur Bewertung des biologischen Abbaus in der Aerobstufe üblich. Bei der anaeroben Abwasserreinigung werden in der Regel CSB-bezogene Kenngrößen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit herangezogen. Um die Gesamtanlagen bewerten zu können, werden in diesem Projekt fast ausschließlich CSB-bezogene Kenngrößen und Kennzahlen verwendet.

6.1.1 Technische Kenngrößen und Kennzahlen der Anaerob-Stufe

Der Abwasserdurchsatz in den Abwasserreinigungsanlagen der am Benchmarking beteiligten Papierfabriken bewegt sich zwischen $1.800 \text{ m}^3/\text{d}$ (PF-C) und $5.500 \text{ m}^3/\text{d}$ (PF-A). Die spez. CSB-Frachten des Abwassers liegen zwischen $2,4 \text{ kg/m}^3$ (PF-B) und $6,50 \text{ kg/m}^3$ (PF-C). Die täglich in die Anaerob-Stufe eingeleiteten CSB-Frachten betragen zwischen 6.000 kg/d (PF-B) und 22.000 kg/d (PF-D).

Die Leistungspotenzial der Methanstufe hängt bei gegebener Abwasserqualität u.a. auch vom verwendeten Reaktorsystem ab. Zur Behandlung von höherbelasteten Abwässern aus der Papierindustrie werden vorzugsweise Schlammbett-Reaktoren nach dem UASB-Prinzip eingesetzt, da diese Reaktoren auch bei feststoffhaltigen Abwässern und Abwässern mit hohem Kalkfällungspotenzial eine stabile Abbauleistung und einen weitgehend störungsfreien Betrieb gewährleisten. In den Kläranlagen der Benchmarking-Partner werden in der Methanstufe UASB-Reaktoren betrieben. Eine Ausnahme stellt Papierfabrik C dar, wo in der Methanstufe ein IC-Reaktor eingesetzt wird.

Der IC-Reaktor arbeitet wie die UASB-Reaktoren mit einem Schlammbett aus pelletisierter Biomasse. Durch eine reaktorinterne Rezirkulation des Abwassers in Verbindung mit einer geänderten Reaktorgeometrie (größere Bauhöhe, geringere Querschnittsfläche) wird jedoch eine deutlich höhere Abbauleistung erzielt. Hier stellt sich die Frage, ob ein direkter Leistungsvergleich mit den konventionellen UASB-Reaktoren, die von den übrigen Papierfabriken als Methanreaktoren betrieben werden, im Rahmen eines Benchmarking überhaupt zulässig ist, da nach Auffassung

einiger Experten beim Benchmarking-Verfahren nur Prozesse und Systeme mit möglichst ähnlichem Leistungspotenzial verglichen bzw. bewertet werden sollten.

Mit dem IC-Reaktor von Papierfabrik C wird bei einer CSB-Raumbelastung von $25,2 \text{ kg/m}^3\text{d}$ ein CSB-Abbaugrad von 75,4% erzielt, woraus eine spez. CSB-Abbaurrate von $19 \text{ kg/m}^3\text{d}$ resultiert. Im Vergleich dazu liegen die CSB-Raumbelastungen bei den konventionellen UASB-Reaktoren zwischen $6 \text{ kg/m}^3\text{d}$ und $10 \text{ kg/m}^3\text{d}$ mit CSB-Abbaugraden zwischen 75% und 84% (**Abb.11**).

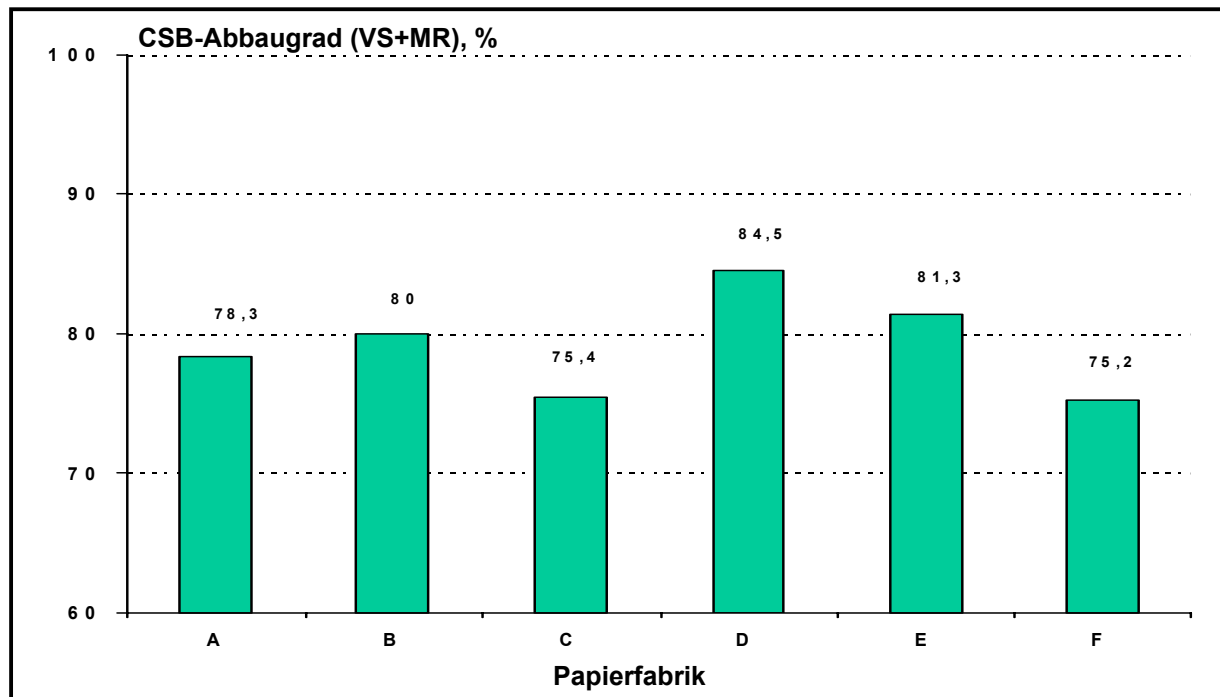


Abb.11: CSB-Abbaugrad in der Anaerob-Stufe

Bei den konventionellen UASB-Reaktoren erzielt Papierfabrik A mit einer spez. CSB-Abbaurrate von $7,9 \text{ kg/m}^3\text{d}$ die höchste Abbauleistung und liegt damit ca. 25% über der spez. CSB-Abbaurrate von Papierfabrik D ($6,2 \text{ kg/m}^3\text{d}$) bzw. ca. 35% über den spez. CSB-Abbauraten der übrigen Benchmarking-Partner (PF-B: $5,2 \text{ kg/m}^3\text{d}$; PF-E: $4,9 \text{ kg/m}^3\text{d}$; PF-F: $4,6 \text{ kg/m}^3\text{d}$) (**Abb.12**).

Die hydraulische Verweilzeit (h) in den Anaerob-Reaktoren wird durch den Quotienten von Reaktorvolumen (m^3) und Abwasserdurchsatz (m^3/h) bestimmt. Im IC-Reaktor beträgt die hydraulische Verweilzeit 6,2 h. Bei den konventionellen UASB-Reaktoren wurden hydraulische Verweilzeiten zwischen 6,7 h (drei parallel beschickte UASB-Reaktoren von PF-A) und 18 h (sechs parallel beschickte UASB-Reaktoren von PF-D, ermittelt).

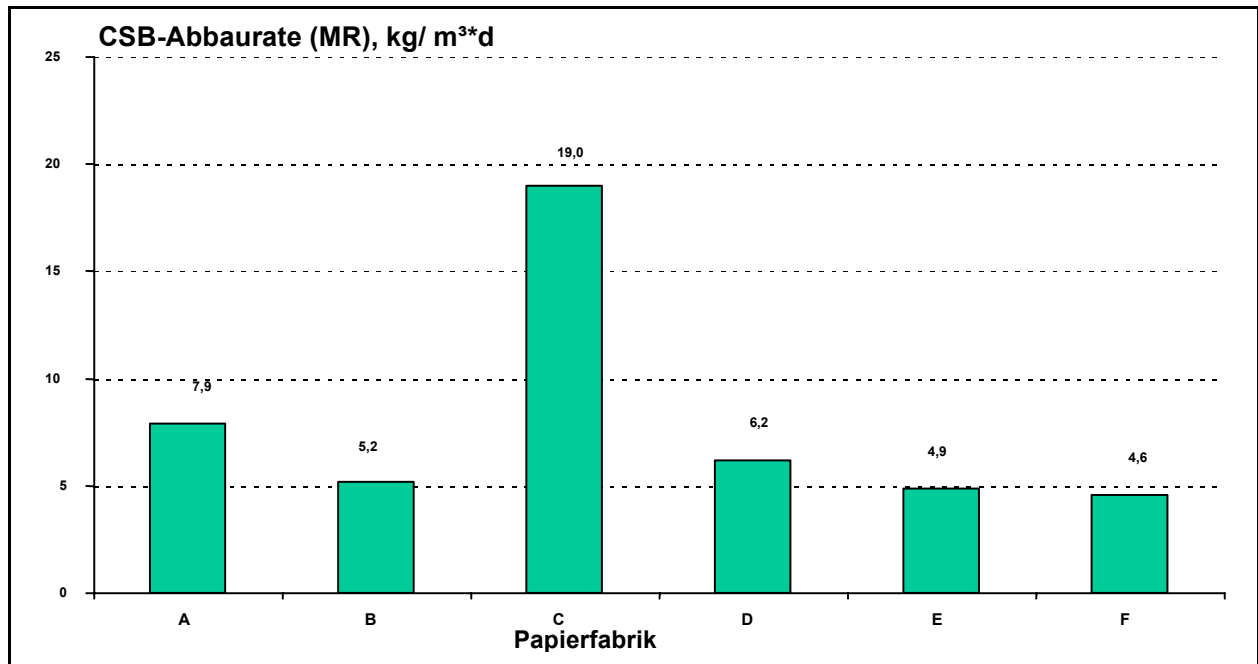


Abb.12: Spez. CSB-Abbaureate in der Anaerob-Stufe

Die spez. Methanrate ist die Methanmenge, die beim anaeroben Abbau von 1 kg CSB gebildet wird. Sie bewegt sich zwischen 0,248 m³ CH₄/kg CSB_{elim} (PF-E) und 0,477 m³ CH₄/kg CSB_{elim} (PF-A) entsprechend einer Energieausbeute von 2.482 kWh bzw. 4.775 kWh pro kg eliminiertem CSB. Unterschiede bei den spez. Methanraten können auftreten, da die Methanmenge, die beim anaeroben Abbau organischer Stoffe gebildet wird, vom chemischen Charakter bzw. der Oxidationsstufe der abzubauenen Kohlenstoffverbindung abhängig ist. Buswell hat eine Formel entwickelt, die diesen Zusammenhang berücksichtigt, und nach der sich die theoretisch mögliche Methanmenge, die beim anaeroben Abbau organischer Verbindungen gewonnen werden kann, berechnen lässt.

Abgesehen von der Verschiedenheit der Abwasserinhaltsstoffe, die zu unterschiedlichen Methanraten führen kann, muss jedoch auch der Fehler in Betracht gezogen werden, mit der die Berechnung der spez. Methanrate behaftet ist. Dieser Fehler summiert sich aus den Fehlern der Analysen und Messungen, die für die Bestimmung der spez. Methanrate erforderlich sind. (Analyse der CSB-Konzentration des Abwassers, Messung des Abwasserdurchsatzes, Messung der Biogasmenge, Messung des Methananteils im Biogas).

In **Tab.10** sind die für die Anaerob-Stufe ermittelten technischen Kennzahlen zusammengefasst.

Tab.10: Technische Kennzahlen der Anaerob-Stufe

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Abwasserdurchsatz	m ³ /d	5.511	2.500	1.800	4.000	4.117	3.850
CSB-Fracht im Abwasser	kg CSB/m ³	2,82	2,40	6,50	5,50	4,25	3,08
CSB-Fracht, Zulauf	kg/d	15.524	6.000	11.700	22.000	17.497	11.858
CSB-Fracht, Ablauf	kg/d	3.362	1.200	2.880	3.400	3.277	2.945
Hydraulische Verweilzeit	h	6,73	8,83	6,20	18,00	16,91	12,09
CSB-Raumbelastung	kg/m ³ *d	10,0	6,5	25,2	7,3	6,0	6,1
Spez. CSB-Abbaurrate	kg/m ³ *d	7,9	5,2	19,0	6,2	4,9	4,6
CSB-Abbaugrad	%	78,3	80,0	75,4	84,5	81,3	75,2
spez. Methanrate	m ³ /kg CSB _{elim}	0,477	0,285	0,263	0,406	0,248	0,458
spez. Energiegewinn	kWh/ t CSB _{elim}	4.775	2.853	2.633	4.069	2.482	4.581

6.1.2 Technische Kenngrößen und Kennzahlen der Aerob-Stufe

Die von der Anaerob-Stufe in die Aerob-Stufe geleiteten CSB-Frachten liegen zwischen 1.800 kg/d (PF-B) und 3.400 kg/d (PF-D). Davon werden zwischen 76% (PF-E) und 86% (PF-F) biologisch abgebaut (**Abb.13**). Aus den CSB-Frachten ergeben sich, abhängig vom Arbeitsvolumen der entsprechenden Belebungsstufe CSB-Raumbelastungen von 0,42 kg/m³*d (PF-A) bis 1,2 kg/m³*d (PF-C).

Die große Streuung der CSB-Raumbelastungen ergibt sich aus der im Vergleich zu den eingeleiteten CSB-Frachten sehr unterschiedlichen Dimensionierung der einzelnen Belebungsstufen. Während die CSB-Fracht mit Ausnahme von PF-B mit 1.200 kg CSB/d in einem relativ engen Bereich zwischen 2.900 kg CSB/d und 3.400 kg CSB/d liegt (**Tab.10**) variiert, das verfügbare Arbeitsvolumen der Belebungsstufen zwischen 2.400 m³ und 8.000 m³.

Zur Bewertung der Abbauleistung der Aerob-Stufen wird, wie bei der Anaerob-Stufe, die spez. CSB-Abbaurrate herangezogen, die sich aus der in die Aerob-Stufe eingeleiteten CSB-Fracht, dem Volumen der Belebungsbecken und dem CSB-Abbaugrad errechnet. Die niedrigste spez. CSB-Abbaurrate wurde mit 0,35 kg/m³*d bei Papierfabrik A ermittelt, während die Abbauraten der anderen Teilnehmer im Bereich von 0,54 kg/m³*d bis 0,94 kg/m³*d angesiedelt sind (**Abb.14**).

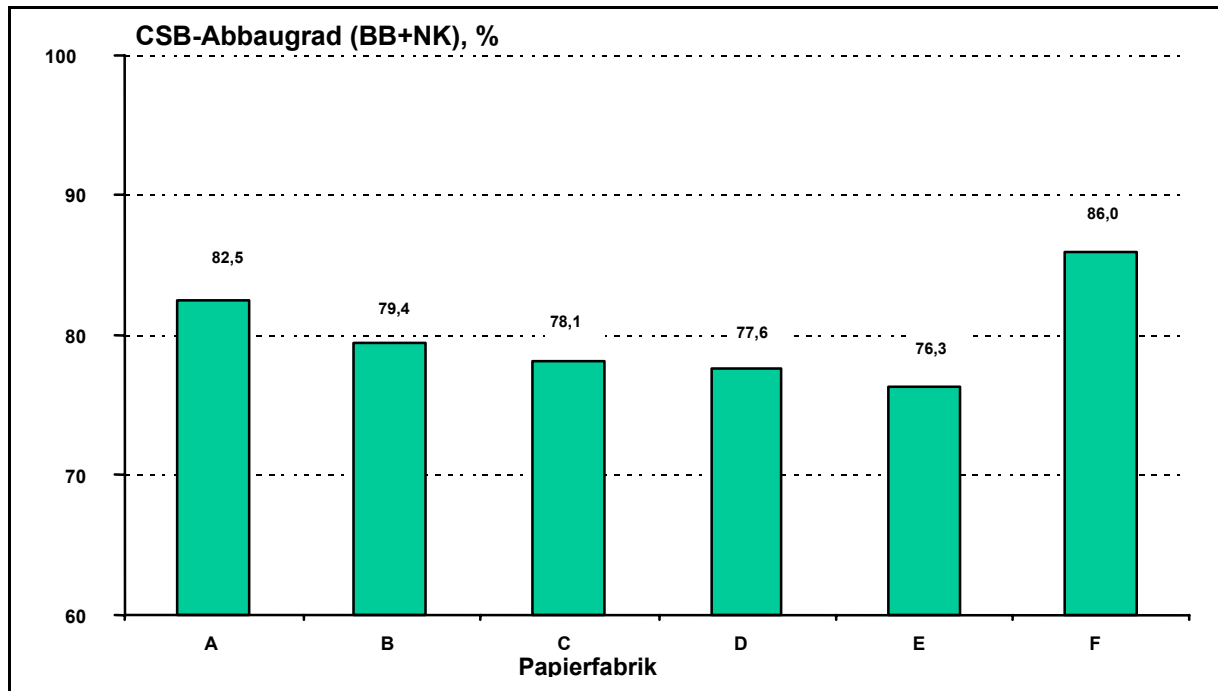


Abb.13: CSB-Abbaugrad in der Aerob-Stufe

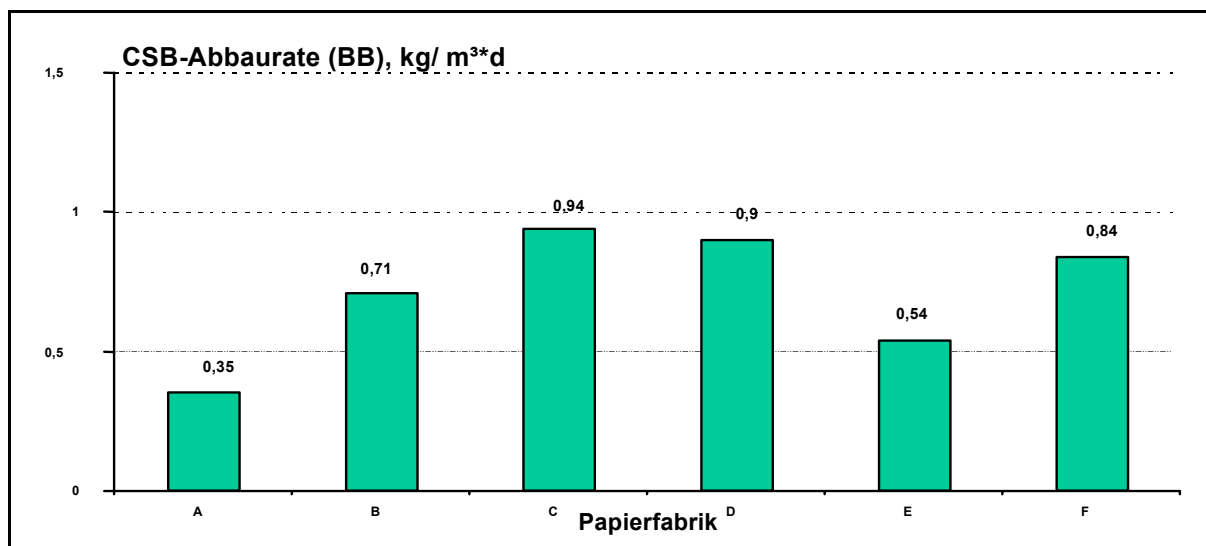


Abb.14: Spez. CSB-Abbaureate in der Aerob-Stufe

Die hydraulischen Verweilzeiten in den Belebungsstufen zeigen aufgrund der unterschiedlichen Dimensionierung der Belebungsbecken deutliche Unterschiede. Mit der kürzesten hydraulischen Verweilzeit arbeitet die Belebungsstufe von PF-B (13 h), während Papierfabrik A mit 34,8 h die längste hydraulische Verweilzeit aufweist. Einen Überblick der für die Aerob-Stufe relevanten Kennzahlen gibt **Tab.11**.

Tab.11: Technische Kennzahlen der Aerob-Stufe

Papierfabrik	Einheit	A	B	C	D	E	F
Abwasserdurchsatz	m ³ /d	5.511	2.500	1.800	4.000	4.117	3.850
CSB-Fracht im Zulauf Belebungsbecken	kg/d	3.362	1.200	2.880	3.400	3.277	2.945
CSB-Fracht im Ablauf Nachklärbecken	kg/d	590	248	630	760	778	412
CSB-Raumbelastung	kg/m ³ *d	0,42	0,89	1,20	1,16	0,71	0,98
Spez. CSB-Abbaureate (Belebungsbecken)	kg/m ³ *d	0,35	0,71	0,94	0,90	0,54	0,84
CSB-Abbaugrad	%	82,5	79,4	78,1	77,7	76,3	86,0
BSB ₅ -Fracht im Zulauf Belebungsbecken	kg/d	882	438	1.026	1.400	1.132	1.036
BSB ₅ -Raumbelastung	kg/m ³ *d	0,11	0,32	0,43	0,48	0,25	0,35
Spez. BSB ₅ -Abbaureate (BB)	kg/m ³ *d	0,11	0,31	0,41	0,47	0,24	0,34
BSB ₅ -Abbaugrad	%	98,8	94,3	96,5	97,7	96,4	99,0
Hydraul. Verweilzeit (Belebungsbecken)	h	34,8	13,0	32,0	17,6	26,8	18,7

Die CSB- bzw. BSB-Schlammbelastungen in der Belebungsstufe, die ebenfalls eine wichtige Größe für die Beurteilung der Abbauleistung sind, konnte nicht ermittelt werden, da die Papierfabriken zur Biomassekonzentration in den einzelnen Belebungsbecken keine oder teilweise unvollständige Angaben machten.

6.1.3 Technische Kenngrößen und Kennzahlen der Gesamtanlage

Abhängig von der Produktionsmenge und der spez. Abwassermenge liegen bei den Benchmarking-Partnern die Abwassermengen, die täglich in die ARA eingeleitet werden zwischen 1.800 m³/d (PF-C) und 5.511 m³/d (PF-A), wobei CSB-Frachten im Bereich von 6.000 kg CSB/d (PF-B) und 22.000 kg CSB/d (PF-D) anfallen. Der CSB-Abbaugrad, nach Anaerob-Stufe und Aerob-Stufe beträgt insgesamt 95% bis 97%. (Tab.12).

