



Industriewasser- kompendium

Ein Leitfaden für Entscheidungsträger*innen
der industriellen Abwasserwirtschaft in Indien
und der MENA-Region

Inhalt

Vorwort BMU	4
Vorwort GWP	5
Abkürzungsverzeichnis	6
Abstract	8
1. Erdöl- und Erdgasförderung.....14	
Länderspezifische Informationen.....	15
Abwasseranfall in der Branche.....	16
Abwasserströme und -eigenschaften	17
Aufbereitungsverfahren	19
<i>Fallstudie: Mineralölraffinerie-Abwasserbehandlung in der Provinz Shandong, China</i>	<i>20</i>
2. Chemische Industrie22	
Länderspezifische Informationen.....	23
Abwasseranfall in der Branche.....	25
Abwasserströme und -eigenschaften	25
Aufbereitungsverfahren	26
<i>Fallstudie: Chemie/Kunststoffgalvanik in Indien . . .</i>	<i>28</i>
<i>Fallstudie: Optimierte Prozesswasseraufbereitung zur Düngemittelproduktion in Ägypten</i>	<i>30</i>
3. Pharmazeutische Industrie32	
Länderspezifische Informationen.....	33
Branche und Abwasseranfall	35
Abwasserströme und -eigenschaften	35
Aufbereitungsverfahren	36
<i>Fallstudie: Pharmaindustrie Indien.....</i>	<i>38</i>
4. Bergbau.....40	
Länderspezifische Informationen.....	41
Branche und Abwasseranfall	42
Abwasserströme und -eigenschaften	43
Aufbereitungsverfahren	45
<i>Fallstudie: Gold-Bergbau in Südafrika</i>	<i>46</i>
5. Lebensmittelindustrie48	
Länderspezifische Informationen.....	48
Branche und Abwasseranfall	51
Abwasserströme und -eigenschaften	53
Aufbereitungsverfahren	54
<i>Fallstudie: Olivenverarbeitende Industrie in Jordanien, Syrien und Libanon</i>	<i>56</i>
<i>Fallstudie: Fischverarbeitende Industrie in Marokko</i>	<i>58</i>
<i>Fallstudie: Milchverarbeitung in Indien</i>	<i>60</i>
<i>Fallstudie: Lebensmittelverarbeitung Soja.....</i>	<i>62</i>
6. Metallerzeugung und -bearbeitung..... 64	
Länderspezifische Informationen.....	64
Branche und Abwasseranfall	66
Abwasserströme und -eigenschaften	67
Aufbereitungsverfahren	69
<i>Fallstudie: Zinkgewinnung/Zinkauswaschung in Indien</i>	<i>72</i>
7. Textil- und Lederindustrie74	
Länderspezifische Informationen.....	75
Branchen und Abwasseranfall	76
Abwasserströme und -eigenschaften	78
Aufbereitungsverfahren	80
<i>Fallstudie: Textilindustrie in Indien.....</i>	<i>82</i>

8. Papier- und Zellstoffindustrie..... 84

Länderspezifische Informationen.....	85
Branche und Abwasseranfall	87
Abwasserströme und -eigenschaften	88
Aufbereitungsverfahren	89

9. Deponien.....90

Länderspezifische Informationen.....	91
Branche und Abwasseranfall	92
Abwasserströme und -eigenschaften	93
Aufbereitungsverfahren	95
<i>Fallstudie: Mülldeponie in Marokko.....</i>	<i>96</i>

10. Industrieparks.....98

Länderspezifische Informationen.....	99
Infrastruktur und Abwassermanagement.....	100
Besondere Herausforderungen	100
Aufbereitungsverfahren	102
<i>Fallstudie: Textilindustrie in Indien.....</i>	<i>104</i>
<i>Fallstudie: Abwasserbehandlung in Industriegebieten in Marokko</i>	<i>106</i>

**11. Ausblick auf internationale Trends in
der Behandlung von Industrieabwasser .. 108**

Bibliografie.....	112
Impressum	126

Sehr geehrte Leser*innen,

sehr geehrte Expert*innen der Industrieressourcenwirtschaft,

weltweit muss sich die Industrie infolge des Klimawandels auf eine schwankende – in vielen Regionen der Welt sogar abnehmende – Verfügbarkeit von Wasser einstellen. Die in wichtigen Industriezweigen wie der Chemie- und Lebensmittelbranche in Indien oder der Bergbau- und Textilindustrie in der MENA-Region eingesetzten Stoffe stellen zusätzliche Herausforderungen an einen effizienten und verantwortungsvollen Umgang mit der kostbaren Ressource Wasser. Ziel muss es sein, das gereinigte Wasser im Sinne der Nachhaltigkeit ohne Gefahr für Lebewesen und Umwelt wieder dem natürlichen Wasserkreislauf zuzuführen.

Wie dies ökonomisch und ökologisch sinnvoll gelingen kann, veranschaulichen die im vorliegenden Industrieressourcenkompendium gesammelten Beispiele für zehn bedeutende Industriebranchen eindrucksvoll. Ziel des Kompendiums ist es, öffentliche und private Entscheidungsträger*innen in der MENA-Region (v. a. Marokko, Tunesien, Ägypten und Jordanien) sowie in Indien bei der Implementierung von Lösungen zur nachhaltigen und umweltschonenden industriellen Abwasserbehandlung zu unterstützen. Dabei werden die unterschiedlichen Marktcharakteristiken analysiert und Trends herausgearbeitet, die sich in beiden Regionen beobachten lassen, z.B. der wachsende Fokus auf die Rückgewinnung von Ressourcen oder die Entwicklung von Industrieparks zur gemeinsamen Behandlung von Abwasserströmen.

Technische Innovationen im Umwelt- und Klimaschutz sind heute gefragter denn je – und kurbeln gleichzeitig als starker Wachstumstreiber die Wirtschaft an. Die 2016 ins Leben gerufene Exportinitiative Umwelttechnologien des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) hat es sich zur Aufgabe gemacht, das Wissen über und die Anwendung von Umwelt- und Klimaschutztechnologien sowie innovativer (grüner) Infrastruktur in Ländern mit Unterstützungsbedarf zu verbreiten und zu verstärken. Mit dem Ziel einer nachhaltigen



Entwicklung und verbesserten Lebensbedingungen ist das vorliegende Industrieressourcenkompendium als Beitrag des Globalvorhabens der Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH zur Exportinitiative Umwelttechnologien entstanden.

Wir danken dem Auftraggeber GIZ und dem Herausgeber German Water Partnership e. V. für die erfolgreiche Projektumsetzung und die hervorragende Kooperation. Das Kompendium entstand mit fachlicher Unterstützung der ExpertInnen des Umweltbundesamts – auch ihnen danken wir herzlich für ihren wertvollen Beitrag.

Mit freundlichen Grüßen

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Svenja Schulze'. The signature is fluid and cursive.

Svenja Schulze
Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

Sehr geehrte Leser*innen,

sehr geehrte Expert*innen der Industrierwasserwirtschaft,

angesichts knapper werdender Wasserressourcen weltweit sowie Schwankungen bei der Verfügbarkeit von Wasser infolge des Klimawandels wächst die Bedeutung eines nachhaltigen Wassermanagements. Energieeffiziente Aufbereitungsanlagen, besonders in den aufstrebenden Volkswirtschaften Asiens und der MENA-Region, leisten somit einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele von Paris. Auf den nächsten Seiten können Sie lesen, wie deutsche Unternehmen der Abwasserbranche dabei eindrucksvoll unterstützen.

Bereits heute sind deutsche Komponenten und Systeme zur Abwasserbehandlung international gefragt: 2019 stiegen die Ausfuhren in den Bereichen Wasseraufbereitung, Abwasser- und Schlammbehandlung um 6,8 % gegenüber dem Vorjahr – auf einen Gesamtwert von über 1,1 Milliarden Euro. Dass deutsche Lösungen weltweite Anwendung finden, hat seinen Grund nicht nur im guten Ruf der Marke „Made in Germany“, die Qualität und lange Lebenszyklen verspricht. Vielmehr zeichnen sich deutsche Unternehmen durch ihre Innovationskraft und Flexibilität aus: optimal angepasste Lösungen für unterschiedlichste Rahmenbedingungen anbieten zu können ist charakteristisch für deutsche Betriebe. Die Beispiele in diesem Kompendium zeigen exemplarisch mögliche Lösungsmodelle für die technischen Herausforderungen der industriellen Abwasserbereitung in der MENA Region und Indien auf.

Die Mission von German Water Partnership e. V. als starkes Netzwerk mit über 350 Mitgliedern aus der deutschen Wasser- und Abwasserwirtschaft ist es, diese Stärken auch international sichtbar zu machen. In die Entstehung des vorliegenden Kompendiums flossen Know-how und umfangreiche Erfahrung des Arbeitskreises Industrierwasserwirtschaft sowie der Regionalforen Indien und Nordafrika/Jordanien ein.