Aus der in die ARA eingeleiteten CSB-Fracht (kg/d) und den Volumina von Methanreaktoren und Belebungsbecken wurde für die Gesamtanlage eine CSB-Raumbelastung berechnet, wobei Werte zwischen 1,6 kg/m³*d (PF-A) und 4,1 kg/m³*d (PF-C) ermittelt wurden (**Abb.15**). Unter Berücksichtigung des entspre-

chenden CSB-Abbaugrads ergeben sich spez. CSB-Abbauraten im Bereich von 1,56 kg/m³*d (PF-A) und 3,86 kg/m³*d (PF-C).

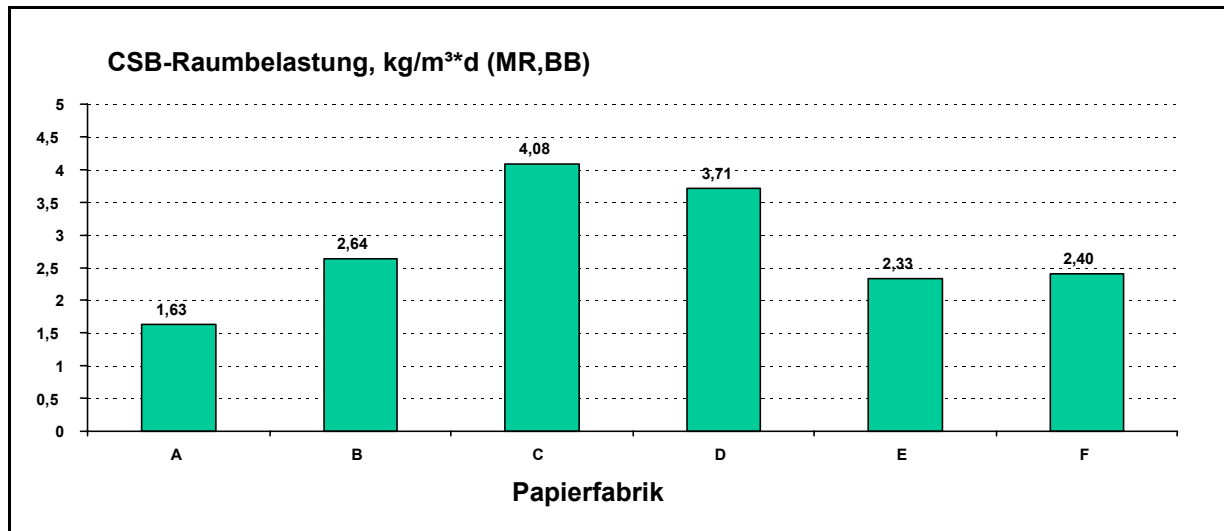


Abb.15: CSB-Raumbelastung, bezogen auf das Gesamtvolumen von Methanreaktoren und Belebungsbecken

Insgesamt werden 94,5% - 96,5% der CSB-Fracht abgebaut, wobei sich spez. Abbauraten zwischen 1,56 kg CSB /m³d (PF-A) und 3,86 kg CSB/m³d (PF-C) ergeben (**Abb.16**).

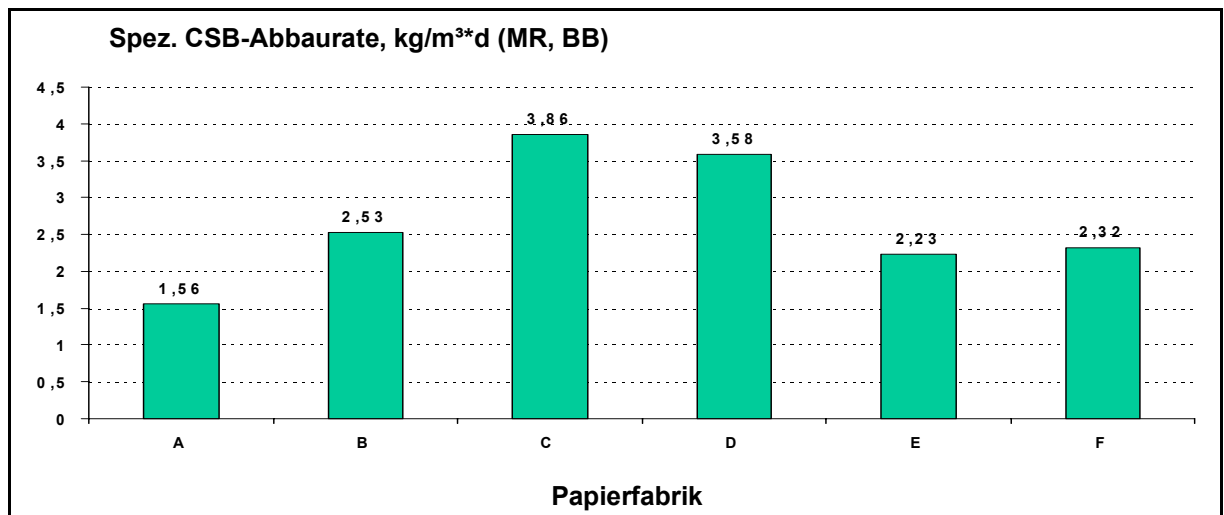


Abb.16: Spez. CSB-Abbauraten, bezogen auf das Gesamtvolumen von Methanreaktoren und Belebungsbecken

Abb.17 dokumentiert die hydraulische Verweilzeit (h) in der Gesamtanlage. Zu ihrer Berechnung wurde das Volumen aller Prozessstufen der Anlage (Versäuerung, Me-

thanreaktor, Belebungsbecken, Nachklärbecken) aufsummiert und zum stündlichen Abwasserdurchsatz in Beziehung gesetzt. Die hydraulischen Verweilzeiten variieren im Bereich von 38 h ((PF-B) bis 67 h (PF-E).

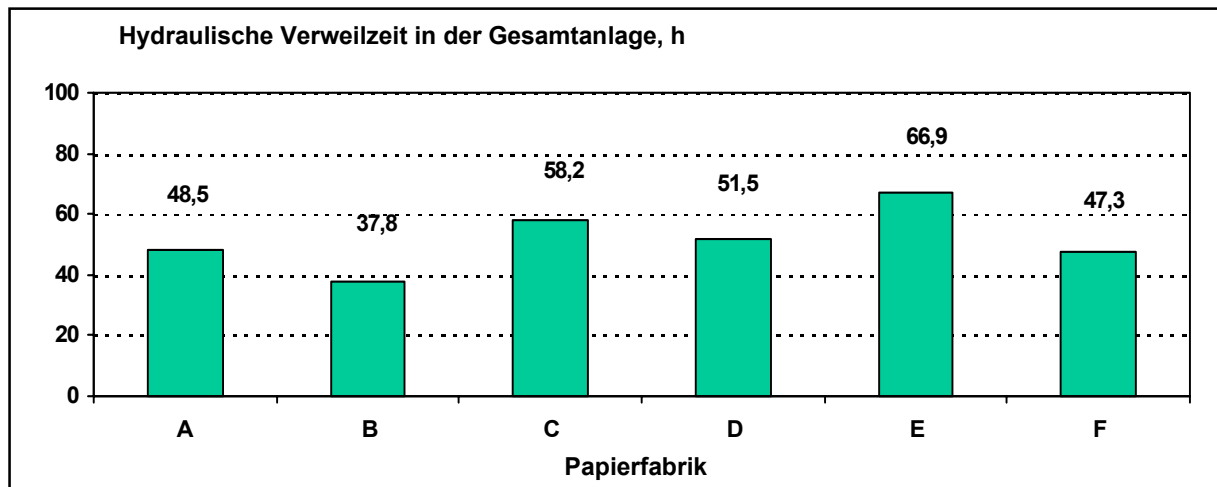


Abb.17: Hydraulische Verweilzeit in der Gesamtanlage

Eine wichtige Kennzahl im Hinblick auf die CSB-Belastung des ungereinigten Abwassers ist die auf die Bruttoproduktion bezogene spez. CSB-Fracht, die in unmittelbarem Zusammenhang mit dem CSB-Eintrag durch die eingesetzten Rohstoffe und chemischen Additive steht. Für die untersuchten Papierfabriken ergeben sich dabei Werte zwischen 14,5 kg CSB/t Produkt (PF-A) und 21,7 kg CSB/t Produkt (PF-D, PF-E) (**Abb.18**). Die im Vergleich zu den anderen Benchmarking-Partnern höheren produktionsbezogenen spez. CSB-Frachten der Papierfabriken D und E sind u.a. auf den hohen Störkeeinsatz bei der Produktion zurückzuführen (vergl. Tab.3).

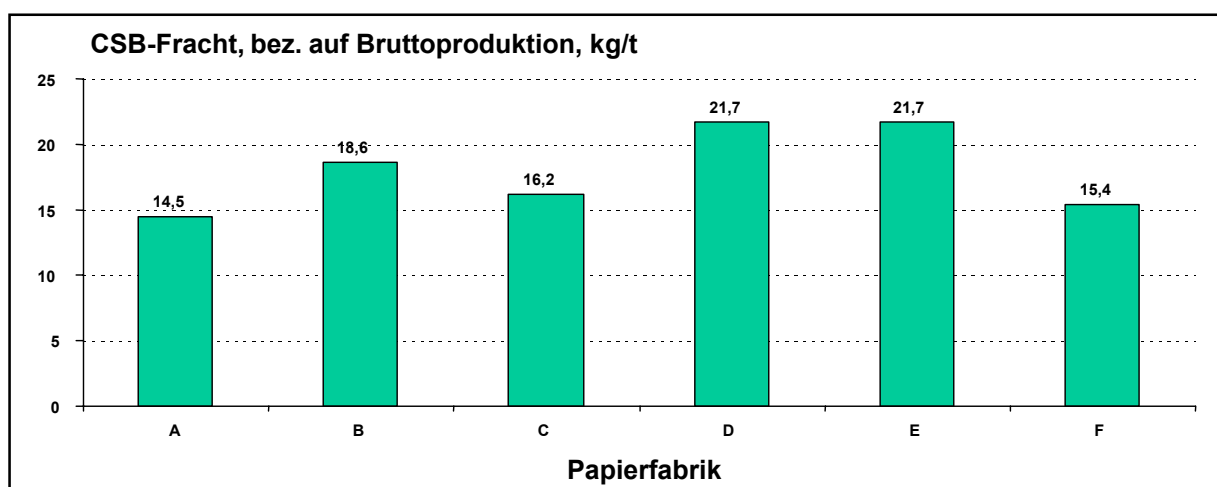


Abb.18: CSB-Fracht, bezogen auf Bruttoproduktion

Ein in der kommunalen Abwasserbehandlung im Zusammenhang mit der Anlagendimensionierung häufig verwandter Begriff ist die sogenannte spez. Volumenverfügbarkeit. Sie drückt das verfügbare Anlagenvolumen bezogen auf die eingeleitete CSB-Fracht aus. Bei kommunalen Kläranlagen wird dabei das Volumen der Belebungsstufe und des Nachklärbeckens in die Berechnung einbezogen.

Für die im Rahmen des Benchmarking untersuchten Abwasserreinigungsanlagen wurde die Volumenverfügbarkeit berechnet, um die Dimensionierung der einzelnen Anlagen vergleichen zu können. Zur Berechnung wurden nur die Volumina der Methanreaktoren und der Belebungsbecken, d.h. die Volumina der biologisch aktiven Reaktorräume, herangezogen.

Gemäß **Abb.19** ist die ARA der Papierfabrik A mit $0,62 \text{ m}^3\text{d/kg}$ CSB am großzügigsten bemessen, während bei Papierfabrik C mit $0,25 \text{ m}^3\text{d/kg}$ CSB weniger als die Hälfte dieses Volumens einer gegebenen CSB-Fracht für die biologische Behandlung zur Verfügung steht.

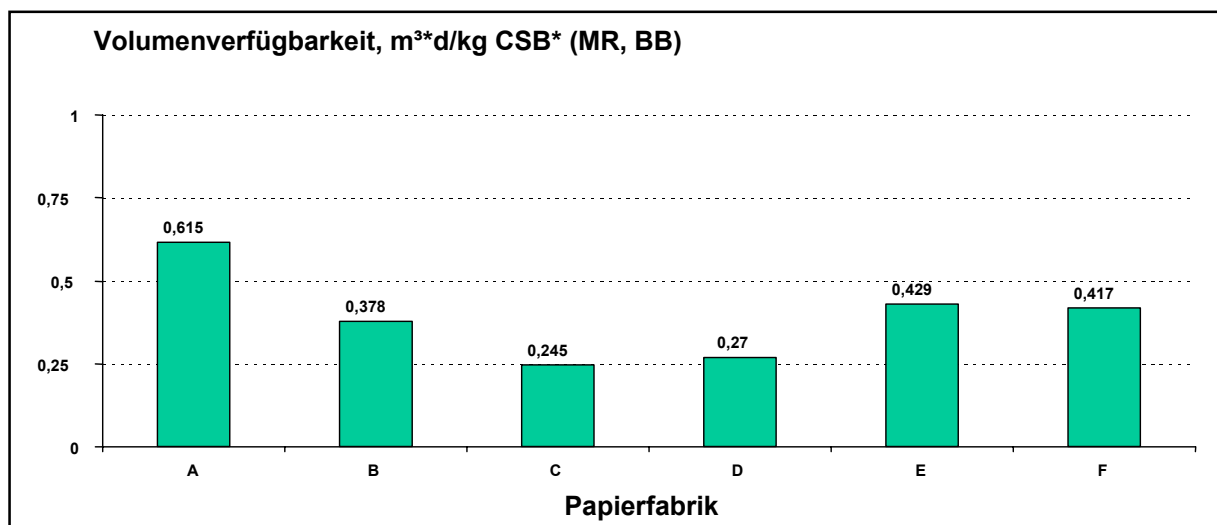


Abb.19: Volumenverfügbarkeit der Gesamtanlagen (Methanreaktoren und Belebungsbecken)

In **Tab.12** sind die für die Gesamt-Anlage ermittelten Kennzahlen zusammengefasst.

Tab.12: Technische Kennzahlen der Gesamtanlage

Papierfabrik	Einheit	A	B	C	D	E	F
Abwasserdurchsatz	m ³ /d	5.511	2.500	1.800	4.000	4.117	3.850
CSB-Fracht, Zulauf Versäuerungsstufe	kg/d	15.524	6.000	11.700	22.000	17.497	11.858
CSB-Fracht, Ablauf Nachklärbecken	kg/d	590	248	630	760	778	412
Spez. CSB-Abbaurrate (MR,BB)	kg/m ³ *d	1,56	2,53	3,86	3,58	2,23	2,32
CSB-Abbaugrad	%	96,2	95,9	94,6	96,5	95,6	96,5
CSB-Fracht, bezog. auf Bruttoproduktion	kg/t	14,5	18,6	16,2	21,7	21,7	15,4
Hydraul. Verweilzeit, (VS, MR, BB, NK)	h	48,5	37,8	58,2	51,5	66,9	47,3
Volumenverfügbar- keit (MR,BB)/kg CSB	m ³ *d/kg CSB	0,615	0,378	0,245	0,270	0,429	0,417

6.2 Vergleich der technischen Leistung

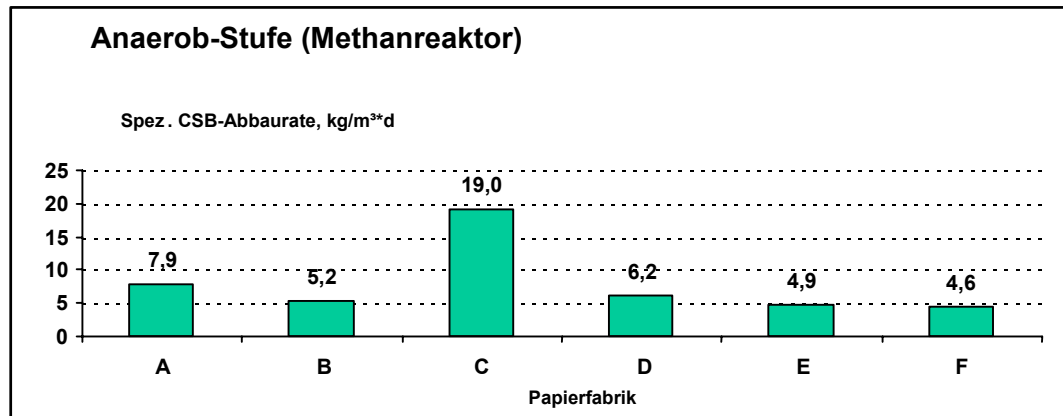
Von den in die Abwasserreinigungsanlagen der Benchmarking-Partner eingeleiteten CSB-Frachten werden 75% bis 85% in der Anaerob-Stufe abgebaut. Papierfabrik C erreicht im IC-Reaktor bei einem CSB-Abbau von 75 % mit 19 kg CSB/m³*d die höchste spez. CSB-Abbaurrate und führt damit im Ranking der Abbauleistung in der Anaerobstufe. Die spez. CSB-Abbauraten, die mit den konventionellen UASB-Reaktoren erzielt werden, liegen in einem engen Bereich von 5 kg CSB/m³*d bis 6 kg CSB/m³*d, ausgenommen der Reaktor der Papierfabrik A, der mit 8 kg CSB/m³*d das höchste Leistungsniveau der in diesem Projekt untersuchten UASB-Reaktoren erreicht und damit an zweiter Stelle bezüglich der Abbauleistung in der Anaerob-Stufe liegt.

Der CSB-Abbaugrad in der Aerob-Stufe ist zwischen 75% und 85% angesiedelt, wobei die spez. CSB-Abbauraten allerdings sehr unterschiedlich ausfallen. Ursache dafür ist die Tatsache, dass die Belebungsstufen, deren Volumen in die Berechnung der spez. Abbaurrate eingeht, im Verhältnis zu den abzubauenen CSB-Frachten sehr unterschiedlich dimensioniert sind

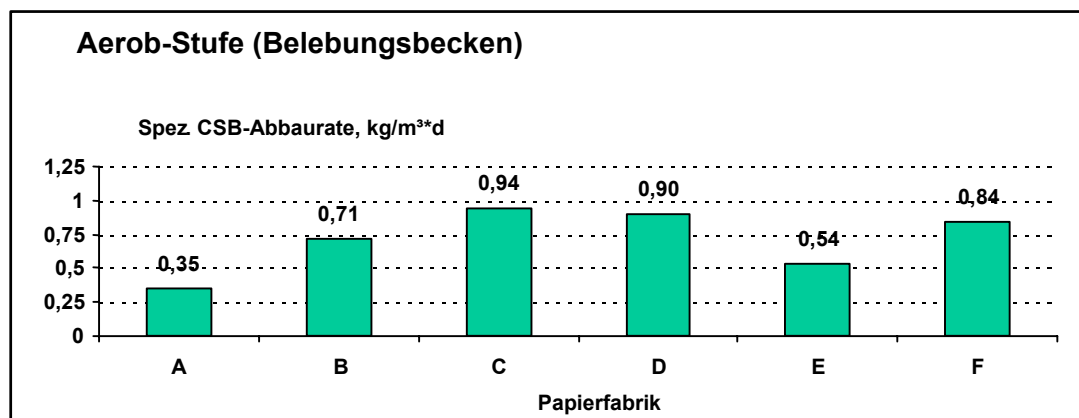
Insgesamt werden in beiden Prozessstufen der Abwasserreinigungsanlagen 95% bis 96% der CSB-Fracht abgebaut. Der biologische Abbauprozess verläuft also in allen

Anlagen gleichermaßen erfolgreich. Die Anlageneffizienz, die durch das Verhältnis von Aufwand (Volumen von Methanreaktoren und Belebungsbecken) und CSB-Eliminierung bestimmt wird, zeigt jedoch deutliche Unterschiede.

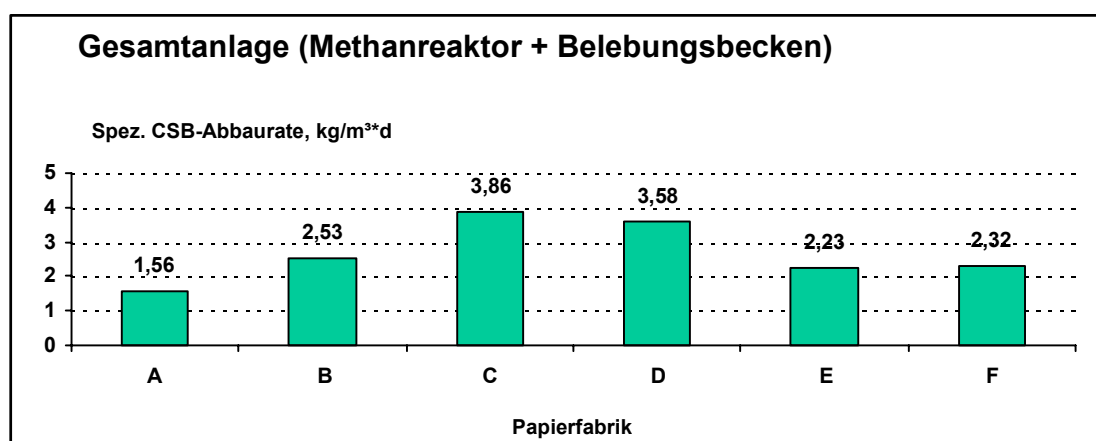
An der Spitze des Rankings für die Gesamtanlage liegen die Papierfabriken C (3,9 kg CSB/m³*d) und D (3,6 kg CSB/m³*d). Auf den Positionen 3, 4 und 5 folgen die Papierfabriken B, F und E mit spez. CSB-Abbauraten im engen Bereich zwischen 2,2 kg CSB/m³*d und 2,5 kg CSB/m³*d. Papierfabrik A weist mit 1,6 kg CSB/m³*d aufgrund der groß dimensionierten Belebungsstufe (8.000 m³) die niedrigste Gesamttraumumsatzleistung auf.



Papierfabrik	A	B	C	D	E	F
Rang	2	4	1	3	5	6



Papierfabrik	A	B	C	D	E	F
Rang	6	4	1	2	5	3



Papierfabrik	A	B	C	D	E	F
Rang	6	3	1	2	5	4

Abb.20: Ranking der spez. CSB-Abbaureate in den einzelnen Prozessstufen und in der Gesamtanlage

6.3 Kostenorientierte Kenngrößen und Kennzahlen

Zur Berechnung der kostenorientierten Kenngrößen und Kennzahlen wurden die Betriebskosten herangezogen, die von den beteiligten Papierfabriken im Jahr 2000 für den Betrieb der Abwasserreinigungsanlage aufgebracht worden sind. Zu den Betriebskosten zählen die Kosten für Chemikalien, die Energiekosten für den Anlagenbetrieb und die Belüftung, die Wartungs- und Instandhaltungskosten, die Personalkosten und die Kosten für die Entsorgung des Überschussschlammes. Daneben wurde die von den Papierfabriken im Jahr 2000 zu entrichtende Abwasserabgabe in die Berechnung der spez. Gesamtkosten einbezogen.