Mit der Erstellung des Ihnen vorliegenden Industrierwasserkompodiums führt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit



die langjährige und erfolgreiche Zusammenarbeit mit German Water Partnership e. V. im Rahmen der Exportinitiative Umwelttechnologien fort. Ich möchte allen beteiligten ExpertInnen sowie den MitarbeiterInnen des Globalvorhabens der Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), mit dem die GIZ die Exportinitiative Umwelttechnologien unterstützt, für die gute und erfolgreiche Zusammenarbeit danken. Erneut konnte dadurch ein wichtiger Baustein für den erfolgreichen internationalen Vertrieb nachhaltiger technologischer Lösungen „Made in Germany“ geschaffen und gleichzeitig ein Beitrag für den Schutz unserer Umwelt geleistet werden.

Mit freundlichen Grüßen

Julia Braune
Geschäftsführerin
German Water Partnership e. V.

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
μS	Mikrosiemens
AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AOX	Maß für organisch gebundene Halogene
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BSB5	Biochemischer Sauerstoffbedarf innerhalb von 5 Tagen
Ca	Calcium
CETP	Gemeinschaftliche Kläranlage (Common Effluent Treatment Plant)
CIP	Reinigung an Ort und Stelle (Cleaning In Place)
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff (dissolved organic carbon)
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
EGSB	Expandiertes Schlammgranulat (Expanded granular sludge blanket)
h	Stunde
ha	Hektar
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
ISO	Norm gemäß den Definitionen der Internationale Organisation für Normung, z.B. ISO 14001 (Umweltmanagementnorm)
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km ²	Quadratkilometer
l	Liter
m ³	Kubikmeter
MBR	Membranbioreaktor
MENA	Middle East & North Africa; im vorliegenden Kompendium sind hiermit insbesondere die MENA-Länder Ägypten, Jordanien, Marokko, Tunesien gemeint
mg	Milligramm
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
N	Stickstoff
n.a.	Nicht verfügbar (Not available)
Na	Natrium
NH ₄ ⁺	Ammonium
NTU	Nephelometrische Trübungseinheit (Nephelometric Turbidity Unit)
OPEC	Organisation der erdölexportierenden Länder (Organization of the Petroleum Exporting Countries)
P	Phosphor
PFAS	Per- und Polyfluoralkyl-Stoffe (per- and polyfluoroalkyl substances)
pH	Potential des Wasserstoffs
Pt-Co	Platin-Cobalt-Farbzahl
t	Tonne

TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff (Total Organic Carbon)
TSS.	Gesamte Schwebstoffe (Total Suspended Solids)
UASB	Aufwärtsströmende anaerobe Schlammdecke (Upflow anaerobic sludge blanket)
USD	US-Dollar
UV-Strahlung	Ultraviolette Strahlung
VOX	leichtflüchtige organische Halogene (volatile organic halogen)
WHO	Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization)
ZLD	Abwasserfreie Produktion (Zero Liquid Discharge)

Abstract

Die Einleitung von Abwässern aus industriellen Aktivitäten stellt eine globale Herausforderung dar, bei der Entwicklungs- und Schwellenländer besonders durch Umweltbelastungen gefährdet sind. Zielsetzung dieses Kompendiums ist es, die Entwicklung und Umsetzung von Umweltlösungen in Indien und der MENA-Region zu unterstützen. Es soll als Leitfaden für Anwender*innen, Entscheidungsträger*innen und Technologieanbieter gleichermaßen dienen, indem es die industrielle Abwassersituation der Partnerländer beleuchtet und konkrete Lösungsansätze zur Abwasserreinigung vorstellt. Im Rahmen der Agenda 2030 soll damit ein Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz geleistet werden, um die Ziele für nachhaltige Entwicklung zu erreichen ^[1]. Das Kompendium trägt zur Umsetzung des Nachhaltigkeitsziel 6 bei, das sich für sauberes Wasser und Zugang zu Sanitäreinrichtungen einsetzt. Es geht insbesondere auf das

Unterziel 6.3 ein: „Bis 2030 soll die Wasserqualität durch Verringerung der Verschmutzung, Beendigung des Einbringens und Minimierung der Freisetzung gefährlicher Chemikalien und Stoffe, Halbierung des Anteils unbehandelten Abwassers und eine beträchtliche Steigerung der Wiederaufbereitung und gefahrlosen Wiederverwendung weltweit verbessert werden.“