Zur Beurteilung der wirtschaftlichen Effizienz der Anlagen werden die spez. Kosten bezogen auf die eliminierte CSB-Fracht ($\text{€/t CSB}_{\text{elim}}$), die spez. Kosten bezogen auf die behandelte Abwassermenge (€/m^3), die spez. Kosten bezogen auf die Bruttoproduktion (€/t) sowie die spez. Kosten bezogen auf Abwassereinheiten ermittelt und verglichen. Eine kostenorientierte Betrachtung der einzelnen Prozessstufen der Abwasserreinigungsanlagen konnte nicht durchgeführt werden, da die dazu notwendigen Daten von den Papierfabriken nicht vollständig zur Verfügung gestellt werden konnten.

6.3.1 Spez. Kosten, bezogen auf die eliminierte CSB-Fracht

Die wichtigste kostenorientierte Kennzahl im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit von biologischen Abwasserreinigungsanlagen ist der auf die eliminierte CSB-Fracht bezogene Kostenaufwand ($\text{€/t CSB}_{\text{elim}}$).

In **Abb.21** sind die Summen der auf eine Tonne eliminierten CSB-bezogenen Betriebskosten für die gesamte Abwasserreinigungsanlage der jeweiligen Benchmarking-Partner dargestellt. Sie liegen in einem Bereich von 51 $\text{€/t CSB}_{\text{elim}}$ bis 149 $\text{€/t CSB}_{\text{elim}}$ und weisen damit erhebliche Unterschiede auf.

Demnach betreibt Papierfabrik F mit einem Kostenaufwand von 51,26 $\text{€/t CSB}_{\text{elim}}$ die kostengünstigste Abwasserreinigungsanlage. Etwas höher fallen die spez. Kosten der Papierfabriken D (61,24 $\text{€/t CSB}_{\text{elim}}$) und E (77,66 $\text{€/t CSB}_{\text{elim}}$) aus, während in den Papierfabriken A (134,21 $\text{€/t CSB}_{\text{elim}}$), B (120,94 $\text{€/t CSB}_{\text{elim}}$) und C (148,72 $\text{€/t CSB}_{\text{elim}}$) der Kostenaufwand mehr als doppelt so hoch ist wie in Papierfabrik F.

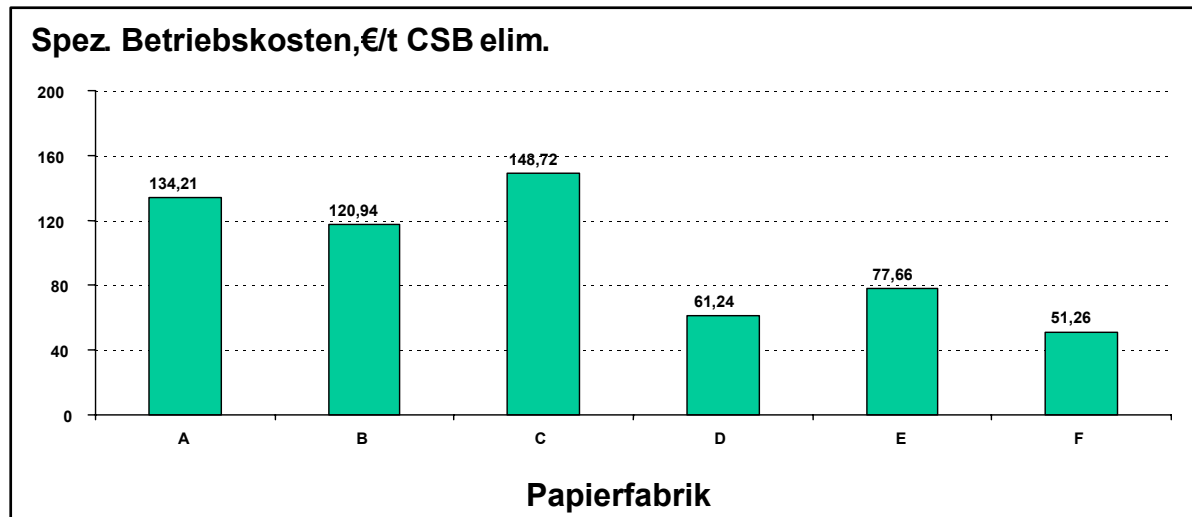


Abb.21: Spez. Betriebskosten, bezogen auf eliminierten CSB

Die großen Unterschiede bei den spez. Betriebskosten resultieren aus den starken Schwankungen der spez. Kosten, die für die einzelnen Positionen aufgewendet werden (**Tab.13**).

Für die Chemikalien wurden spez. Kosten zwischen 10,82 €/t CSB_{elim} (PF-F) und 38,16 €/t CSB_{elim} (PF-A) ermittelt, wobei die großen Unterschiede wiederum von den in den Chemikalienkosten enthaltenen sehr unterschiedlichen Aufwendungen für Flockungsmittel, Entschäumer, Harnstoff, Phosphorsäure und Natronlauge herrühren.

Die spez. Energiekosten, in denen sowohl die Energiekosten zum Betreiben der Anlage als auch die Energiekosten für die Belüftung der Belebungsbecken enthalten sind, liegen bei den Papierfabriken zwischen 6,46 €/t CSB_{elim} (PF-F) und 38,96 €/t CSB_{elim} (PF-B). Die Energiekosten pro kWh betragen für die Papierfabriken A, B, C, E und F 0,03 €/kWh bzw. 0,04 €/kWh. Papierfabrik D muss dagegen 0,06 €/kWh aufbringen. Auf Rückfrage wurde von allen Benchmarking-Partnern bestätigt, dass es sich bei den im Fragebogen angegebenen jährlichen Energiekosten jeweils um die Summe aus Leistungspreis und Arbeitspreis handelt. Gutschriften für das Verwerten des in den Methanreaktoren gebildeten Biogases wurden nicht verrechnet, da die Biogasbildungsraten aus nicht nachvollziehbaren Gründen in den verschiedenen Papierfabriken stark schwankten.

Bei den Personalkosten ergaben sich zwei ‚Kostenniveaus‘. Bei den Papierfabriken A, B und C belaufen sich die spez. Personalkosten auf ca. 25 €/t CSB_{elim}, während die spez. Personalkosten bei den Papierfabriken D, E und F zwischen 8 €/t CSB_{elim} und 13 €/t CSB_{elim} liegen. Bei der Beurteilung der Personalkosten muss berücksich-

tigt werden, dass die Zuordnung der Personalstunden zur Betreuung der ARA schwierig ist, da in den meisten Betrieben das Personal für mehrere Aufgabenbereiche zuständig ist.

Bei den Wartungskosten wurde der Kostendurchschnitt für die letzten fünf Betriebsjahre angesetzt, um größere, nicht regelmäßig auftretende Aufwendungen zu relativieren. Trotz dieses Ansatzes ergeben sich Schwankungen zwischen 16,49 €/t CSB_{elim} (PF-D) und 59,47 €/t CSB_{elim} (PF-C).

Schlammmentsorgungskosten fallen nur bei den Papierfabriken B (8,28 €/t CSB_{elim}) und C (22,78 €/t CSB_{elim}) an, Papierfabrik A verbrennt den Überschussschlamm, die Papierfabriken D, E und F führen den Überschussschlamm in die Produktion zurück.

Die Summe der Betriebskosten, bezogen auf eliminierten CSB, führt bei den Benchmarking-Partnern zu folgendem Ranking: Rang 1: PF-F 51,26 €/t CSB_{elim}; Rang 2: PF-D 61,24 €/t CSB_{elim}; Rang 3: PF-E 77,66 €/t CSB_{elim}; Rang 4: PF-B 120,94 €/t CSB_{elim}; Rang 5: PF-A 134,21 €/t CSB_{elim}; Rang 6: PF-C 148,72 €/t CSB_{elim}.

Tab.13: Aufteilung der spez. Betriebs- und Gesamtkosten, bezogen auf eliminierten CSB

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Chemikalienkosten	€/t _{CSB elim}	38,16	18,42	24,05	14,33	17,99	10,82
Energiekosten	€/t _{CSB elim}	32,74	38,96	17,11	22,51	17,92	6,46
Personalkosten	€/t _{CSB elim}	25,79	24,35	25,31	7,91	9,33	13,30
Wartungskosten	€/t _{CSB elim}	37,52	30,93	59,47	16,49	32,42	20,68
Schlamm-Entsorgung-Kosten	€/t _{CSB elim}	0,00	8,28	22,78	0,00	0,00	0,00
Spez. Betriebskosten	€/t _{CSB elim}	134,21	120,94	148,72	61,24	77,66	51,26
Ranking		5	4	6	2	3	1
Spez. Gesamtkosten (Spez. Betriebskosten + Abwasserabgabe)	€/t _{CSB elim}	161,52	152,11	162,64	78,07	105,14	79,68
Ranking		5	4	6	1	3	2

Bei Addition der jährlich zu entrichtenden Abwasserabgabe zu den spez. Betriebskosten erhält man die spez. Gesamtkosten für die Abwasserreinigungsanlagen. Legt man dem Ranking die spez. Gesamtkosten zugrunde, ändert sich das Ranking der Papierfabriken bei den Positionen 1 und 2. Nunmehr belegt Papierfabrik D Rang 1,

während Papierfabrik F auf Rang 2 landet. Die Positionen der Papierfabriken A, B, C und E bleiben unverändert.

In **Abb.22** sind die auf 1 Tonne eliminierten CSB bezogenen Einzelpositionen der Betriebskosten sowie die auf 1 Tonne eliminierten CSB bezogene spez. Abwasserabgabe graphisch dargestellt.

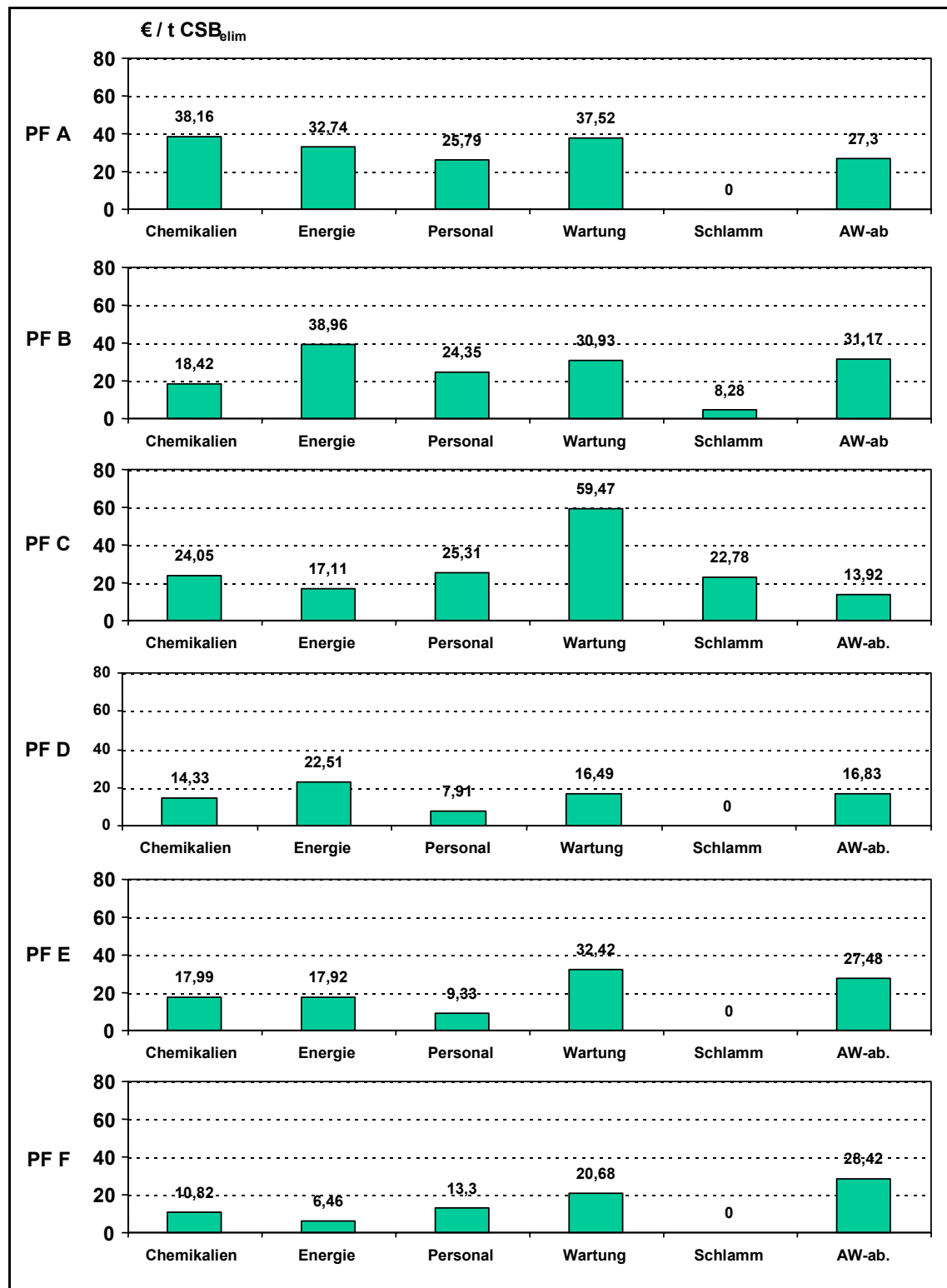


Abb.22: Vergleich der Einzelpositionen der auf den eliminierten CSB bezogenen spez. Betriebskosten und Abwasserabgabe

6.3.2 Spez. Kosten, bezogen auf die Abwassermenge

In **Tab.14** sind die Betriebskosten der Papierfabriken bzw. die Summe aus Betriebskosten und der jährlichen Abwasserabgabe bezogen auf die zu behandelnde Abwassermenge zusammengefasst.

Bei den auf die Abwassermenge bezogenen Betriebskosten bzw. Gesamtkosten (Betriebskosten + Abwasserabgabe) zeigt sich eine etwas geringere Streuung als bei den auf eliminierten CSB bezogenen Kosten. Die auf die Abwassermenge bezogenen spez. Betriebskosten der Papierfabriken A, B, D und E liegen in einem relativ engen Bereich von 0,28 €/m³ (PF-B) und 0,36 €/m³ (PF-A). Die höchste Kostenbelastung, bezogen auf die Abwassermenge, ergibt sich für Papierfabrik C (0,91 €/m³), die geringste Kostenbelastung (0,15 €/m³), bezogen auf die Abwassermenge, hat Papierfabrik F (**Abb.23**).

Tab.14: Spez. Kosten, bezogen auf die Abwassermenge

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Spez. Betriebskosten, bezogen auf Abwassermenge	€/m ³	0,36	0,28	0,91	0,33	0,32	0,15
Ranking		5	2	6	4	3	1
Spez. Betriebskosten + Abwasserabgabe, bezogen auf Abwassermenge	€/m ³	0,44	0,35	1,00	0,41	0,43	0,24
Ranking		5	2	6	3	4	1

Die Betrachtung der Betriebskosten mit einem Bezug auf die zu behandelnde Abwassermenge ist vor allem im Zusammenhang mit den Energiekosten von Bedeutung, da zu erwarten ist, dass mit steigender Abwassermenge der Energiebedarf zunimmt. Demzufolge sollten die auf die Abwassermenge bezogenen Energiekosten eine etwas geringere Streuung aufweisen, als die auf den eliminierten CSB bezogenen Energiekosten. Wie jedoch aus **Abb.24** hervorgeht, sind die Unterschiede bei den auf die Abwassermenge bezogenen spez. Energiekosten nicht signifikant geringer als die auf den eliminierten CSB bezogenen Energiekosten (Abb.22). Die auf die Abwassermenge bezogenen spez. Chemikalienkosten, spez. Personalkosten und spez. Wartungskosten differieren in gleicher Weise wie die entsprechenden CSB-

bezogenen Kosten. Die größte Übereinstimmung bei den auf die Abwassermenge bezogenen Kosten tritt erwartungsgemäß bei der Abwasserabgabe auf.

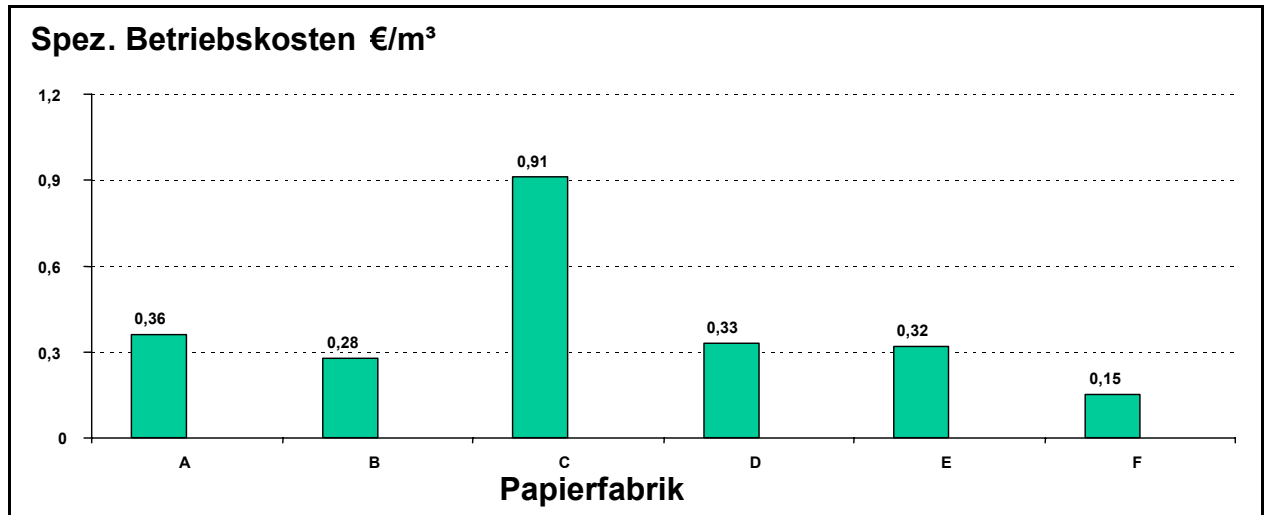


Abb.23: Spez. Betriebskosten, bezogen auf Abwassermenge

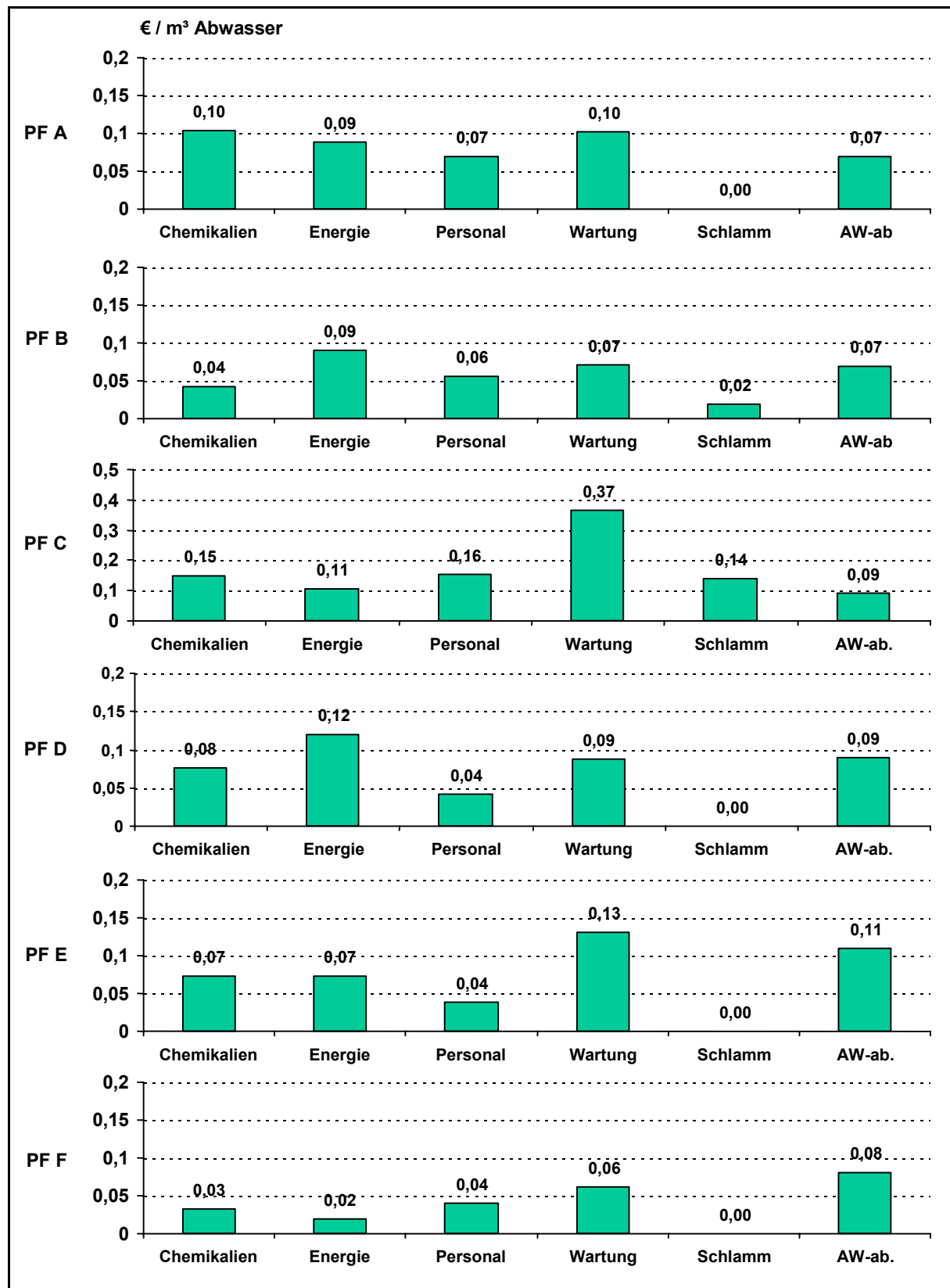


Abb.24: Vergleich der Einzelpositionen der auf die Abwassermenge bezogenen spez. Betriebskosten und Abwasserabgabe

6.3.3 Spez. Kosten, bezogen auf die Bruttoproduktion

Bezieht man die finanziellen Aufwendungen für die Abwasserbehandlung und Abwasserentsorgung auf die Bruttoproduktion, erhält man die Kosten, mit denen jede Tonne Papier bzw. Karton durch die Abwasserbehandlung und -entsorgung belastet wird.