Aus verschiedenen Gründen (z.B. Kosteneinsparung, Vermeidung von Transporten, Berücksichtigung lokaler Besonderheiten) ist in vielen Fällen die Fertigung und der Bezug technischer Anlagenteile vor Ort in den Partnerländern zu empfehlen. Für konkrete Herausforderungen können jedoch innovative Komponenten spezialisierter deutscher Technologieanbieter einen entscheidenden Beitrag leisten. Im Fokus

dieses Kompendiums stehen daher in Deutschland entwickelte Technologien zur industriellen Abwasserreinigung nach Stand der Technik. Hierfür stellen in den Partnerländern z.B. Industriesektoren mit hoher Wertschöpfung oder gemeinschaftliche Abwasserbehandlungsanlagen vielversprechende Anwendungsfelder dar. Ein wichtiger Treiber zum Einsatz innovativer Reinigungstechnologien ist die Verschärfung regulatorischer Rahmenbedingungen vor Ort, sowie

die Optimierung der Versorgungssicherheit und Energieeffizienz. Die Expertise deutscher Technologieanbieter ermöglicht es, maßgeschneiderte Lösungen für konkrete Probleme vor Ort zu erarbeiten – und zwar unter Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher, geografischer und regulatorischer Rahmenbedingungen. Technologien, die sich in Deutschland seit vielen Jahrzehnten in der Industrieabwasserbehandlung bewährt

haben, werden heute durch innovative Ansätze ergänzt, um nachhaltige und ganzheitliche Abwasserlösungen zu realisieren.

Das Kompendium gliedert sich in 10 Kapitel, in denen ausgewählte Industriesektoren der Partnerländer beleuchtet werden. Es wird jeweils die wirtschaftliche Bedeutung in Indien und den MENA-Ländern angesprochen und die wichtigsten technischen Grundlagen der Abwassersituation kurz umrissen. Hierzu gehören die typische Abwasserzusammensetzung und Lösungsansätze nach Stand der Technik ebenso wie aktuelle legislative, wirtschaftliche und technische Entwicklungen. Zum Abschluss jedes Kapitels werden Fallbeispiele für die erfolgreiche Technologieimplementierung deutscher Anbieter in den Regionen und Branchen vorgestellt.

Zielsetzung dieses Kompendiums: die Umweltlösungen in Indien und der MENA-Region zu unterstützen.

Relevanz einzelner Wirtschaftszweige

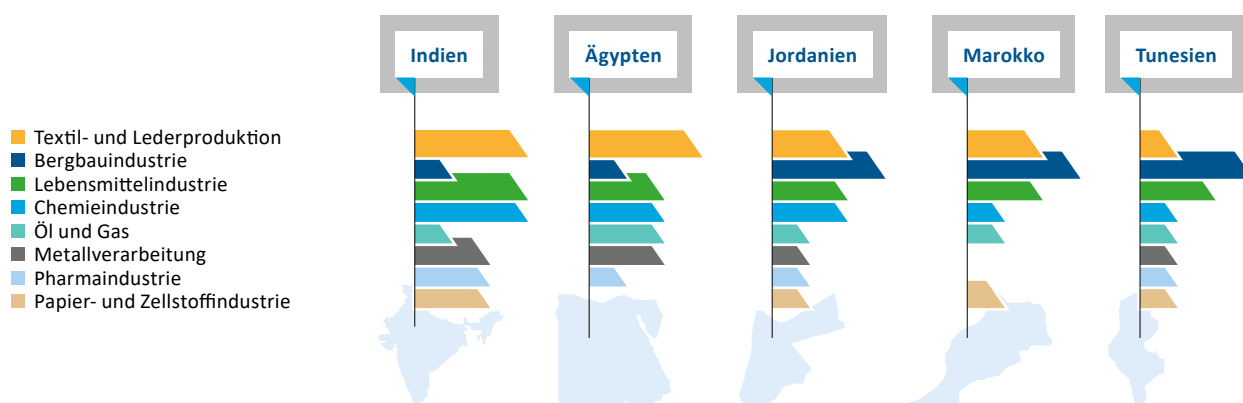


Abbildung 1: Semi-quantitative Bewertung der Relevanz einzelner Wirtschaftszweige in den Regionen (2020) (basierend auf ^[3])

Industrieabwasser in Indien und der MENA-Region

Indien

Indiens Wirtschaft, die bereits jetzt die sechstgrößte der Welt ist, ist auch eine der am schnellsten wachsenden ^[2]. Mit 1,35 Milliarden Menschen ist Indien außerdem nach China das bevölkerungsreichste Land der Welt. Als aufstrebende Wirtschaftsmacht ist die indische Industrie in fast allen relevanten Branchen mit lokalen und internationalen Unternehmen vertreten (Abbildung 1). Der Druck auf Unternehmen durch strengere Umweltauflagen und Nachhaltigkeitsziele nimmt stetig zu, was zu einem generellen Umdenken im Umgang mit der Ressource Wasser führt. Zentrale Themen sind derzeit die Vermeidung von Abwasser-einleitungen durch „Zero Liquid Discharge“ (ZLD) bei Großbetrieben und der Aufbau von zentralen Kläranlagen für Industrieabwässer.

Insbesondere für stark belastete Abwasserströme aus einzelnen Unterbranchen steht ZLD im Vordergrund. Die ZLD-Verordnungen sind derzeit für Industrien im Ganges-Becken und für bestimmte Industriezweige in einzelnen Staaten (z.B. für die Textilverarbeitung in Tamil Nadu) verpflichtend. Es ist wahrscheinlich, dass sie auf andere Industriegebiete

mit einer hohen Dichte umweltrelevanter Industrien ausgeweitet werden, wie etwa die Textil- und Lederproduktion, die Papierindustrie, die chemische und pharmazeutische Industrie, die Lebensmittelindustrie und die Metallverarbeitung ^[3]. Außerdem ist zu erwarten, dass das Regulierungsregime durch eine verstärkte Online-Überwachung von Industrieabwässern, gefordert durch das Central Pollution Control Board, in Zukunft strenger werden wird.

Sogenannte „Common Effluent Treatment Plants“ (CETPs) entstehen vermehrt, um die Abwassereinleitungsprobleme von Kleinbetrieben und Industriezentren zu lösen. Es gibt derzeit schätzungsweise 200 CETPs in Indien. Durch Änderungen in der Gesetzgebung und Haftpflicht haben sich die Anforderungen an den technischen Umweltschutz auf CETPs verschärft. Die Verträge für die Wartung der Standorte haben sich von einem Jahr nach Inbetriebnahme auf 15 Jahre für Betrieb und Wartung geändert, was zu einem gesteigerten Interesse an langlebigen Technologien führen wird ^[4]. Weiterhin ist der zunehmende Auf- und Ausbau von Industrieparks zu beobachten, was die Anzahl der verfügbaren Möglichkeiten für den Bau von CETPs erhöhen wird. Die indische Regierung stellt bis zu 75 % der Investitionsmittel für CETPs zur Verfügung ^[3].



Abbildung 2: Schematische Darstellung der Abläufe zur technischen Lösungsfindung in der industriellen Abwasserreinigung

Entscheidungsgrundlagen

Rohwasser- und Abwassercharakteristik	Infrastruktur und lokale Rahmenbedingungen	Wirtschaft und Regelwerke
• Volumenstrom • Temperatur • Verunreinigungen: Organik u. potentielle Wertstoffe, biologische Abbaubarkeit, Nährstoffe, Feststoffe, Salze, Schwermetalle, toxische/refraktäre Verbindungen • Qualitäten zur Wiederverwendung	• Frischwasserverfügbarkeit und -qualität • Verfügbarer Bauraum • Nutzbarkeit kommunale Kläranlage • Entsorgungsmöglichkeiten für Abfälle/Schlämme • Potentiale zur Kreislaufschließung (Energie, Wertstoffe, Wasser) • Verfügbarkeit lokaler/importierter Technologien • Lieferketten für Verbrauchsmaterial • Stabilität der Energieversorgung • Verfügbarkeit von Fachpersonal/Expertise • Potential zur Digitalisierung und Automatisierung	• Gesetzliche Auflagen und Vollzug (z.B. Zero Liquid Discharge, ZLD) • (Nationales) Umweltmonitoring • Verfügbares Investitionskapital • Kosten: Rohwasser, Aufbereitung, Einleitung, externe Abwasserentsorgung, Energie • Nachhaltigkeitsziele (z.B. Sustainable Development Goals, SDGs, Zertifikate) • Bedeutung Energieeinsparung

Abbildung 3: Kategorisierung und Auflistung der wichtigsten Rahmenbedingungen und Entscheidungsgrundlagen zur technischen Lösungsfindung