Die in **Tab.15** aufgeführten spez. Kosten zeigen, dass Papierfabrik C mit 2,28 €/t Produkt die höchste Kostenbelastung durch die Abwasserreinigung hat, während Papierfabrik F mit 0,76 €/t die geringste Kostenbelastung des Produkts aufweist. Addiert man zu den Betriebskosten die jährlich zu entrichtende Abwasserabgabe, verzeichnet Papierfabrik B mit 2,71 €/t die höchste produktbezogene Kostenbelastung.

Tab.15: Spez. Kosten, bezogen auf die Bruttoproduktion

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Spez. Betriebskosten, bez. auf Bruttoproduktion	€/t	1,87	2,15	2,28	1,28	1,61	0,76
Ranking		4	5	6	2	3	1
Spez. Betriebskosten + Abwasserabgabe, bez. auf Bruttoproduktion	€/t	2,25	2,71	2,50	1,64	2,18	1,19
Ranking		4	6	5	2	3	1

6.3.4 Spez. Kosten, bezogen auf Abwassereinheiten

Eine ganzheitliche Leistungsbemessung von Abwasserreinigungsanlagen, die sowohl die eliminierten CSB-Frachten als auch die Abwassermenge einschließt, hat der Ruhrverband, Betreiber von rund 700 abwassertechnischen Anlagen, durch eine neue Veranlagungsformel entwickelt. Sie ermöglicht durch den Bezug auf einwohnerspezifische Größen und die Gewichtung der berücksichtigten Parameter eine kostenmäßige Bewertung der Behandlung von Abwässern unterschiedlicher Menge und Zusammensetzung. In dieser Veranlagungsformel werden die Abwassermenge, die eliminierte CSB-Fracht, die eliminierten Frachten von Phosphor- und Stickstoffverbindungen, sowie die Feststofffracht berücksichtigt. Zusätzlich wird der unterschiedlichen biologischen Abbaubarkeit der jeweiligen CSB-Fracht durch einen Faktor Rechnung getragen, der sich aus dem CSB/BSB₅-Verhältnis herleiten lässt. Mit die-

sem Verfahren wird die Abwasserbehandlungsleistung in so genannte Abwassereinheiten (AE) transformiert, die in Bezug zum Kostenaufwand gesetzt werden.

In Anlehnung an diese Formel wurden zur Berechnung der Abwassereinheiten für die in diesem Projekt betrachteten Abwasserreinigungsanlagen die Parameter Abwassermenge, eliminierte CSB-Fracht sowie ein Korrekturfaktor für das CSB/BSB₅-Verhältnis des Abwassers verwendet.

Stickstoff- und Phosphorfrachten wurden in die Berechnung nicht einbezogen, da sie, abgesehen von den als Nährstoff zugesetzten Mengen, bei Abwässern der Papierfabrikation vernachlässigbar gering sind. Für die Konzentration der Feststoffe sind in den Genehmigungsbescheiden mit Ausnahme von Papierfabrik D keine Grenzwerte angegeben, sodass auch Feststofffrachten in der Betrachtung nicht berücksichtigt werden müssen.

Danach ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der Abwassereinheiten (AE):

$$AE = 0,50 \cdot Q_a \text{ [m}^3/\text{a]} \cdot 1/(50 \text{ [m}^3/(\text{a} \cdot \text{AE})]) + 0,50 \cdot (\text{CSB}_{\text{zu}} - \text{CSB}_{\text{ab}}) \text{ [kg/a]} \cdot 1/((0,120 \cdot 365 \text{ [kg/(\text{a} \cdot \text{AE})]) \cdot f)$$

AE = Abwassereinheit (AE)

Q_a = Abwassermenge (m³/a)

CSB = Fracht an organischen Stoffen, gemessen als CSB

Einwohnergleichwert CSB-Fracht: 0,120 kg CSB/d * f

Einwohnergleichwert Abwassermenge: 50 m³/a

F = Korrekturfunktionen:

$$1 < \text{CSB}/\text{BSB}_5 < 2 \quad f = 0,25 \cdot (\text{CSB}/\text{BSB}_5) + 0,5$$

$$2 \leq \text{CSB}/\text{BSB}_5 \leq 3 \quad f = 1,00$$

$$3 < \text{CSB}/\text{BSB}_5 \leq 11 \quad f = 0,50 \cdot (\text{CSB}/\text{BSB}_5) - 0,5$$

$$\text{CSB}/\text{BSB}_5 > 11 \quad f = 5,00$$

Gewichtungsfaktor für Abwassermenge und CSB-Fracht = 0,5

Summe der Gewichtungsfaktoren = 1

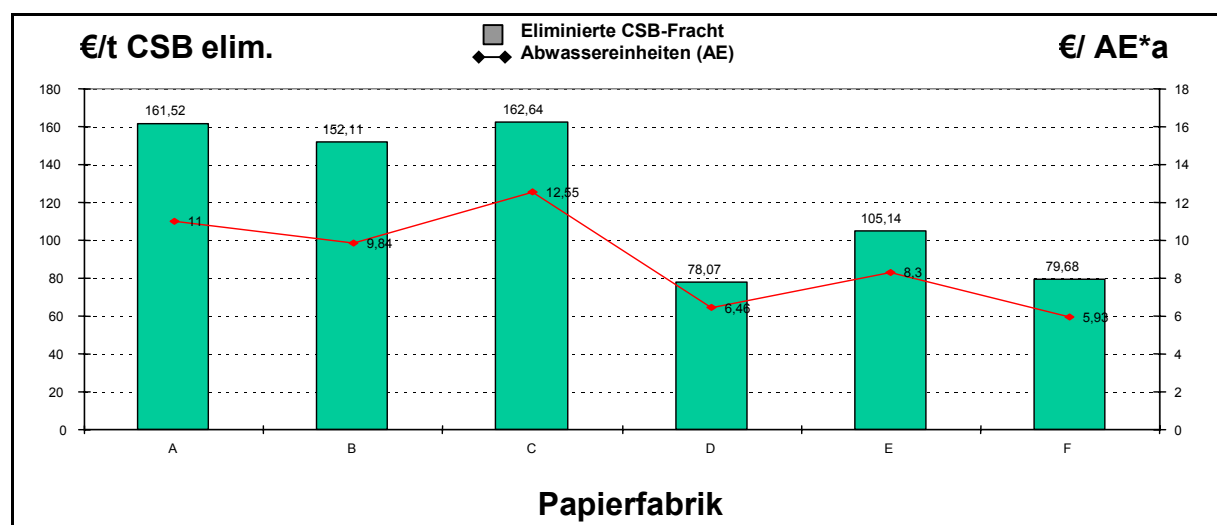
Die nach dieser Formel errechneten Abwassereinheiten (AE) sowie die auf Abwassereinheiten bezogenen spez. Gesamtkosten sind in **Tab.16** gegenübergestellt.

Tab.16: Spezifische Kosten, bezogen auf Abwassereinheiten

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Abwassereinheiten	AE	80042	32460	52346	93618	77282	56168
Spez. Kosten, bezogen auf AE (Betriebskosten + Abwasserabgabe)	€/AE*a	11,00	9,84	12,55	6,46	8,30	5,93
Ranking		5	4	6	2	3	1

Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Berechnung der spezifischen Kosten auf Basis von AE-Einheiten, die sowohl die CSB-Fracht als auch die hydraulische Belastung der ARA umfassen, Papierfabrik F mit nur 5,93 €/AE*a die kosteneffizienteste Abwasserbehandlung durchführt. An zweiter Stelle folgt Papierfabrik D mit 6,46 €/AE*a. Die kostenintensivste Anlage betreibt Papierfabrik C, die 12,55 €/AE*a zu entrichten hat.

Beim Vergleich der auf die eliminierte CSB-Fracht bezogenen spez. Kosten und der spezifischen Kosten, bezogen auf AE, zeigt sich, dass bezüglich der Kosteneffizienz die Reihenfolge in der Bewertung der Papierfabriken gleich ausfällt. Lediglich bei Papierfabrik D und Papierfabrik F, die sich in der Kosteneffizienz jedoch kaum unterscheiden und praktisch gleich zu bewerten sind, ändert sich die Reihenfolge (Abb.25).


Abb.25: Gegenüberstellung der spez. Gesamtkosten (Betriebskosten + Abwasserabgabe), bezogen auf eliminierten CSB und auf Abwassereinheiten (AE)

In **Abb.26** sind die auf die Abwassereinheit bezogenen Kosten der Einzelpositionen dargestellt.

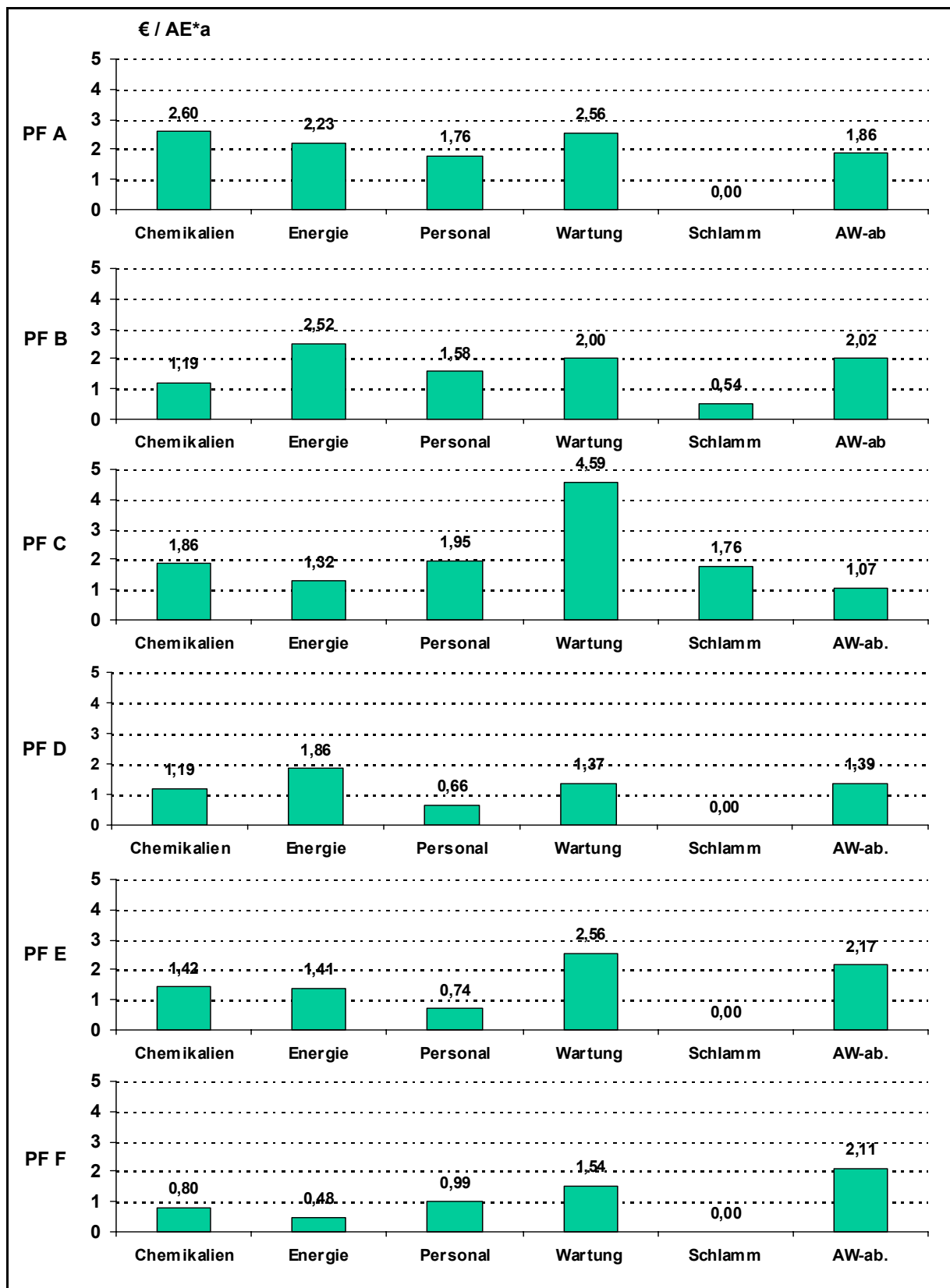


Abb.26: Vergleich der Einzelpositionen der auf Abwassereinheiten (AE) bezogenen spez. Betriebskosten und Abwasserabgabe

Tab.17: Ranking der Benchmarking-Partner beim Vergleich der verschiedenen spez. Gesamtkosten (Betriebskosten + Abwasserabgabe)

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Spez. Gesamtkosten, bez. auf elim. CSB	Rang	5	4	6	2	3	1
Spez. Gesamtkosten, bez. auf Abwassermenge	Rang	5	2	6	3	4	1
Spez. Gesamtkosten, bez. auf Bruttoproduktion	Rang	4	6	5	2	3	1
Spez. Gesamtkosten, bez. auf Abwassereinheiten	Rang	5	4	6	2	3	1

In **Tab.17** sind die Rankings der spez. Gesamtkosten, bezogen auf den eliminierten CSB, die Abwassermenge, die Bruttoproduktion und auf Abwassereinheiten gegenübergestellt. Ein Vergleich der Rangnummern zeigt, dass Papierfabrik F die kosteneffektivste Abwasserreinigungsanlage betreibt. An zweiter Stelle rangiert Papierfabrik D, gefolgt von Papierfabrik E. Die Positionen vier und fünf nehmen die Papierfabriken B und A ein. Auf dem letzten Platz liegt mit Papierfabrik C der Benchmarking-Partner, dessen Abwasserreinigungsanlage unter technischen Gesichtspunkten am effizientesten arbeitet.

7. Verknüpfung der leistungsorientierten und kostenorientierten Anlageneffizienz

Bei bisher durchgeführten Benchmarking-Verfahren in kommunalen Abwasserreinigungsanlagen wurde vorrangig die wirtschaftliche Effizienz der Anlagen geprüft und verglichen. Eine Beurteilung der Gesamteffizienz, die sowohl die technische als auch die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit verknüpft, ist in der einschlägigen Literatur noch nicht beschrieben. Es werden deshalb im Rahmen dieses Projekts zwei Methoden aufgezeigt, die geeignet sind, sowohl die technische als auch die wirtschaftliche Effizienz in einer Leistungsgröße zusammenzuführen. Die erste Methode beinhaltet die Ermittlung eines ganzheitlichen Qualitätsindex mit Hilfe der sogenannten Harrington-Funktion. In einem zweiten Ansatz wird zur Beurteilung der Gesamteffizienz ein Punktesystem angewandt, bei dem technische und kostenorientierte Kennzahlen Bewertungspunkten zugeordnet werden, die in der Summe eine Gesamtpunktzahl ergeben, mit der ein Ranking vorgenommen werden kann.

7.1. Beurteilung der Gesamteffizienz mittels Harrington-Funktion

Die Harrington-Funktion ist eine mathematische Formulierung, die die Möglichkeit bietet, mehrere Eigenschaftsmerkmale eines Produkts zu einer ganzheitlichen Beurteilungsgröße des Eigenschaftsprofils zusammenzuführen.¹²⁾

Im Zusammenhang mit der Qualitätsprüfung von Papier wird in der Literatur die Harrington-Funktion als ein mathematisches Verfahren beschrieben, das Anforderungsprofil von Papierprodukten bezüglich mehrerer Eigenschaften in Form eines Qualitätsindex auszudrücken.¹³⁾ So wurden mit Hilfe dieser mathematischen Funktion die Eigenschaftsmerkmale Altpapieranteil, Berstdruck, Ringstauchwiderstand und Flächengewicht zu einem Qualitätsindex zusammengefasst, der einen Vergleich von Testlinerpapieren hinsichtlich ihres Anforderungsprofils ermöglichte.

Grundlage der Methode ist die Transformation der Eigenschaftswerte in dimensionslose Funktionswerte (d_i). Durch Bildung des geometrischen Mittelwerts (D_G) oder des exponentiellen Mittelwerts (D_E) aus den mit Gewichtungsfaktoren multiplizierten Funktionswerten der einzelnen Eigenschaften wird ein Qualitätsindex erhalten, mit dem die Gesamtheit des Eigenschaftsprofils eines Produktes beziffert bzw. beurteilt werden kann.

Zur Bestimmung des Funktionswertes d_i für die Eigenschaft i muss ein Gültigkeitsbereich für den Eigenschaftswert durch Festlegung einer Untergrenze ($y^{\min}$) und einer Obergrenze ($y^{\max}$) definiert werden. Daneben ist ein Gewichtungsfaktor für die einzelnen Eigenschaften festzulegen.

Die Harrington-Funktion wird durch die Formeln (1) bis (3) beschrieben. Aus den Gleichungen (5) und (6) ergibt sich der geometrische bzw. exponentielle Mittelwert für die dimensionslosen Funktionswerte der Eigenschaftswerte.

$$1) \quad d_i = \exp[-\exp(-y'_i)]$$

$$2) \quad y'_i = k_i y_i + b_i$$

$$3) \quad \begin{aligned} k_i y^{\min} + b_i &= 0 \\ k_i y^{\max} + b_i &= 1 \end{aligned}$$

$y' = 0$, wenn der Eigenschaftswert $= y^{\min}$ ist, d.h. der festgelegten Untergrenze entspricht.

$y' = 1$, wenn der Eigenschaftswert $= y^{\max}$ ist, d.h. der festgelegten Obergrenze entspricht.

Aus Gleichung (1) ergibt sich für $y' = 0$ und $y' = 1$ ein Arbeitsbereich für d_i zwischen 0,37 bis 0,69. Außerhalb dieses Bereichs verläuft die Harrington-Funktion (1) nicht mehr linear (**Abb.27**).

$$4) \quad \begin{aligned} \sum \alpha_i &= 1 \\ 0 \leq \alpha_i &\leq 1 \end{aligned}$$

$$5) \quad DG = \prod_{i=1}^n d_i^{\alpha_i} = \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \alpha_i \exp(-y'_i)\right\}$$

$$6) \quad DE = \exp\left\{-\prod_{i=1}^n (-\ln d_i)^{\alpha_i}\right\} = \exp\left\{-\exp\left(-\sum_{i=1}^n \alpha_i y'_i\right)\right\}$$

d_i : dimensionsloser Wert des Qualitätsindex ,d' für die Eigenschaft ,i'

y_i : Wert der Eigenschaft (Kennzahl) ,i' in seiner physikalischen Dimension

$y^{\min}$, $y^{\max}$: Unter-, bzw. Obergrenze des Eigenschaftswerts in seiner physikalischen Dimension

y'_i : dimensionsloser Wert der linearen Transformation von y_i

k_i , b_i : aus Gleichung 3 berechnete Koeffizienten für die Eigenschaftswerte $y^{\min}$ und $y^{\max}$

α_i : Gewichtungsfaktor der Eigenschaft ,i'

D_G : Gesamt-Qualitätsindex berechnet als geometrischer Mittelwert aus den Indizes der einzelnen Eigenschaften

D_E : Gesamt-Qualitätsindex berechnet als exponentieller Mittelwert aus den Indizes der einzelnen Eigenschaften

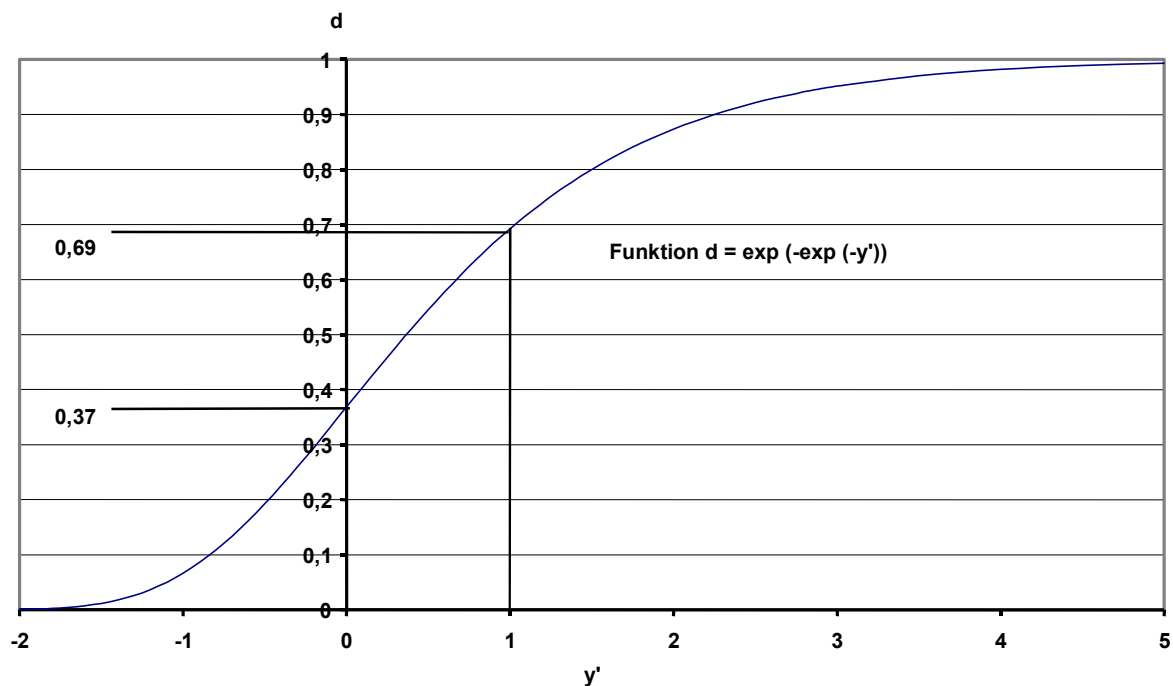


Abb.27: Verlauf der Harrington-Funktion

Technische Prozesse werden nach ihrer funktionalen Leistung und nach der Wirtschaftlichkeit der Prozessführung beurteilt. Die Anwendung der Harrington-Funktion bietet die Möglichkeit, beide Merkmale, sowohl die technische Leistung als auch die wirtschaftliche Effizienz, zu einer Beurteilungsgröße zusammenzuführen und auf Basis des erhaltenen Qualitätsindex (D_G bzw. D_E) das Leistungsprofil der untersuchten Prozesse gemäß ihrer Gesamteffizienz in eine Rangliste einzuordnen.

Bei der in diesem Projekt erfolgten Anwendung der Harrington-Funktion auf Abwasserreinigungsanlagen wurden die spez. CSB-Abbauraten und Abbaugrade der Anaerob-Stufe, der Aerob-Stufe und die spez. Gesamtkosten, jeweils bezogen auf behandelte Abwassereinheiten AE und den eliminierten CSB zur Berechnung der Qualitätsindizes D_G und D_E herangezogen. Technische Effizienz, ausgedrückt durch die spez. CSB-Abbauraten und den CSB-Abbaugrad, sowie wirtschaftliche Effizienz, ausgedrückt durch die auf 1 Tonne eliminierten CSB bezogenen spez. Gesamtkosten, wurden gleich gewichtet.

Die zur Berechnung von D_G und D_E relevanten Größen und die ermittelten Qualitätsindizes D_G und D_E sind in **Tab.18** dargestellt.

Tab.18: Berechnung der Qualitätsindizes D_G , D_E

	Spez. CSB-Abbaurrate Anaerob-Stufe (MR)		CSB-Abbaugrad Anaerob-Stufe		Spez. CSB- Abbaurrate Aerob-Stufe (BB)		CSB-Abbaugrad Aerob-Stufe		Betriebskosten+ Abwasserabgabe				
	kg CSB _{elim} /m ³ *d		%		kg CSB _{elim} /m ³ *d		%		€/t CSB _{elim}				
$y_i^{\min}$	1		70		0,1		70		70				
$y_i^{\max}$	20		90		1		90		170				
b_i	-0,0526		-3,5000		-0,1111		-3,5000		-0,7000				
k_i	0,0526		0,0500		1,1111		0,0500		0,0100				
a	0,125		0,125		0,125		0,125		0,5				
	y		y		y		y		y				
	kg CSB _{elim} /m ³ *d		%		kg CSB _{elim} /m ³ *d		%		€/t CSB _{elim}				
PF A	7,87		78,3		0,35		82,5		161,52				
PF B	5,22		80,0		0,71		79,4		152,11				
PF C	18,97		75,4		0,94		78,1		162,64				
PF D	6,20		84,5		0,90		77,6		78,07				
PF E	4,90		81,3		0,54		76,3		105,14				
PF F	4,59		75,2		0,84		86,0		79,68				
	y'	d _i	y'	d _i	y'	d _i	y'	d _i	y'	1-y'	d _i	D_G	D_E
PF A	0,362	0,498	0,417	0,517	0,274	0,467	0,623	0,585	0,915	0,085	0,399	0,453	0,460
PF B	0,222	0,449	0,500	0,545	0,673	0,600	0,469	0,535	0,821	0,179	0,433	0,479	0,485
PF C	0,946	0,678	0,269	0,466	0,931	0,674	0,406	0,514	0,926	0,074	0,395	0,477	0,496
PF D	0,274	0,467	0,727	0,617	0,888	0,663	0,382	0,505	0,081	0,919	0,671	0,612	0,622
PF E	0,205	0,443	0,564	0,566	0,493	0,543	0,313	0,481	0,351	0,649	0,593	0,548	0,552
PF F	0,189	0,437	0,258	0,462	0,827	0,646	0,801	0,638	0,097	0,903	0,667	0,598	0,612

Die Auswertung gemäss der Harrington-Funktion kommt zu dem Ergebnis, dass die Gesamteffizienz der Abwasserreinigungslage von Papierfabrik D am höchsten einzu-stufen ist. Für die übrigen Papierfabriken ergibt sich für die Einstufung der Gesamteffizienz das in **Tab.19** dargestellte Ranking:

Rang 2: Papierfabrik F

Rang 3: Papierfabrik E

Rang 4: Papierfabrik B

Rang 5: Papierfabrik C

Rang 6: Papierfabrik A.

Tab.19: Rangfolge nach der Harrington-Funktion

Papierfabrik	A	B	C	D	E	F
D_E	0,460	0,485	0,496	0,622	0,552	0,612
Rang	6	5	4	1	3	2
Papierfabrik	A	B	C	D	E	F
D_G	0,453	0,479	0,477	0,612	0,548	0,598
Rang	6	4	5	1	3	2

7.2. Beurteilung der Gesamteffizienz mittels Punktesystem

Eine weitere Möglichkeit die Gesamteffizienz eines Prozesses zu quantifizieren, bietet die Anwendung eines Punktesystems. Bei dem im Folgenden beschriebenen Verfahren werden dem Wertebereich zwischen Untergrenze und Obergrenze der entsprechenden Kennzahlen (spez. CSB-Abbaurrate und -Abbaugrad von Anaerob- und Aerob-Stufe, spez. Gesamtkosten einschließlich Abwasserabgabe, bezogen auf eliminierten CSB) maximal 10 Punkte zugeordnet, wobei die Punktzahl gemäß nachfolgender Gleichung (1) ermittelt wird. Bei Leistungsmerkmalen bzw. Kennzahlen, wie z.B. den spez. Gesamtkosten, deren nominaler Anstieg gleichzusetzen ist mit einer Minderung der Kosteneffizienz, wird die erhaltene Punktzahl PZ_i von der maximalen Punktzahl 10 subtrahiert, d.h. $PZ_i = 10 - PZ_i$.

Durch Addition der mit Gewichtungsfaktor α multiplizierten Punktzahlen PZ_i der einzelnen Leistungsmerkmale bzw. Kennzahlen erhält man die Gesamtpunktzahl GPZ als Beurteilungsgröße für die Gesamteffizienz des Prozesses.

Berechnung der Punktzahl PZ_i :

$$1) \quad PZ_i = (W_i - W_{i,\min}) / ((W_{i,\max} - W_{i,\min}) / 10)$$

$$2) \quad GPZ = \sum \alpha_i * PZ_i$$

PZ_i : Punktzahl für das Leistungsmerkmal bzw. Kennzahl i

GPZ: Gesamtpunktzahl

$W_{i,\min}$: Untergrenze des Leistungsmerkmals bzw. Kennzahl

$W_{i,\max}$: Obergrenze des Leistungsmerkmals bzw. Kennzahl

W_i : Leistungsmerkmal bzw. Kennzahl in physikalischer Dimension

α_i : Gewichtungsfaktor für die Leistungsmerkmale bzw. Kennzahlen W_i

Die zur Berechnung der Gesamtpunktzahl herangezogenen Kennzahlen sind in **Tab.20** dokumentiert. Das aus dem Vergleich der Gesamtpunktzahlen resultierende Ranking ist in **Tab.21**.

Tab.20: Berechnung der Gesamtpunktzahl GPZ

	Spez.CSB- Abbaurrate Anaerob-Stufe (MR)	CSB- Abbaugrad Anaerob- Stufe	Spez. CSB- Abbaurrate Aerob-Stufe (BB)	CSB- Abbaugrad Aerob-Stufe	Betriebs- kosten+ AW-Abgabe		
	kg CSB _{elim} /m ³ *d	%	kg CSB _{elim} /m ³ *d	%	€/t CSB _{elim}		
$y_i^{\min}$	1	70	0,1	70	70		
$y_i^{\max}$	20	90	1	90	170		
a	0,125	0,125	0,125	0,125	0,5		
	kg CSB _{elim} /m ³ *d	%	kg CSB _{elim} /m ³ *d	%	€/t CSB _{elim}		
PF A	7,87	78,35	0,35	82,46	161,52		
PF B	5,22	80,00	0,71	79,38	152,11		
PF C	18,97	75,38	0,94	78,13	162,64		
PF D	6,20	84,55	0,90	77,65	78,07		
PF E	4,90	81,27	0,54	76,26	105,14		
PF F	4,59	75,16	0,84	86,01	79,68		
	PZ	PZ	PZ	PZ	PZ	GPZ	
PF A	3,616	4,175	2,778	6,230	0,848	2,524	
PF B	2,220	5,000	6,728	4,688	1,789	3,224	
PF C	9,457	2,692	9,306	4,063	0,736	3,558	
PF D	2,737	7,273	8,883	3,824	9,193	7,436	
PF E	2,054	5,635	4,925	3,128	6,486	5,211	
PF F	1,892	2,581	8,271	8,007	9,032	7,110	

Tab.21: Ranking der Papierfabriken nach der Gesamtpunktzahl GPZ

Papierfabrik	A	B	C	D	E	F
GPZ	2,52	3,22	3,56	7,44	5,21	7,11
Rang	6	5	4	1	3	2

Bei der Beurteilung des Gesamtleistungsprofils der biologischen Abwasserreinigungsanlage, das die technische und wirtschaftliche Effizienz umfasst, führen sowohl die Harrington-Funktion als auch das 10-Punkte-System zum gleichen Ranking der Benchmarking-Partner. Demnach hat Papierfabrik D die beste Anlage, dicht gefolgt von der Papierfabrik F. Den dritten Platz im Ranking belegt Papierfabrik E, knapp dahinter folgen die Papierfabriken C und B. Auf dem letzten Platz rangiert Papierfabrik A.

8. Diskussion der Benchmarks und Bewertung

8.1. Technische Effizienz

Die technische Effizienz eines Prozesses kann durch das Verhältnis einer zeitbezogenen Produktmenge bzw. erbrachten Leistung zum dafür bereitgestellten technischen Aufwand beschrieben werden. Überträgt man diesen Ansatz auf zweistufige biologische Abwasserbehandlungsanlagen, kann die in einer bestimmten Zeiteinheit abgebaute CSB-Fracht als das Produkt des Prozesses angesehen werden, während die Dimensionierungen der zur Abwasserbehandlung eingesetzten Anaerob-Reaktoren und Belebungsbecken den bereitgestellten technischen Aufwand beschreiben. Für einen Vergleich der technischen Effizienz der Abwasserreinigungsanlagen sind deshalb die zeit- und volumenbezogenen spez. CSB-Abbauraten ($\text{kg CSB}_{\text{elim}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$) der Anaerob-Stufen, Aerob-Stufen bzw. der Gesamtanlagen von besonderer Bedeutung. Daneben sollten allerdings auch die CSB-Abbaugrade mit einbezogen werden. Dadurch wird es möglich, den biologischen Abbauprozess hinsichtlich seiner Effektivität besser zu beschreiben.

8.1.1 Anaerob-Stufe

Spez. CSB-Abbauraten und CSB-Abbaugrade der Anaerob-Stufen sind in **Abb.29** dargestellt. In den Anaerob-Stufen werden 75% bis 85% der eingeleiteten CSB-Fracht abgebaut. Die Papierfabriken C und F liegen mit 75,4% bzw. 75,2% im unteren Bereich, während Papierfabrik D mit 84,5% die obere Bereichsgrenze markiert.

Trotz eines relativ niedrigen prozentualen CSB-Abbaus erreicht der IC-Reaktor von Papierfabrik C mit $19 \text{ kg CSB}_{\text{elim}}/\text{m}^3\text{d}$ die höchste spez. CSB-Abbauraten und arbeitet damit im Hinblick auf die Dimensionierung des Reaktors am effizientesten. Bei den konventionellen UASB-Reaktoren liegen die spez. CSB-Abbauraten auf einem insgesamt deutlich niedrigeren Niveau. Papierfabrik A erreicht mit $8 \text{ kg CSB}_{\text{elim}}/\text{m}^3\text{d}$ die höchste spez. CSB-Abbauraten, während die in den Papierfabriken B, D, E und F erzielten spez. CSB-Abbauraten zwischen $5 \text{ kg CSB}_{\text{elim}}/\text{m}^3\text{d}$ und $6 \text{ kg CSB}_{\text{elim}}/\text{m}^3\text{d}$ angesiedelt sind.

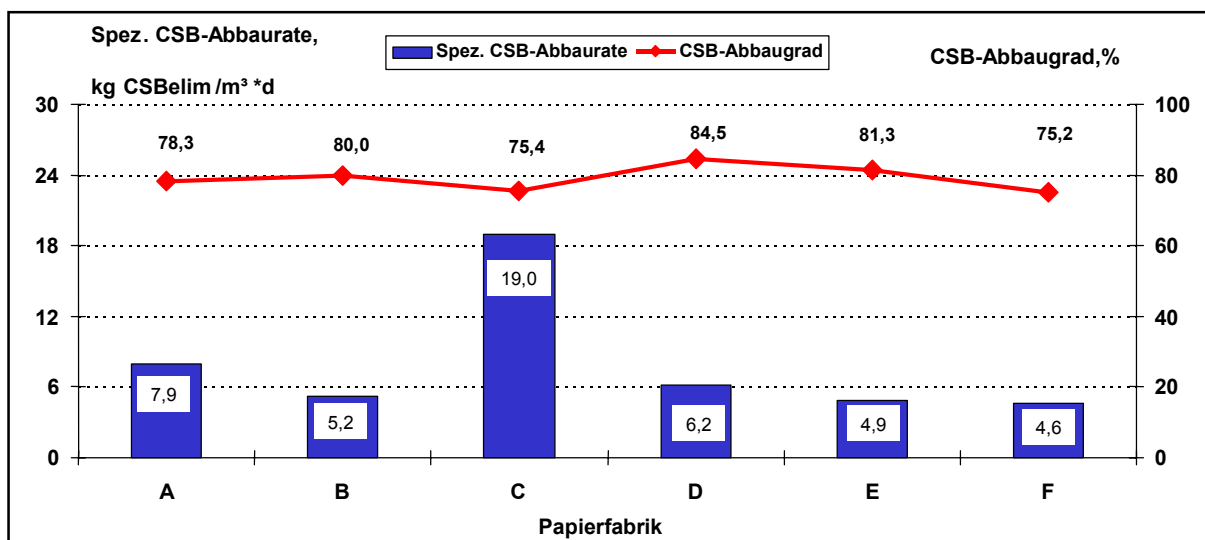


Abb.28: CSB-Abbaugrad und spez. CSB-Abbaurrate in der Anaerobstufe

Die Verknüpfung von spez. CSB-Abbaurrate und CSB-Abbaugrad mit Hilfe der Harrington-Funktion führt beim Vergleich der Abbauleistung in der Anaerob-Stufe zu dem in **Tab.22** dargestellten Ranking.

Tab.22: Ranking der technischen Effizienz der Anaerob-Stufe

Papierfabrik	A	B	C	D	E	F
Rang	3	5	1	2	4	6

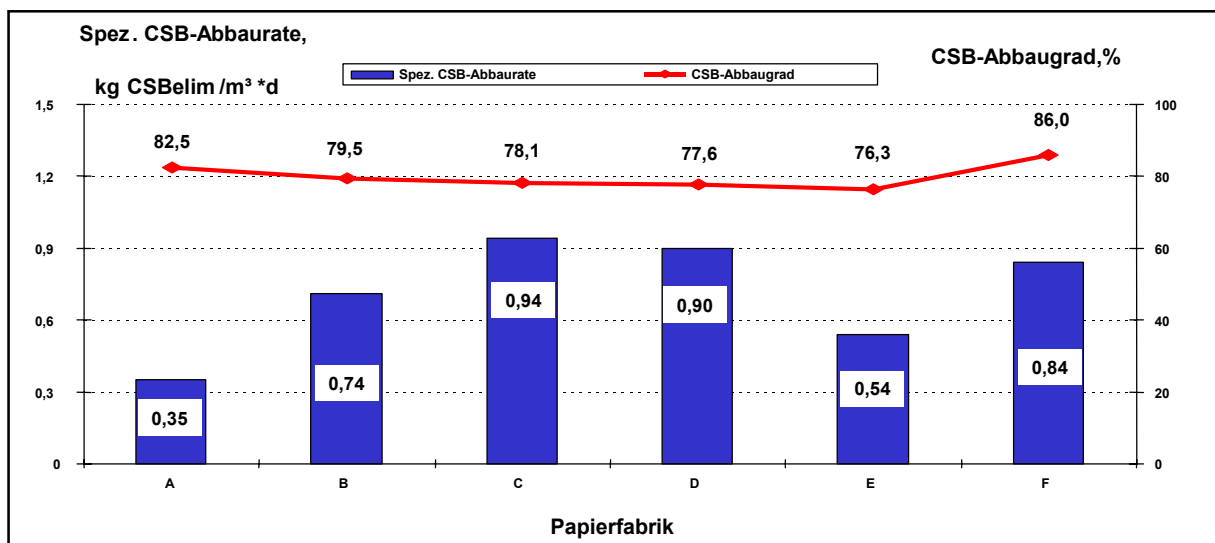
Generell ist davon auszugehen, dass mit steigender CSB-Belastung des Abwassers höhere prozentual höhere CSB-Abbaugrade erzielt werden können. Bei Papierfabrik C, die mit 6500 mg CSB/l die höchste Zulaufkonzentration aufweist, sollte deshalb eine Steigerung des CSB-Abbaugrads von derzeit rund 75% auf 80 bis 85% möglich sein. Auch bei Papierfabrik F (CSB-Zulaufkonzentration 3080 mg/l) sollte ein CSB-Abbaugrad von 80% erreicht werden können.

8.1.2 Aerob-Stufe

In den Aerob-Stufen der betrachteten Anlagen werden gem. **Abb.29** zwischen 76% und 86% der aus der Anaerob-Stufe eingeleiteten CSB-Fracht abgebaut. Die spez. CSB-Abbauraten liegen im Bereich von 0,35 kg CSB_{elim}/m³d (PF-A) und 0,94 kg CSB_{elim}/m³d (PF-C). Ursache für die relativ große Streuung der spez. CSB-Abbauraten ist die Tatsache, dass die einzelnen Belebungsstufen im Verhältnis zu der jeweils eingeleiteten CSB-Fracht bzw. Abwassermenge sehr unterschiedlich dimensioniert sind. In **Abb.30** ist die Dimensionierung der Belebungsbecken, bezogen auf die eingeleitete CSB-Fracht, graphisch dargestellt. Die Belebungsbecken von

Papierfabrik A sind mit 2,4 m³d/kg CSB deutlich größer dimensioniert als die Belebungsbecken der anderen Benchmarking-Partner. Auch Papierfabrik E liegt mit 1,4 m³d/kg CSB noch über den Werten der übrigen Papierfabriken (0,8-1,1 m³d/kg CSB). In diesen beiden Fällen sollte überprüft werden, ob eine Reduzierung des Belebungsvolumens möglich ist, da überflüssiges Anlagenvolumen auch einen entsprechenden höheren Kostenaufwand bedeutet.

Abb.29: CSB-Abbaugrad und spez. CSB-Abbaurrate in der Aerobstufe



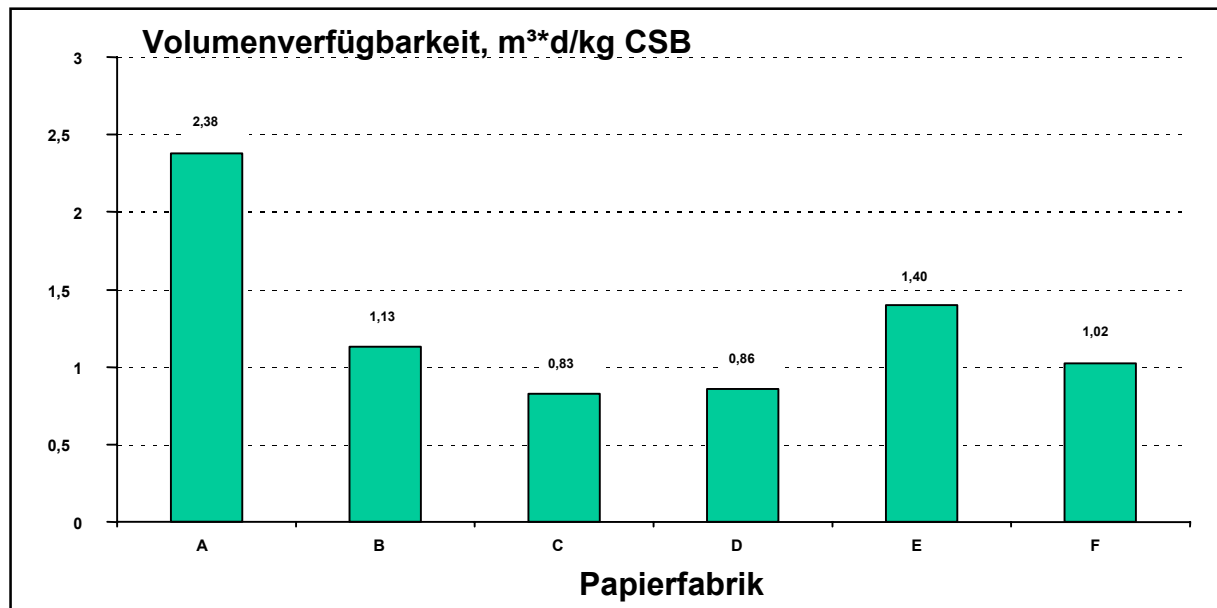


Abb.30: Volumenverfügbarkeit in den Belebungsbecken

Die Verknüpfung von spez. CSB-Abbauraten und spez. CSB-Abbaugrad mittels Harrington-Funktion führt beim Vergleich der Abbauleistungen in den Aerob-Stufen zu dem in **Tab.23** dokumentierten Ranking.

Tab.23 Ranking der technischen Effizienz der Aerob-Stufe

Papierfabrik	A	B	C	D	E	F
Rang	5	4	2	3	6	1

8.1.3. Gesamtanlage

Die spez. CSB-Abbauraten und die CSB-Abbaugrade der Gesamtanlagen sind in **Abb.31** dargestellt. Insgesamt werden in beiden Prozessstufen der Abwasserreinigungsanlagen 95% bis 96% der CSB-Fracht abgebaut. Der biologische Abbauprozess verläuft also bei allen sechs Benchmarking-Partnern gleichermaßen erfolgreich. Die volumenbezogenen spez. CSB-Abbauraten der Gesamtanlagen zeigen jedoch deutliche Unterschiede. Zu ihrer Berechnung wird die in beiden Prozessstufen eliminierte CSB-Fracht auf die Summe der Volumina von Methanreaktoren und Belebungsbecken der jeweiligen Anlage bezogen. Nach dieser Berechnung erzielten Papierfabrik C und Papierfabrik D mit 3,9 kg CSB_{elim}/m³d bzw. 3,6 kg CSB_{elim}/m³d die höchsten spez. CSB-Abbauraten. Etwa 35% niedriger liegen die spez. CSB-Abbauraten von Papierfabrik B (2,5 kg CSB_{elim}/m³d), Papierfabrik F (2,3 kg CSB_e

lim/m³d) und Papierfabrik E (2,2 kg CSB_{elim}/m³d). Papierfabrik A weist mit 1,6 kg CSB_{elim}/m³d aufgrund der groß dimensionierten Belebungsstufe die niedrigste spez. CSB-Abbaurrate auf.