MENA-Region

Zusammengerechnet haben die Länder Ägypten, Jordanien, Tunesien und Marokko etwa 163 Millionen Einwohner*innen. Sie stellen für den Raum Nordafrika und den mittleren Osten sehr bedeutende Wirtschaftsmächte dar ^[5]. Wichtige Wirtschaftszweige sind die Lebensmittelindustrie, Chemieindustrie, Textil- und Lederproduktion sowie der Bergbau (Abbildung 1) – hier ist insbesondere auf die Phosphatvorkommen in Marokko hinzuweisen, welche zu den größten der Welt zählen. Eine Verknappung von Wasserressourcen infolge von sich ändernden klimatischen Bedingungen und strenger werdende Umweltauflagen durch die zuständigen Regierungen wirken vermehrt auf die Unternehmen in der Region ein.

Auch hier ist ein Trend hin zur Einrichtung von zentralisierten Industrieparks einschließlich einer damit einhergehenden zentralen Abwasserreinigung zu beobachten ^[6]. Weiterhin wird in der Region eine Erhöhung des Anschlussgrads von Industriebetrieben angestrebt, wie es etwa in einer Regierungsinitiative in Jordanien vorangetrieben wird ^[7]. Eine zentrale Rolle bei Industriewasserkonzepten spielt außerdem die Wiederverwendung von Wasser und darin enthaltenen Ressourcen. In der MENA-Region steht hier insbesondere die Nutzung zur Bewässerung von Pflanzen im Mittelpunkt. Gesetzliche Mindeststandards oder Leitlinien zur Wasserwiederverwendung sollten in diesem Zusammenhang das Risiko einer Schadstoffbelastung für Mensch und Umwelt minimieren. Am weitesten ist der Regulierungsrahmen in Jordanien entwickelt; dort liegt seit 2016 eine „Water Substitution and Reuse Policy“ vor. Hinweise zu möglichen Aufbereitungsprozessen für verschiedene Wasserwiederverwendungen fasst der Themenband „Non-Potable Reuse“ der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) zusammen ^[8].

Industrielles Abwasser

Obwohl sie kulturell und wirtschaftlich sehr unterschiedlich strukturiert sind, haben die betrachteten Regionen doch auch starke Überschneidungen – insbesondere bei der Relevanz der verschiedenen Industriebranchen, wie in Abbildung 1 zu sehen ist.

Die wesentlichen Treiber zur Verbesserung der industriellen Abwassersituation in Indien und der MENA-Region sind strikter werdende gesetzliche Auflagen sowie (regional) eine begrenzte Frischwasserverfügbarkeit. Die optimale Umsetzung der Abwasserreinigung hängt dabei stark von den konkreten technischen, geografischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen ab (Abbildung 2).

Wichtigste Grundlage für die Technologiewahl ist die Menge und Zusammensetzung des anfallenden Abwassers, aber auch die infrastrukturellen Gegebenheiten, z.B. Möglichkeiten zum Bezug von Ressourcen und zur Entsorgung von Abfällen, gilt es zu beachten. Aus wirtschaftlicher Sicht spielen das verfügbare Kapital, Kostenstrukturen und die Fachexpertise vor Ort eine entscheidende Rolle. Der Grad der Abwasserreinigung und ggf. Wasserwiederverwendung hängt neben ökologischen Faktoren, z.B. der Sensibilität des Vorfluters und der allgemeinen Frischwasserverfügbarkeit vor Ort, selbstverständlich auch

von den gesetzlichen Auflagen und Vorschriften ab (Abbildung 3). Alle relevanten Faktoren finden schließlich Eingang in die technische Entscheidungsfindung zur industriellen Abwasserreinigung. Daran sind neben den industriellen Anlagenbetreibern typischerweise auch Technologiedienstleister beteiligt, die über die entsprechende Expertise und den Erfahrungsschatz verfügen.

Eine zentrale Rolle bei Industriewasserkonzepten spielt auch die Wiederverwendung von Wasser und darin enthaltenen Ressourcen.

Die Einbindung von Branchenverbänden und Forschungseinrichtungen stellt außerdem den Transfer von Know-how und Innovation sicher (Abbildung 4).