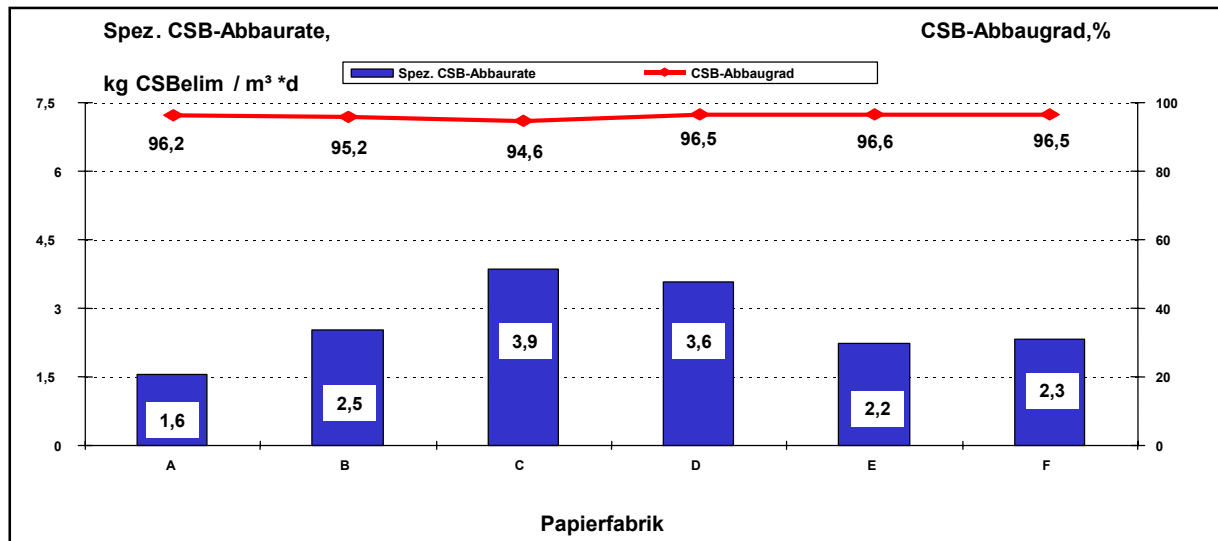


Abb.31: Spez. CSB-Abbaurrate und CSB-Abbaugrad in der Gesamtanlage

Die Berechnung der Qualitätsindizes nach Harrington unter Einbeziehung der in der Anaerob-Stufe und Aerob-Stufe erzielten spez. CSB-Abbauraten und CSB-Abbaugrade liefert das in **Tab.24** aufgezeigte Ranking für die technische Effizienz der Gesamtanlagen. Papierfabrik C, die in der Anaerob-Stufe den leistungsstarken IC-Reaktor betreibt, liegt an der Spitze. Bei den Papierfabriken, die konventionelle UASB-Reaktoren einsetzen, führt Papierfabrik D.

Tab.24: Ranking der technischen Effizienz der Gesamt-Anlage

Papierfabrik	A	B	C	D	E	F
Rang	5	4	1	2	6	3

Die Überwachungswerte für CSB und BSB₅ in den Abläufen der Abwasserreinigungsanlagen sind in den Genehmigungsbescheiden festgelegt. Ein Vergleich mit den von den Benchmarking-Partnern für das Jahr 2000 angegebenen Konzentrationswerten von CSB und BSB₅ im Ablauf der Nachklärung zeigt, dass sowohl die als Mittelwert angegebenen Konzentrationswerte als auch die auftretenden Maximalkonzentrationen von CSB und BSB₅ unterhalb der jeweiligen Überwachungswerte liegen. Einzige Ausnahme ist Papierfabrik B, bei der mit einem maximalen CSB-Wert von 206 mg/l eine Überschreitung des für sie geltenden Überwachungswertes von 140 mg/l auftrat.

Der zu erwartende Rest-CSB im Ablauf von biologischen Abwasserreinigungsanlagen lässt sich mit Hilfe von Modellrechnungen näherungsweise bestimmen. Nach einem in einer der am Projekt beteiligten Forschungsstellen auf der Grundlage von statistischen Datenauswertungen entwickelten Rechenmodell können für die untersuchten Abwasserreinigungsanlagen Rest-CSB-Werte im Bereich von 80 mg/l (PF-A) und 210 mg/l (PF-B) erzielt werden. Diese Rest-CSB-Werte errechnen sich aus den CSB-Zulaufkonzentrationen unter der Annahme einer nahezu vollständigen BSB₅-Elimination.

Abb.32 zeigt eine Gegenüberstellung der CSB-Überwachungswerte aus dem Genehmigungsbescheid, der CSB-Jahresmittelwerte, gemessen im Ablauf der Nachklärung, und der Näherungswerte für den Rest-CSB aus der Modellrechnung. Die CSB-Jahresmittelwerte im Ablauf der Nachklärung liegen bei allen Benchmarking-Partnern zum Teil deutlich unter den entsprechenden Überwachungswerten der Genehmigungsbescheide. Ein Vergleich der im Ablauf der Nachklärung gemessenen Mittelwerte für den Rest-CSB mit den aus der Modellrechnung resultierenden Rest-CSB-Werten zeigt, dass

- in den Papierfabriken A, B, C, D, E und bedingt auch in Papierfabrik E die gemessenen Rest-CSB-Werte gut mit den berechneten Rest-CSB-Werten übereinstimmen.
- in Papierfabrik C der gemessene Rest-CSB-Wert (350 mg/l) deutlich über dem berechneten Rest-CSB-Wert (210 mg/l) liegt. Dies wiederum würde bedeuten, dass in dieser Papierfabrik, die im Ranking der technischen Leistung der Gesamtanlage den ersten Platz belegt, durchaus noch ein Potenzial zur Effizienzsteigerung gegeben ist.

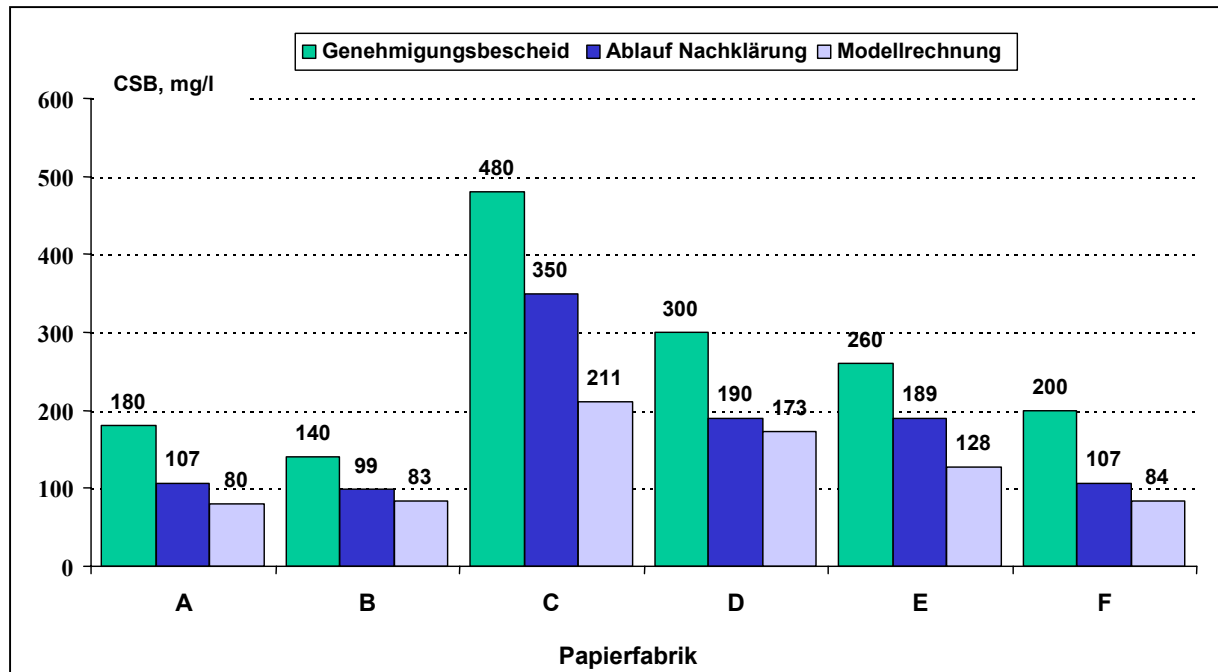


Abb.32: Vergleich der Rest-CSB-Werte: Genehmigungsbescheid, Ablauf Nachklärung, Modellrechnung

8.2. Wirtschaftliche Effizienz

Die wirtschaftliche Effizienz der Abwasserreinigungsanlagen wird am Kostenaufwand bemessen, der zur Behandlung des Abwassers bzw. zur Eliminierung der CSB-Fracht erforderlich ist. Grundsätzlich sind dabei neben den Betriebskosten die Investitions- und Kapitalkosten für die Abwasserreinigungsanlage einzubeziehen. Im vorliegenden Projekt musste auf den Einbezug der Investitions- und Kapitalkosten verzichtet werden. Um die Wirtschaftlichkeit der Abwasserreinigung vergleichen zu können, wurden die Gesamtkosten ermittelt, die sich aus den Kosten zum Betreiben der Abwasserreinigungsanlagen, den Kosten zur Entsorgung des Überschussschlammes sowie der behördlich festgesetzten Abwasserabgabe zusammensetzen. Schwerpunktmäßig wurden die spez. Gesamtkosten, bezogen auf die eliminierte CSB-Fracht, betrachtet. Zusätzlich wurden die spez. Gesamtkosten, bezogen auf Abwassereinheiten (AE), sowie die spez. Gesamtkosten, bezogen auf Abwassermenge, ermittelt.

8.2.1. Spez. Gesamtkosten, bezogen auf eliminierte CSB-Fracht.

Für die auf die eliminierte CSB-Fracht bezogenen spez. Gesamtkosten, als Summe aus allgemeinen Betriebskosten und Abwasserabgabe ergibt sich eine Spannweite von 78,07 €/t CSB_{elim} (PF-F) bis 162,64 €/t CSB_{elim} (PF-C). Zu den kostenintensiven Anlagen zählen gemäß **Abb.33** die Abwasserreinigungsanlagen von Papierfabrik C (162,64 €/t CSB_{elim}), Papierfabrik A (161,52 €/t CSB_{elim}) und Papierfabrik B (152,11 €/t CSB_{elim}). Wesentlich niedrigere spez. Gesamtkosten ergeben sich für Papierfabrik E (105,14 €/t CSB_{elim}) und Papierfabrik F (79,68 €/t CSB_{elim}). Am kostengünstigsten wird die Abwasserreinigungsanlage von Papierfabrik D (78,07 €/t CSB_{elim}) betrieben.

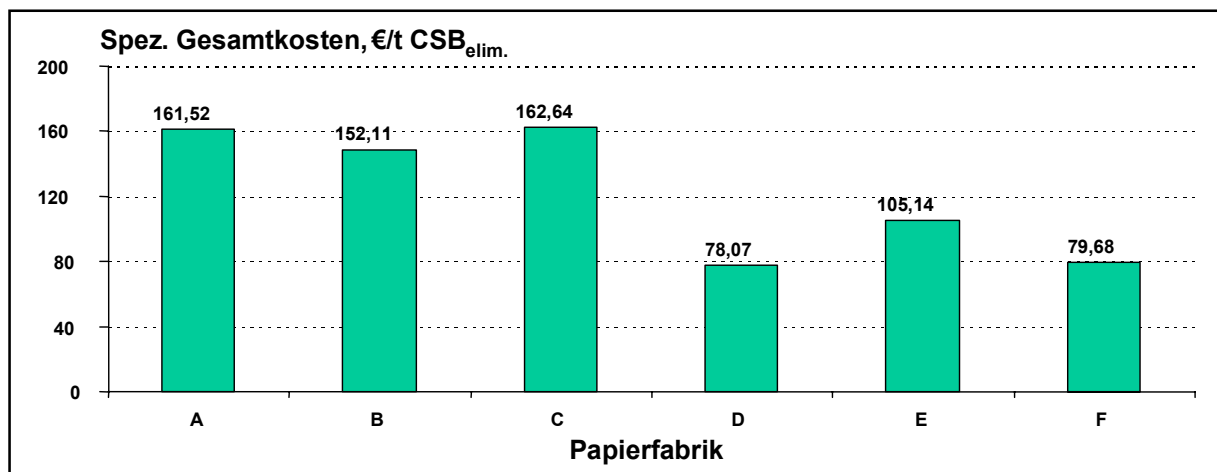


Abb. 33: Spez. Gesamtkosten, bezogen auf eliminierten CSB

Die großen Unterschiede der spez. Gesamtkosten sind Folge der zum Teil großen Streubreite, die bei den Einzelpositionen der allgemeinen Betriebskosten gegeben ist. Zu den Einzelpositionen der Betriebskosten zählen die Kosten für Chemikalienkosten, die Energiekosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten, Personalkosten sowie die Kosten für die Entsorgung des Überschussschlammes.

8.2.1.1. Spez. Chemikalienkosten

Die Spannweite der spez. Chemikalienkosten, die die Kosten für Flockungsmittel, Entschäumer, Harnstoff, Phosphorsäure, Natronlauge sowie Kosten für die Position ‚sonstige Chemikalien‘ enthalten, reicht von 10,82 €/t CSB_{elim} (PF-F) bis 38,16 €/t CSB_{elim} (**Abb.34**). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Unterschiede bei den spez.

Chemikalienkosten sowohl durch unterschiedliche Einsatzmengen als auch durch unterschiedliche Gestehungskosten für die einzelnen Chemikalien entstehen können.

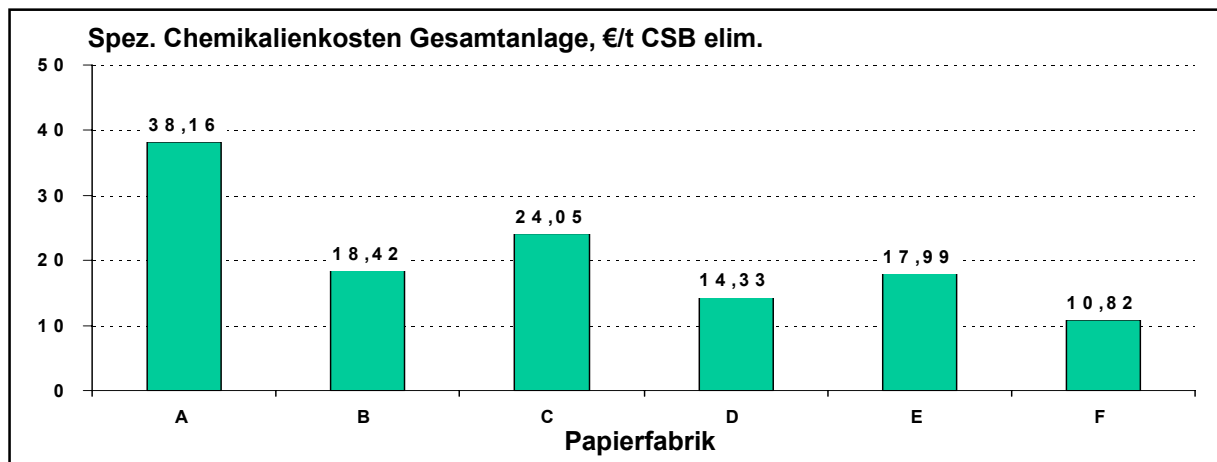


Abb.34: Spez. Chemikalienkosten, bezogen auf eliminierten CSB

Bei den Flockungsmitteln liegt der Kostenaufwand der einzelnen Papierfabriken zwischen 0,6 €/t CSB_{elim} (PF-F) und 6,8 €/t CSB_{elim} (PF-C). Die Papierfabriken D und E setzen keine Flockungsmittel ein. Für Entschäumer werden zwischen 0,1 €/t CSB_{elim} (PF-F) und 4,1 €/t CSB_{elim} (PF-A) aufgewendet. Die Papierfabriken B und C setzen keine Entschäumer ein.

Natronlauge wird zur Reinigung des Biogases und zur Einstellung des pH-Wertes nach der Versäuerung eingesetzt. Die Kosten schwanken zwischen 3,11 €/t CSB_{elim} (PF-F) und 13,92 €/t CSB_{elim} (PF-C). Eine weitere Differenzierung der Kosten nach Verwendungszweck (pH-Wert-Einstellung, Biogaswäsche) konnte nicht durchgeführt werden, da die diesbezüglichen Angaben in den Fragebögen von den meisten Benchmarking-Partnern nicht gemacht wurden.

Harnstoff und Phosphorsäure werden als Nährstoffe bzw. als Stickstoff- und Phosphorquelle für die anaerobe und aerobe Mikroorganismen-Biozönose eingesetzt. Die anfallenden Kosten liegen für Harnstoff zwischen 1,79 €/t CSB_{elim} (PF-C) und 4,23 €/t CSB_{elim} (PF-A), die Kosten für die Phosphorsäure zwischen 1,12 €/t CSB_{elim} (PF-E) und 4,30 €/t CSB_{elim} (PF-F).

Für die Position ‚sonstige Chemikalien‘ ergeben sich Kosten zwischen 2,8 €/t CSB_{elim} (PF-D) und 7,2 €/t CSB_{elim} (PF-A). Die Papierfabriken B und C setzen keine zusätzlichen Chemikalien ein.

Tab.25 zeigt eine Übersicht über die spez. Kosten, bezogen auf den eliminierten CSB, die die Papierfabriken für die einzelnen chemischen Hilfsmittel aufwenden. Daraus ist zu erkennen, dass in den Papierfabriken A und C, die in der Summe die höchsten spez. Chemikalienkosten aufweisen, Einsparungen insbesondere bei den

Positionen Flockungsmittel und Natronlauge geprüft werden sollten. Bei Papierfabrik A fallen zudem die relativ hohen Kosten für Entschäumer sowie die hohen Kosten, die unter der Position ‚sonstige Chemikalien‘ genannt sind, auf.

Tab.25: Spez. Chemikalienkosten, bezogen auf eliminierten CSB

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Flockungsmittel	€/t CSB _{elim}	5,37	2,72	6,83	0	0	0,61
Entschäumer	€/t CSB _{elim}	4,11	0	0	0,73	1,31	0,14
Natronlauge	€/t CSB _{elim}	13,40	10,69	13,92	6,60	8,29	3,11
Harnstoff	€/t CSB _{elim}	4,23	1,95	1,79	2,44	3,19	2,66
Phosphorsäure, prim. Ammon.-phosphat	€/t CSB _{elim}	** 3,88	3,05	1,51	1,78	1,12	4,30
Sonst. Chemik.	€/t CSB _{elim}	7,18	0	0	2,79	4,09	0
Summe	€/t CSB _{elim}	38,16	18,42	24,05	14,33	17,99	10,82

** Papierfabrik A setzt anstelle der Phosphorsäure prim. Ammoniumphosphat ein.

Die Einsatzmenge von Harnstoff und Phosphorsäure als Nährstoffe für die Mikroorganismen orientiert sich an der zu eliminierenden CSB-Fracht, d.h. der aus Harnstoff und Phosphorsäure verfügbare Stickstoff bzw. Phosphor muss in einem bestimmten Verhältnis zur CSB-Fracht stehen.

Für eine CSB-Fracht von 1000 kg müssen in einer zweistufigen anaeroben/aeroben biologischen Abwasserreinigungsanlage bei einem CSB-Abbau von insgesamt 95% theoretisch 8,6 kg Stickstoff und 1,7 kg Phosphor zudosiert werden. Die Annahmen, die dieser Berechnung zugrunde liegen, sind in **Tab.26** zusammengefasst.

Tab.26: Annahmen zur Berechnung des Nährstoffbedarfs in einer zweistufigen biologischen Abwasserreinigungsanlage

	CSB-Abbaugrad, bezogen auf Zulauf-Fracht	In Biomasse umgesetzter Kohlenstoff aus dem CSB-Abbau
	%	%
Anaerob-Stufe	80	5
Aerob-Stufe	15	50
Gesamt-Anlage	95	
Anteil in Biomasse-TS	Kohlenstoff: 50%, Stickstoff: 10%, Phosphor: 2%	

Aus den von den Papierfabriken angegebenen Einsatzmengen von Harnstoff und Phosphorsäure ergeben sich die in **Tab.27** aufgeführten Mengenverhältnisse von CSB, Stickstoff und Phosphor. Bei der Berechnung der N-Menge in Papierfabrik A wurde der zusätzlich aus dem prim. Ammoniumphosphat verfügbare Stickstoff mit berücksichtigt.

Tab.27: CSB:N:P–Verhältnis im Zulauf zur Abwasserreinigungsanlage

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F	Theoret. Werte
CSB	kg	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
N	kg	8,6	4,5	2,8	1,9	3,0	8,1	8,6
P	kg	1,6	1,0	0,8	0,9	0,8	2,8	1,7

Papierfabrik A arbeitet mit dem theoretisch notwendigen Nährstoffverhältnis. Die Papierfabriken B, C, D und E setzen erheblich weniger Stickstoff und Phosphor ein, erreichen aber trotzdem einen CSB-Abbau von insgesamt 95%. Papierfabrik F setzt mit 2,8 kg P/1000 kg CSB erheblich mehr Phosphor in Form von Phosphorsäure ein als die übrigen Benchmarking-Partner.

8.2.1.2. Spez. Energiekosten

Die von den Benchmarking-Partnern im Fragebogen angegebenen jährlichen Energiekosten (€/a) beinhalten in allen Fällen den vom Energieversorger für die entsprechende Energiemenge erhobenen Arbeitspreis sowie den Leistungspreis. Aus den jährlichen Energiekosten (€/a) und dem jährlichen Energiebedarf (kWh/a) errechnen sich für die Benchmarking-Partner Gestehungskosten zwischen 0,027 €/kWh (PF-F) und 0,061 €/kWh (PF-D). Der auf den eliminierten CSB bezogene spez. Energiebedarf für den Betrieb der Anlage und die Belüftung der Belebungsbecken liegt zwischen 234,9 kWh/t CSB_{elim} (PF-F) und 1088,6 kWh/t CSB_{elim} (**Tab.28**). Daraus ergeben sich auf den eliminierten CSB bezogene spez. Energiekosten zwischen 6,46 €/t CSB_{elim} (PF-F) und 38,96 €/t CSB_{elim} (PF-B) (**Abb.35**).

In kommunalen Kläranlagen entfallen auf die Deckung des Energiebedarfs 10% bis 20% der Gesamtbetriebskosten, wobei angestrebt wird, durch Optimierungsmaßnahmen den Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten weiter zu senken. Bei den in diesem Projekt untersuchten Abwasserreinigungsanlagen liegt der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten zwischen 8,1% (PF-F) und 28,8% (PF-D) (**Abb.36**). Insbesondere bei den Papierfabriken mit einem Energiekostenanteil von

> 20% an den Gesamtbetriebskosten (PF-A: 20,2%, PF-B: 26,2%, PF-D: 28,8%) sollte die Effizienz der ‚Energieverbraucher‘ in der Abwasserreinigungsanlage überprüft werden.

Tab.28: Energiekosten und auf eliminierten CSB bezogener spez. Energiebedarf

Papierfabrik		A	B	C	D	E	F
Energiekosten	€/kWh	0,036	0,036	0,029	0,061	0,033	0,027
Spez. Energiebedarf	kWh/t CSB _{elim}	915,2	1088,6	594,3	366,8	539,1	234,9

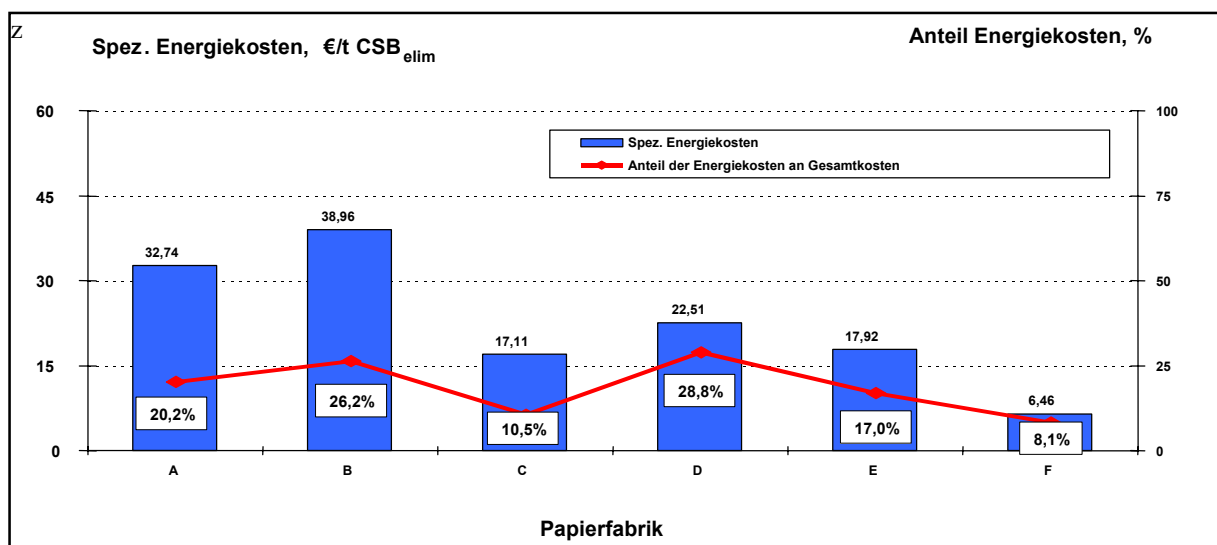


Abb.35: Spez. Energiekosten, bez. auf eliminierten CSB, sowie prozentualer Anteil der Energiekosten bez. auf Gesamtkosten

8.2.1.3. Spez. Wartungs- und Instandhaltungskosten

Zur Berechnung der spez. Wartungs- und Instandhaltungskosten wurde der Mittelwert, der sich aus den jährlichen Kosten der letzten fünf Jahre ergab, herangezogen. Damit sollten Aufwendungen für größere, nicht regelmäßig auftretende Investitionen ausgeglichen werden.

Für Wartung und Instandhaltung der Abwasserreinigungsanlagen werden von den Benchmarking-Partnern zwischen 16,49 €/t CSB_{elim} (PF-D) und 59,47 €/t CSB_{elim} (PF-C) eingesetzt, wobei Papierfabrik C einen deutlich höheren Betrag aufwendet als die übrigen Benchmarking-Teilnehmer (**Abb.36**). Die für Wartung/Instandhaltung an-

gegebenen Kosten enthalten die Kosten für die geleistete Arbeit sowie Materialkosten bzw. Kosten für Ersatzteile von Maschinenaggregaten und Geräten. Eine getrennte Auflistung von Arbeitskosten und Materialkosten sowie die Aufschlüsselung der Materialkosten war in den Fragebogen nicht vorgesehen.

Da Wartungs- und Instandhaltungskosten sowohl von der Dimensionierung der Anlage als auch von Qualität und Umfang der apparativen Ausrüstung (Pumpen, Belüftungsaggregate, Messeinrichtungen) abhängig sind, ist für den Kostenvergleich der Papierfabriken untereinander eine detailliertere Aufschlüsselung erforderlich. Die Aufschlüsselung der Wartungs- und Instandhaltungskosten würde einen Überblick über die Wartungsintensität der einzelnen Anlagenteile ermöglichen und damit einen Kostenvergleich erleichtern bzw. eine gezielte Empfehlung zur Optimierung dieser Kostenart erlauben.

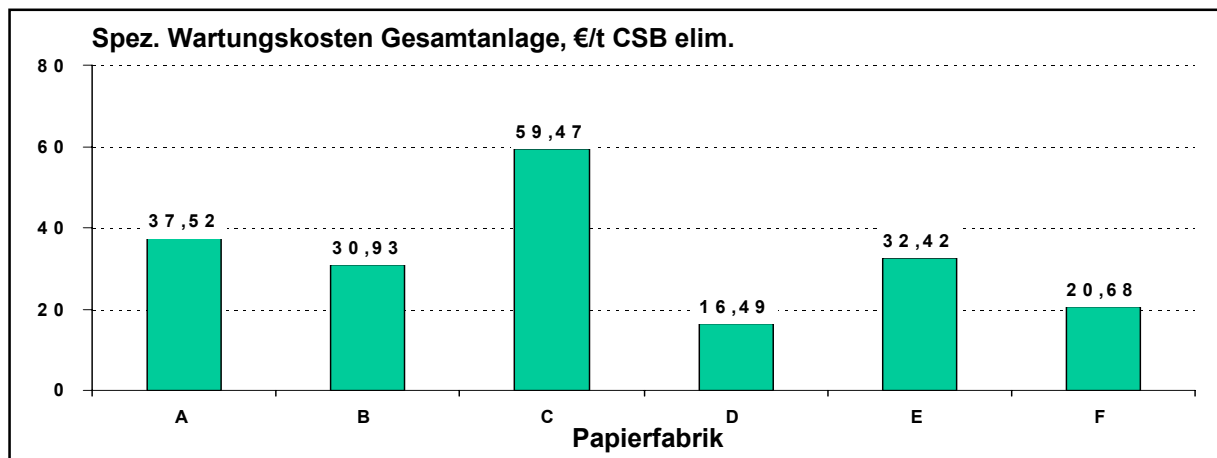


Abb.36: Spez. Wartungskosten, bez. auf eliminierten CSB

8.2.1.4. Spez. Personalkosten

Die auf den eliminierten CSB bezogenen spez. Personalkosten liegen im Bereich von 7,91 €/t CSB_{elim} (PF-D) und 25,79 €/t CSB_{elim} (PF-A) (**Abb.37**). Darin enthalten sind die Kosten für die technische Betreuung der Anlage sowie die Kosten für die analytische Kontrolle des Abwassers und der anfallenden Bioschlämme. Die exakte Quantifizierung der Personalkosten ist problematisch, da die entsprechenden Personalkräfte oftmals nicht ausschließlich für diese Aufgaben eingesetzt werden, sondern teilweise neben Betreuung und/oder Kontrolle der Anlage noch für andere Verantwortungsbereiche (z.B. Kraftwerk) zuständig sind. Aus Abb.37 ist zu erkennen, dass die spez. Personalkosten der Papierfabriken A, B und C um ein Mehrfaches höher liegen als die spez. Personalkosten der Papierfabriken D, E und F.

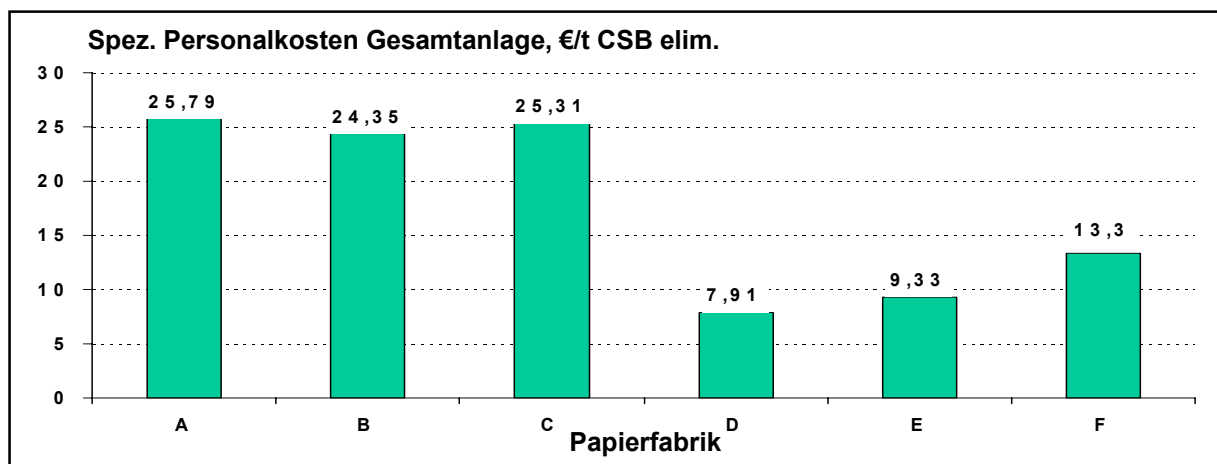


Abb.37: Spez. Personalkosten, bez. auf eliminierten CSB

8.2.1.5. Spez. Kosten für die Überschussschlamm-Entsorgung

Kosten für die Schlamm Entsorgung entstehen nur bei Papierfabrik B (8,28 €/t CSB_{elim}) und Papierfabrik C (22,78 €/t CSB_{elim}). Papierfabrik B liefert den entwässerten Überschussschlamm zusammen mit Fein-Rejekten aus der Altpapier-aufbereitung als Porosierungsmittel an Ziegeleien. Der Überschussschlamm von Papierfabrik C wird zur Rekultivierung eingesetzt. Die Papierfabriken D, E und F führen den Überschussschlamm in die Produktion zurück. In Papierfabrik A wird der Schlamm in einer werkseigenen Verbrennungsanlage energetisch genutzt.

8.3. Spez. Gesamtkosten, bezogen auf Abwassereinheiten

Die Berechnung von Abwassereinheiten ermöglicht einen Leistungsvergleich von Abwasserreinigungsanlagen, der die zu eliminierende CSB-Fracht und die zu behandelnde Abwassermenge einschließt, Faktoren also, die die Betriebskosten einer ARA wesentlich beeinflussen. Mit steigender CSB-Fracht erhöhen sich z.B. die Chemikalienkosten, mit steigender Abwassermenge wächst z.B. der Energiebedarf für Pumpen und Belüftung. Die Angaben von auf Abwassereinheiten bezogenen spez. Gesamtkosten erscheint daher sinnvoll und hinsichtlich einer Beurteilung der Kosteneffizienz noch weitgehender als ein Bezug nur auf den eliminierten CSB.

Der Bezug der Gesamtkosten auf die nach Gleichung 1 in Kap. 6.3.4. berechneten Abwassereinheiten liefert spez. Kosten im Bereich von 5,93 €/AE (PF-F) bis 12,55 €/AE (PF-C) (**Abb.38**). Die Reihenfolge in der Kosteneffizienz unterscheidet sich nicht von der Reihenfolge, die beim Vergleich der auf den eliminierten CSB be-

zogenen spez. Gesamtkosten erhalten wird. Papierfabrik F fährt die Abwasserreinigungsanlage am kostengünstigsten, Papierfabrik C hat die kostenintensivste Anlage.

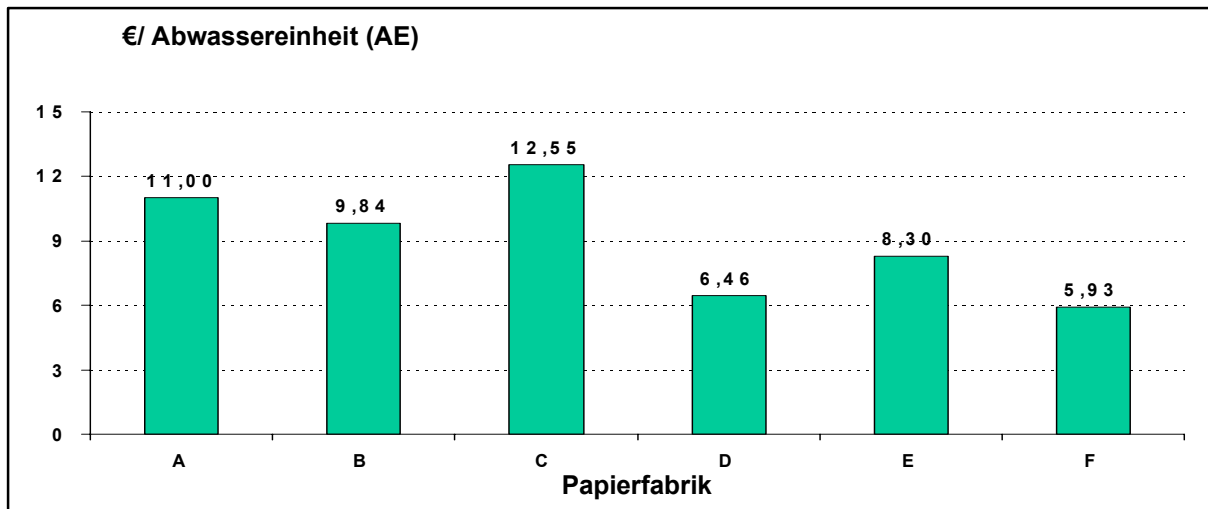


Abb.38: Spez. Gesamtkosten, bez. auf Abwassereinheiten

9. Zusammenfassung

Die in das Benchmarking einbezogenen anaeroben/aeroben Abwasserreinigungsanlagen von sechs altpapierverarbeitenden Papierfabriken unterscheiden sich hinsichtlich des prozentualen CSB- und BSB₅-Abbaus nicht wesentlich. In den Gesamtanlagen werden CSB-Abbaugrade zwischen 94,5% und 96,5% erzielt, der BSB₅-Abbau beträgt für sämtliche Anlagen mehr als 99%. Unterschiede in den Abbaugraden der Anaerob-Stufen (75 bis 85%) werden durch höhere Abbaugrade in der Aerob-Stufe kompensiert.

Deutlichere Unterschiede ergeben sich für die spezifischen CSB-Abbauraten, die die Volumina der Abwasserreinigungsanlagen sowie den Abwasserdurchsatz und die Abwasserbelastung, also die CSB-Fracht, berücksichtigen. Diese reichen für die Gesamtanlage von 1,6 kg CSB/m³d bis 3,9 kg CSB/m³d. Die höchste CSB-Abbaurrate wird in Papierfabrik C erzielt, in der im Gegensatz zu den anderen Benchmarking-Partnern kein "konventioneller" UASB-Reaktor betrieben wird, sondern eine Weiterentwicklung dieses Reaktortyps, die deutlich höhere Raumbelastungen zulässt.

Der Kostenvergleich beschränkte sich in dem durchgeführten Benchmarking auf die jährlichen Betriebskosten und die Abwasserabgabe. Auf einen Einbezug von Investitions- und Kapitalkosten wurde aufgrund des zum Teil sehr unterschiedlichen Alters der Anlagen und der Tatsache, dass die meisten der Abwasserreinigungsanlagen durch Erweiterungen „gewachsen“ sind, verzichtet.

Die Betriebskosten wurden untergliedert in die jährlichen Kosten für Energie, Chemikalien, Personal, Wartung und Schlamm Entsorgung. Eine Energiegutschrift durch die Verbrennung des in den Anaerobreaktoren gebildeten Biogases erfolgte nicht, da die aus den Angaben der Papierfabriken ermittelten Biogasbildungsraten aus nicht nachvollziehbaren Gründen stark schwankten.

In **Abb.39** sind die Ergebnisse des Betriebskostenvergleichs in leicht anschaulicher Form dargestellt. Die Ecken des äußeren Fünfecks kennzeichnen für die jeweilige Kostenkategorie den Benchmark. Würde eine Abwasserreinigungsanlage in allen fünf Kostenkategorien gleichermaßen die niedrigsten Kosten aufweisen, so wären die stärker gezeichneten Fünfecke deckungsgleich mit den äußeren Fünfecken. Aus der Fläche der inneren Fünfecke lässt sich ableiten, dass die Papierfabriken F und D und mit Abstrichen auch Papierfabrik E ihre Abwasserreinigungsanlagen sehr kosteneffizient betreiben. Bei den Papierfabriken A, B und insbesondere bei Papierfabrik C sollte noch ein erhebliches Potenzial zur Erniedrigung der jährlichen Betriebskosten vorhanden sein. Dies bezieht sich allerdings nicht in allen Fällen auf die Schlamm Entsorgung, denn der Benchmark in dieser Kostenkategorie, die Rückfüh-

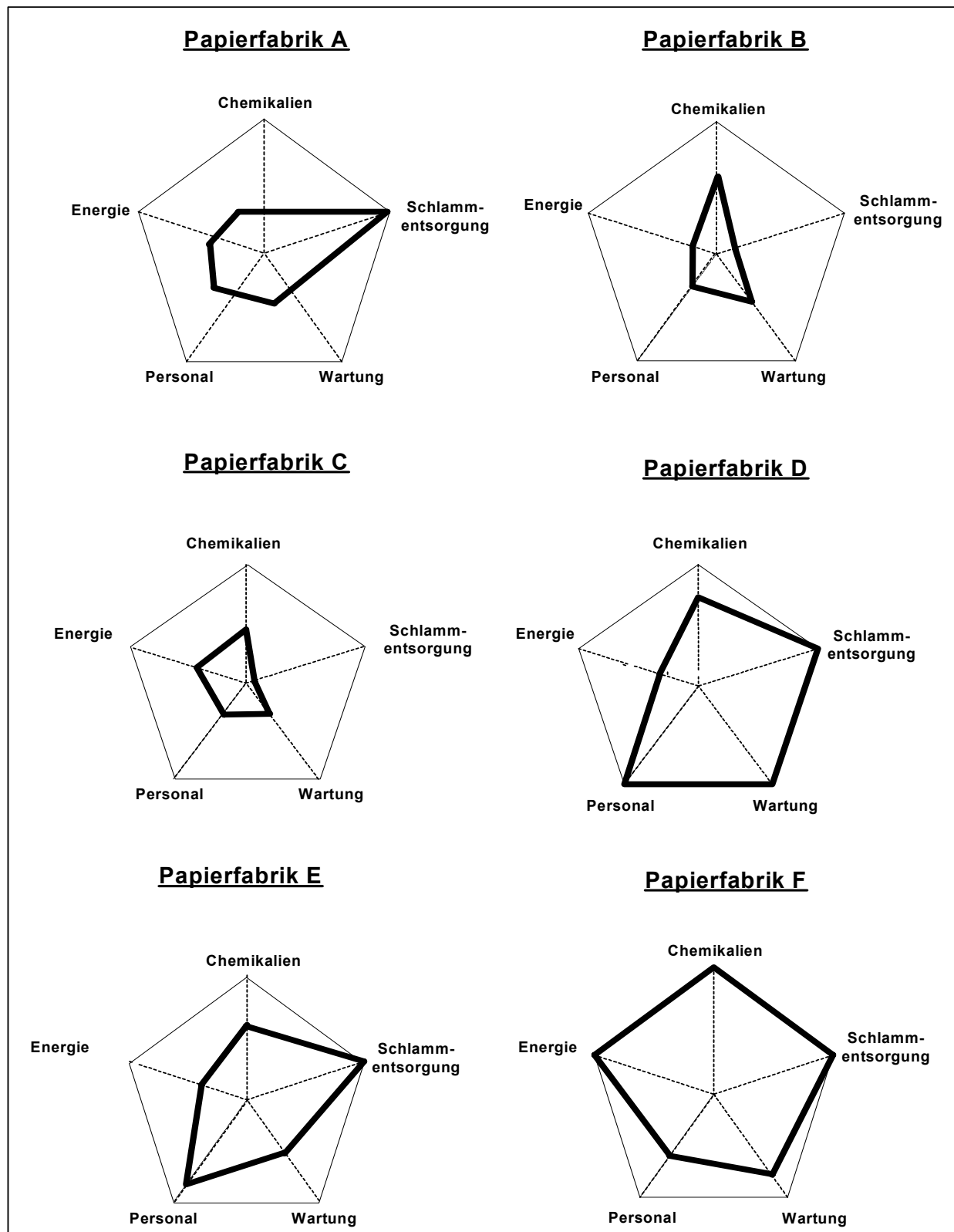


Abb.39: Betriebskostenvergleich der Abwasserreinigungsanlagen (äußerer Ring = Benchmarks)

zung des Belebtschlamm in die Produktion, kann nicht unabhängig von der Qualität der produzierten Papier- bzw. Kartonsorten gesehen werden.

Der in **Abb.40** dargestellte Vergleich von auf 1 Tonne eliminierten CSB bezogenen Gesamtbetriebskosten und den in den verschiedenen Abwassereinigungsanlagen erzielten CSB-Abbauraten zeigt, dass Leistungs- und Kosteneffizienz nicht korrelieren. So hat Papierfabrik A, die die schlechtesten leistungsbezogenen Kenngrößen aufzuweisen hat, mit die höchsten Kosten. Auf der anderen Seite nimmt die unter Leistungsgesichtspunkten sehr effizient arbeitende Abwasserreinigungsanlage von Papierfabrik C im Ranking der Kosteneffizienz den letzten Platz ein.