Höchste Priorität bei der technischen Entscheidungsfindung sollte es sein, einen integrativen Ansatz zu verfolgen. Durch die sinnvolle Nutzung von Synergien zwischen (Teil-)Prozessen kann eine bestmögliche Nutzung der Ressource Wasser gewährleistet werden. Ein positives Beispiel für einen ganzheitlichen technischen Lösungsansatz stellt die durch Remondis realisierte Abwasserbehandlung eines indischen Chemie-/Kunststoff-galvanik-Standorts dar (S. 28). Durch gezielte Vorbehandlung und weitergehende Aufreinigung wird dort eine 90 %-ige Wasserwiederverwendung ermöglicht. Eine optimale Nutzung kann sich auch durch den Bau gemeinschaftlicher Industriekläranlagen (CETPs) realisieren lassen. Sowohl in Indien als auch in den MENA-Ländern lässt sich ein Trend

Expertise und Erfahrungsschatz im Netzwerk



Abbildung 4: Zusammenspiel der Akteure*innen, deren Expertise und Erfahrungsschatz in die technische Lösungsfindung einfließen



in Richtung zentralisierter Industrieparks und somit zentraler Abwasserreinigungsanlagen erkennen. Wichtig ist hierbei jedoch ein genaues Abwägen der Vor- und Nachteile verschiedener Behandlungsszenarien – eine gemeinsame Abwasserbehandlung kann vor allem für Unternehmen ähnlicher Industriezweige sehr effizient sein, während in anderen Fällen eine separate (Vor-)Behandlung häufig notwendig ist. Die konkrete technische Umsetzung der Abwasserreinigung kann schließlich – je nach Behandlungsziel und Bedingungen vor Ort – verschiedene Behandlungsstufen umfassen, z.B. biologische, chemisch-physikalische oder Membranverfahren (Abbildung 5).

Aus den jeweiligen geografischen Rahmenbedingungen ergeben sich in den thematisierten Regionen oft Überlegungen zur Wieder- oder Weiterverwendung von Abwasser. Wichtig ist hier jedoch auch die Einbeziehung technischer Faktoren und gesetzlicher

Auflagen: Die Anlage soll sich – auch im Hinblick auf den Energiebedarf – effizient betreiben lassen und eine Einhaltung von Leit- und – falls vorhanden – Grenzwerten sicherstellen. Dies gilt insbesondere für die Realisierung von abwasserfreien Anlagen, die derzeit sowohl in Indien als auch in der MENA-Region durch Regierungsinitiativen vorangetrieben wird. Die technischen Komponenten, die zur Bewältigung der genannten Herausforderungen entwickelt wurden, stehen heute zur Verfügung. Grundlage für die durchdachte Planung und Auslegung einer Abwasserbehandlung bildet allerdings zunächst eine fundierte Datenbasis zu Abwasserkapazität, -zusammensetzung und weiteren Rahmenbedingungen. Schließlich ist die Überwachung des Anlagenbetriebs durch den Betreiber und der Abwasserqualität durch die zuständigen Behörden essenziell für eine zuverlässige Einhaltung von Einleitungsbedingungen zum Schutz aquatischer Ressourcen. □

Lösungen



Abbildung 5: Überblick über mögliche technische Lösungsansätze zur industriellen Abwasserreinigung je nach Priorisierung im Einzelfall

1

ERDÖL- UND

ERDGAS-

FÖRDERUNG



Länderspezifische Informationen

Indien

Die jährliche Fördermenge der indischen Öl- und Gasindustrie beträgt ca. 34 Mio. t Erdöl und 32 Mio. m³ Erdgas und Indien rangiert damit auf Platz 24 der erdölfördernden Länder^[9]. Das Land umfasst 26 Sedimentbecken mit einer Gesamtfläche von 3,14 Mio. km², wovon sich 1,35 Mio. km² im Tiefwasser (tiefer als 200 m) befinden. Ein verhältnismäßig großer Anteil der Öl- und Gasvorkommen liegt somit an Land, was die Förderung entsprechend vereinfacht. Die wichtigsten Lagerstätten liegen in Assam und vor der Westküste (beides Öl und Gas), in Gujarat (Öl) sowie vor der Ostküste des Landes (Gas). Ein großer Teil der Sedimentbecken in Indien ist bisher kaum oder wenig erschlossen, mit einer Brunnendichte von durchschnittlich einem Brunnen pro 250 km². Gerade im Westen des Landes warten noch größere Ölreserven (ca. 700 Mio. t) auf ihre Erschließung.