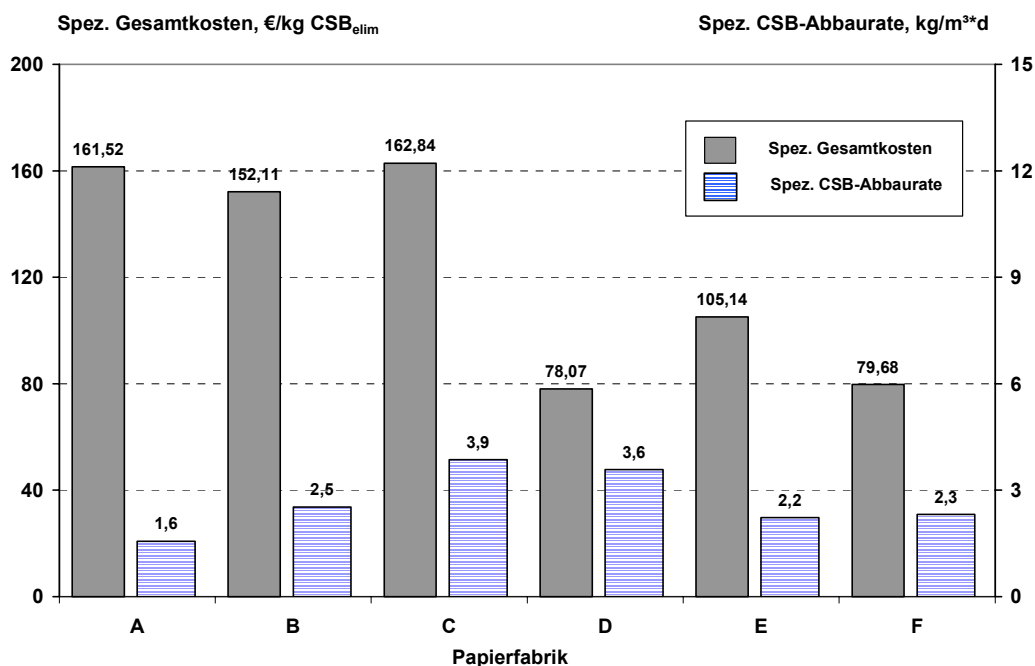


Abb.40: Gegenüberstellung von spez. Gesamtkosten und spez. CSB-Abbauraten

Im Rahmen dieses Projekts wurde versucht, kosten- und leistungsbezogene Kenngrößen zu einer Kennzahl zusammenzufassen, wobei Kosten- und Reinigungseffizienz gleich gewichtet wurden. Zwei erstmals angewandte Modellrechnungen ergeben die folgende Rangfolge:

1. Rang: Papierfabrik D
2. Rang: Papierfabrik F
3. Rang: Papierfabrik E
4. Rang: Papierfabrik C
5. Rang: Papierfabrik B
6. Rang: Papierfabrik A

Bei der am Ende der Rangfolge platzierten Papierfabrik A wirkt sich bei den Berechnungen aus, dass das Volumen der Belebungsbecken im Vergleich zu den anderen Papierfabriken sehr großzügig bemessen ist. In diesem Betrieb sollte geprüft werden, ob eine Verringerung des Volumens möglich ist, allerdings mit der Maßgabe, dass die Anlagenstabilität (Einhaltung der Ablaufwerte) nicht negativ beeinflusst wird. Dies gilt in eingeschränktem Maße auch für Papierfabrik E. Für die restlichen Papierfabriken werden die in **Tab.29** zusammengefassten Maßnahmen zur Senkung der Betriebskosten empfohlen. In allen Werken sollte geprüft werden, ob eine weitergehende Verrechnung der Abwasserabgabe möglich ist. Einschränkend ist darauf hinzuweisen, dass trotz der Ähnlichkeiten in Bezug auf die Abwasserreinigungsanlagen die betrachteten Papierfabriken unterschiedliche Voraussetzungen auf der Produktionsseite aufweisen, die beispielsweise unterschiedliche spez. Abwassermengen erfordern. Ein Betrieb, der seine spez. Abwassermenge sortenprogrammbedingt nicht beliebig senken kann, wird voraussichtlich zu höheren Reinigungskosten kommen als andere Werke.

Tab.29: Aus dem Benchmarking abgeleitete Empfehlungen an die Benchmarking-Partner

Papierfabrik	Empfehlung
A	Reduzierung des Volumens der Belebungsstufe prüfen. Maßnahmen zur Reduzierung von Chemikalien-, Energie-, Personal- und Wartungskosten prüfen. Einsatz von Entschäumern prüfen
B	Maßnahmen zur Senkung von Energie-, Personal- und Wartungskosten prüfen. Möglichkeit einer Überschussschlammrückführung in die Produktion prüfen.
C	Maßnahmen zur Verbesserung des CSB-Abbaus im IC-Reaktor prüfen. Sämtliche Betriebskosten einschließlich Schlammmentsorgungskosten sind auf das noch vorhandene erhebliche Optimierungspotenzial zu prüfen.
D	Maßnahmen zur Reduzierung der Energie- und Chemikalienkosten prüfen.
E	Reduzierung des Volumens der Belebungsstufe prüfen. Maßnahmen zur Senkung von Energie-, Wartungs- und Chemikalienkosten prüfen.
F	Phosphorsäure-Einsatzmengen prüfen.

10. Dank

Der INFOR-Forschungsrat im Kuratorium für Forschung und Technik des VDP, Bonn, hat das Institut für Papierfabrikation an der TU Darmstadt und die Papiertechnische Stiftung München mit der Durchführung dieses Projektes beauftragt. Unser Dank gilt den Mitgliedern des INFOR-Forschungsrats. Besonders bedanken möchten wir uns bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses, die anlässlich der 1. Projektbegleiter-Sitzung wertvolle Anregungen zur Projektdurchführung und insbesondere zur Gestaltung des Fragebogens einbrachten. Im projektbegleitenden Ausschuss arbeiteten mit:

Th. Krabel, SCA Packaging Witzenhausen

Dr. Ch. Möbius, CM-Consult, Augsburg (Projektsprecher)

S. Pusch, Zanders Feinpapiere AG, Bergisch-Gladbach

Dr. W. Rixen, Kanzan Spezialpapiere, Düren

J. Schulz, Europa Carton, Hoya

Unser spezieller Dank gilt den Papierfabriken, die sich am Projekt beteiligten und hier insbesondere den für die Abwasserreinigungsanlagen zuständigen Mitarbeitern. Sie lieferten uns Datenmaterial, das in seinem Umfang weit über das in früheren Umfragen abgeforderte Datenmaterial hinausging. Wir bedanken uns für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und das bei Rückfragen gezeigte Verständnis.

11. Literatur

1. ATV – DVWK – ad-hoc Arbeitsgruppe WI-00.1:
Arbeitsbericht ‚Benchmarking‘.
Herausgeber: ATV-DVWK – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft,
Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 2001
2. P. Evers, T. Grünebaum und I. Wilde:
Leistungskennzahlen als Grundlage für vergleichende
Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in der Siedlungswasserwirtschaft.
Wasser-Abwasser 140 (1999), Nr. 4, 253-258
3. S. Wibbe:
Benchmarking in der Abwasserwirtschaft.
Korrespondenz Abwasser 46 (1999), Nr. 9, 1432-1436
4. A. Rausch:
Kennzahlen, Kosten- und Betriebsvergleiche der
Abwasserversorgungsbetriebe in Österreich.
5. A. Schulz, J. Schön, H. Schauerte, P. Graf und W. Averkamp:
Benchmarking in der Abwasserbehandlung.
Korrespondenz Abwasser 45 (1998), Nr. 12, 2297-2302
6. R.J. Admiraal und W.R. van Heemst
Benchmarking in der niederländischen Wasserwirtschaft.
Korrespondenz Abwasser 47 (2000), Nr. 8, 1172-1175
7. H. Bode und T. Grünebaum:
The cost of municipal sewage treatment – structure, origin, minimization –
methods of fair cost comparison and allocation.
Water Science and Technology 41 (2000), Nr. 9, 289-298
8. W. van Starckenburg:
Kennzahlen, Kosten und Betriebsvergleiche.
GWA 79 (1999), Nr. 7, 572-575
9. J. Pinnekamp:
Kosten der Abwasserreinigung im internationalen Vergleich.
GWA 79 (1999), Nr. 7, 576-584
10. H.-G. Baum, J. Cantner, U. Cantner, H. Hanusch, R.P. Przybilla und
B. Stegmann:
Sektor-Controlling mittels Benchmarking am Beispiel von Abfallverbrennungsanlagen.
Müll und Abfall 34 (2002), Nr. 4, 24-29
11. C.H. Möbius:
Benchmarking im Bereich Abwasser Papiererzeugung.
Tagungsband PTS-Umwelttechnik/Environmental Technology Symposium 1999,
München, 1999
12. E.C. Harrington:
The Desirability Function.
Industrial Quality Control 21 (1965), Nr. 10, 494-498
13. H. Gonera und J. Dabrowsky:
The generalised scale of quality in assessing the recycling process
of mixed recovered paper.
2nd CTP/PTS Packaging Paper & Board Recycling Symposium, Grenoble, 2001
14. R. Spörl, A. Wagenknecht und I. Demel:
Rest-CSB-Konzentrationen im biologisch gereinigten Abwasser Altpapier verarbeitender
Papierfabriken.
ipw - Das Papier (2002), Nr. 6, T 103 – T 109

12. Anhang

Der beigefügte Fragebogen wurde an die Benchmarking-Partner verschickt.

Anlage

Projektbearbeitung

IfP TU Darmstadt
Herr Dr.-Ing. U.Hamm
Frau Dipl. Ing. (FH) B. Bobek
Alexanderstr. 8
64283 Darmstadt
Tel. 06151/163008

PTS München
Frau Dipl.-Ing. I. Demel
Herr Dipl. Ing. (FH) F. Schmid
Heißstraße 134
80797 München
Tel. 089/12446-64

DATENERHEBUNG ZUM INFOR-PROJEKT "BENCHMARKING"

Firma / Werk:

.....

Anschrift:

.....

Ansprechpartner:
(Name und Funktion)

Telefon: Telefax:

e-mail:

Werkscod (wird bei Bearbeitung vergeben):

SÄMTLICHE EINTRAGUNGEN IM ERFASSUNGSBOGEN (FIRMENNAMEN, ZAHLENANGABEN) WERDEN STRENG VERTRAULICH BEHANDELT UND ANONYMISIERT.

1 Produktionsdaten

1.1 Angaben zu Produktion, Frischwassereinsatz und spezifischer Abwassermenge

Anzahl der Papier-/Kartonmaschinen: _____

Bezeichnung der Papier- bzw. Kartonmaschinen (PM Nr. bzw. KM Nr.)	Produktsorten	Produktion t/a (brutto)	Produktion t/a (netto)

Frischwassereinsatz (bezog. auf Brutto-Produktion) m^3/t _____

Spez. Abwassermenge (bezog. auf Brutto-Produktion) m^3/t _____

1.2 Angaben zum Rohstoffeinsatz

Welche Mengen Altpapier und/oder Zellstoff werden eingesetzt?

Rohstoff		PM/KM Nr.	PM/KM Nr.	PM/KM Nr.
Altpapier	t/a			
Zellstoff	t/a			

In welchem Mischungsverhältnis wurden die Rohstoffe an der (den) Papiermaschine(n) eingesetzt?

	Anteil	PM/KM Nr.	PM/KM Nr.	PM/KM Nr.
Zellstoff	%			
Altpapier-Sorte				
	%			
	%			
	%			
	%			
	%			

1.3 Angaben zum Einsatz von chemischen Hilfsmitteln

	Einheit	PM/KM Nr.	PM/KM Nr.	PM/KM Nr.
Leimungsmittel: Bezeichnung				
Menge	t/a			
Stärke (nähere Bezeichnung)				
Menge	t/a			
Biozide	t/a			
Retentionsmittel	t/a			
Nassfestmittel	t/a			
Sonstige				
	t/a			
	t/a			
	t/a			

2 Chemisch/mechanische Abwasserreinigung

2.1 Auslegung der Anlage

Nutzvolumen des vorgeschalteten Hydraulischen Puffers _____ m³

		Flotation	Sedimentation	Filtration
Durchsatzmenge	m ³ /d			
Arbeitsfläche	m ²			

2.2 Welche chemischen Hilfsmittel werden eingesetzt?

☐ Organische Flockungsmittel

☐ anionisch

☐ kationisch

☐ nichtionisch

☐ Anorganische Flockungsmittel welche?

☐ Sonstige Hilfsmittel welche?

2.3 Betriebs- und Leistungsdaten

	Einheit	Jahres- mittel	Min	Max
Abfiltrierbare Stoffe im Zulauf	mg/l			
Abfiltrierbare Stoffe im Ablauf	mg/l			
pH-Wert im Zulauf	-			
pH-Wert im Ablauf	-			
Schlammanfall	kg/d			
Schlamm in die Produktion	kg/d			
Schlamm zur Entsorgung	kg/d			

2.4 Betriebskosten

Chemikalien (Flockungsmittel, Sonstige)	t/a		DM/a	
Energieaufwand und -kosten	KWh/a		DM/a	
Wartungs-/Instandhaltungskosten			DM/a	
Reststoff-Entsorgung	t/a		DM/a	

3 Biologische Abwasserreinigung

3.1 Anaerob–Stufe

3.1.1 Angaben zur Verfahrenstechnik und Auslegung

Wird das Abwasser vorversäuert? ☐ nein ☐ ja

Wenn ja, welches Nutzvolumen hat der Versäuerungsreaktor? _____ m³

Durchschnittlicher/üblicher Füllgrad des Versäuerungsreaktors? _____ %

Welcher Reaktortyp wird als Methanstufe eingesetzt und wie viele Reaktoren werden betrieben?

☐ UASB-Reaktor _____ ☐ IC-Reaktor _____ ☐ _____

Bitte machen Sie Angaben über die Dimensionierung der Reaktoren.

		Reaktor 1	Reaktor 2	Reaktor 3
Nutzvolumen der Reaktoren	m ³	_____	_____	_____
Nutzfläche der Reaktoren	m ²	_____	_____	_____
Nutztiefe (Höhe bis Reaktorablauf)	M	_____	_____	_____

3.1.2 Betriebs- und Leistungsdaten der Anaerobsstufe

- Wie groß sind Abwasserdurchsatz und Rezirkulation in den eingesetzten Reaktoren?

			Jahresmittel	Min	Max
Abwasserdurchsatz der Anlage		m ³ /d	_____	_____	_____
Abwasserdurchsatz	Reaktor 1	m ³ /d	_____	_____	_____
	Reaktor 2	m ³ /d	_____	_____	_____
	Reaktor 3	m ³ /d	_____	_____	_____
Rezirkulation	Reaktor 1	m ³ /h	_____	_____	_____
	Reaktor 2	m ³ /h	_____	_____	_____
	Reaktor 3	m ³ /h	_____	_____	_____

- Abwasserparameter im Zu- und Ablauf**

Parameter	Einheit	Zulauf Versäuerung			Ablauf Versäuerung			Ablauf Anaerobstufe		
		Jah- resmit- tel	Min	Max	Jah- resmit- tel	Min	Max	Jah- resmit- tel	Min	Max
Feststoffe	mg/l									
CSB	mg/l									
BSB ₅	mg/l									
TOC	mg/l									
Organ. Säuren*	mg/l									
Sulfat	mg/l									
Calcium	mg/l									
Gesamthärte	°dH									
pH										
Temperatur	°C									

*: Summenparameter; falls Analysendaten zu Einzelsäuren (Essigsäure, Propionsäure usw.) vorliegen, bitte auf separatem Blatt angeben

- Angaben zur Biomasse**

Parameter	Einheit	Jahresmittel	Min	Max
Überschussschlamm	kg/a		*****	*****
Glührückstand der Biomasse	(%)			

3.1.3 Angaben zur Biogasproduktion und Biogasreinigung

- Biogasanfall**

Parameter	Einheit	Jahresmittel	Min	Max
Biogasmenge	m³/d			
Methananteil im Biogas	Vol %			
H ₂ S-Konzentraion im Biogas	Vol %			

- **Welches Verfahren wird zur Reinigung des Biogases eingesetzt?**

Bitte geben Sie eine kurze Beschreibung

- **Betriebskosten der Gasreinigung**

Lauge	t/a		DM/a	
Sonstige chem. Hilfsmittel	t/a		DM/a	
Energieaufwand, -kosten	kWh/a		DM/a	
Wartungs-/Instandhaltungskosten			DM/a	
Sonstiges			DM/a	

3.1.4 Betriebskosten in der Anaerob-Stufe (ohne Biogasreinigung)

Harnstoff	t/a		DM/a	
Phosphorsäure	t/a		DM/a	
Sonstige chem. Hilfsmittel	t/a		DM/a	
Energieeinsatz	kWh/a		DM/a	
Wartung/Instandhaltung			DM/a	
Personaleinsatz (Mannstunden)	h/a		DM/a	
Schlamm-Entsorgung	t/a		DM/a	

3.2 Aerob-Stufe

3.2.1 Angaben zur Auslegung und Verfahrenstechnik

- Welche Verfahrenstechnik wird in der Aerob-Stufe angewandt?

☐ Einstufige Belebung

☐ Zweistufige Belebung mit Zwischenklärung

☐ Kaskadenbelebung

☐ Sonstige _____

☐ Einstraßig ☐ Zweistraßig ☐ _____

	Nutzvolumen	Nutzfläche	Nutztiefe
	m ³	m ²	m
Belebungsbecken			
Nachklärbecken			

- **Belüftung**

☐ Luft mittlere Luftzufuhr _____ Nm³/h

☐ Sauerstoff mittlere O₂-Zufuhr _____ Nm³/h

Belüftertyp: _____

- Weitergehende Reinigungsmaßnahmen**

Wird eine **Denitrifikation** durchgeführt: ☐ nein ☐ ja

Wenn ja, welches Verfahren ?:

Wird der Ablauf des Nachklärbeckens zusätzlich behandelt (z. B. Sandfilter)?

nein ☐ ja ☐ Nach welchem Verfahren ?

Wird das biologisch gereinigte Wasser in die Produktion zurückgeführt?

nein ☐ ja ☐ Welcher Anteil? (%) _____

3.2.2 Betriebs- und Leistungsdaten der Aerob-Stufe

- Belebungsbecken und Belebtschlamm**

Parameter und Bezeichnung der Messstelle/Straße	Einheit	Jahresmittel	Min-Wert	Max-Wert
Sauerstoffkonzentration				
	mg/l			
	mg/l			
	mg/l			
	mg/l			
Belebtschlammkonzentration				
	g/l			
	g/l			
	g/l			
	g/l			
Rückschlamm-Verhältnis				
	%			
	%			
	%			
	%			

Schlammindex				
	ml/g			
	ml/g			
	ml/g			
	ml/g			
Glührückstand der Biomasse				
	%			
	%			

• **Überschussschlammanfall und -behandlung**

Welche Mengen Überschussschlamm sind 2000 angefallen? _____ (t_{TS}/a)

Wird Überschussschlamm in die Produktion zurückgeführt?

nein ☐ ja ☐ wieviel ? _____ (t_{TS}/a)

Welches Verfahren wird zur Schlammmentwässerung eingesetzt?

Bitte geben Sie eine kurze Beschreibung

Wird der entwässerte Schlamm einer bestimmten Verwertung zugeführt?

nein ☐

ja ☐

Wenn ja, welcher?

- Ablaufwerte Nachklärung**

Parameter	Einheit	Ablauf Nachklärung		
		Jahres- mittel	Min	Max
CSB	mg/l			
BSB ₅	mg/l			
TOC	mg/l			
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l			
AOX				
Sulfat	mg/l			
Calcium	mg/l			
Gesamthärte	°dH			
pH	-			
Temperatur	°C			
Gesamt-Phosphor	mg/l			
Gesamt-Stickstoff	mg/l			
Ammonium-Stickstoff	mg/l			
Nitrat-Stickstoff	mg/l			

3.2.3 Betriebskosten der Aerob-Stufe einschließlich Schlammbehandlung und Schlamm Entsorgung

Chemikalien				
Flockungsmiteinsatz und –kosten	t/a		DM/a	
Sonstige chem. Hilfsmittel	t/a		DM/a	
Energie				
Energieaufwand und –kosten für Belüftung	kWh/a		DM/a	
Energieaufwand und -kosten, sonstige	kWh/a		DM/a	
Sonstiges				
Wartungs-/Instandhaltungskosten			DM/a	
Personalaufwand, -kosten	h/a		DM/a	
Schlamm-Entsorgung	t/a		DM/a	

4 Angaben zum Genehmigungsbescheid/Einleiterlaubnis

Bitte kreuzen Sie die in Ihrem Genehmigungsbescheid/Einleiterlaubnis enthaltenen Parameter an und nennen Sie den entsprechenden Grenzwert mit zugehöriger Dimension.

Parameter	Einheit	Grenzwert
Abwassermenge		
CSB		
BSB ₅		
AOX		
N		
P		
Abfiltrierbare Stoffe		
pH-Wert		
Temperatur		
Sonstige, welche?		

5 Betriebskosten der Gesamt-Anlage

Bitte geben Sie die Betriebskosten der Gesamt-Anlage für das Geschäftsjahr 2000, einschließlich Biogasreinigung und Behandlung/Entsorgung des Überschussschlammes (ohne Vorklärung) an.

Chemikalieneinsatz und -kosten				
Harnstoff	t/a		DM/a	
Phosphorsäure	t/a		DM/a	
Flockungsmittel	t/a		DM/a	
Entschäumer	t/a		DM/a	
Laugen	t/a		DM/a	
Sonstige chem. Hilfsmittel	t/a		DM/a	
Energieaufwand und -kosten				
Energie für Anlagenbetrieb einschließlich Biogasreinigung und Schlammbehandlung, <u>ohne Energie für Belüftung</u>	kWh/a		DM/a	
Energie zur Belüftung des Belebungsbecken	kWh/a		DM/a	
Sonstige Kosten				
Wartungs-/Instandhaltung			DM/a	
Personalaufwand	MT		DM/a	
Überschussschlamm-Entsorgung	t/a		DM/a	
Abwasserabgabe			DM/a	

Bitte legen Sie dem ausgefüllten Fragebogen ein Blockschaltbild der gesamten Abwasserreinigungsanlage einschließlich der chemisch/mechanischen Vorreinigung bei