Dem steigenden nationalen Öl- und Gasbedarf versucht das Land durch die weitere Erschließung von Lagerstätten gerecht zu werden (auch unkonventionelle oder im Tiefwasser gelegene Quellen). Ein wichtiger Fokus liegt auch auf der Verbesserung der Ausbeute bestehender Förderanlagen. Der indische

Öl- und Gassektor wird neben einigen privaten in- und ausländischen Investoren vor allem von großen nationalen Firmen dominiert – unter den wichtigsten befinden sich ONGC (Oil and Natural Gas Corporation), Reliance Industries und Indian Oil^[10]. Herausforderungen für die Umsetzung von Investitionsprojekten sind teilweise komplexe regulatorische Rahmenbedingungen und eine staatliche Preisregulierung für Ölprodukte^[11].

MENA

Die wichtigsten Erdöl-fördernden Länder der MENA-Region sind Saudi-Arabien, Iran, Irak, Kuwait und die Vereinigte Arabische Emirate. Auf dem afrikanischen Kontinent spielt Ägypten neben Algerien und Libyen eine bedeutende Rolle (Abbildung 1). Ägypten ist der größte afrikanische Ölproduzent außerhalb der OPEC, der drittgrößte Gasproduzent des Kontinents und profitiert von einer strategisch günstigen Lage am Suezkanal. Die wichtigsten Lagerstätten liegen in der Westlichen Wüste und dem Golf von Suez. In den vergangenen Jahren wurden v.a. beträchtliche Erdgas-Vorkommen entdeckt, die nun durch nationale und internationale Investoren erschlossen werden. Eines davon ist das größte bekannte Gasfeld im Mittelmeerraum – Zohr („Blüte“) – das 2015 erstmals entdeckt wurde^[12]. In Ägypten sind sowohl nationale als auch internationale Firmen (z.B. Shell, BP) an der Exploration beteiligt^[13].



Im direkten Vergleich ist Tunesien nur ein kleiner Öl- und Gasproduzent (Abbildung 1) und der Markt wird von nationalen Unternehmen dominiert ^[13]. Die wichtigsten Lagerstätten sind El Borma, sowie die erst kürzlich erschlossenen Felder Zarat und Miskar (im Tiefwasser) ^[14]. Des Weiteren liegen im Süden des Landes zwei bedeutende Schieferformationen, die zukünftig als unkonventionelle Quelle genutzt werden sollen ^[15]. In Jordanien und Marokko befindet sich die Erschließung der Öl- und Gasvorkommen noch in den Anfängen (Abbildung 1). Beide Länder decken ihren Energiebedarf zum größten Teil mit Importen und fördern bisher nur in vergleichsweise kleinen Mengen Erdöl und Erdgas. Eine Reihe von nationalen Firmen sowie fast alle bekannten internationalen Firmen (Shell, BP, ENI, Repsol) sind an den Explorationen beteiligt ^[16]. Schieferformationen spielen sowohl in Jordanien als auch in Marokko eine wichtige Rolle – etwa 70 % der Fläche Jordaniens bedeckt Ölschiefer (ca. 30 Mio. t Öl und damit das viertgrößte Vorkommen weltweit). Es handelt sich dabei allerdings um eine vergleichsweise schwer nutzbare Ressource ^[17, 18].

Abwasseranfall in der Branche

Der Industriesektor der Erdöl- und Erdgas-Förderung umfasst die Erkundung und Erschließung von Lagerstätten durch Explorationsbohrungen ebenso wie den regulären Betrieb von Förderbrunnen. Neben konventionellen Öl- und Gasfeldern werden zunehmend auch unkonventionelle Quellen durch Fracking erschlossen. Beim Fracking wird Fracking-Flüssigkeit unter hohem Druck (typischerweise mehrere hundert bar) in Bohrlöcher gepumpt, um das Speichergestein hydraulisch aufzubrechen und dadurch die Durchlässigkeit für Öl oder Gas zu erhöhen.

Auf allen Stufen der Erdöl- und Erdgas-Förderung von der Brunnenbohrung bis hin zum Förderbetrieb werden große Wassermengen eingesetzt. Im weltweiten Durchschnitt werden pro m³ gefördertes Erdöl ca. 3 m³ Wasser benötigt – mit steigender Tendenz. Der mengenmäßig wichtigste Abwasserstrom, der bei der konventionellen Förderung aufkommt, ist das Lagerstättenwasser. Abwasser entsteht auch beim Wasserfluten von alternden Bohrlöchern. Außerdem können verschiedene (Bohr-)Schlämme und

Fördermengen und Reserven

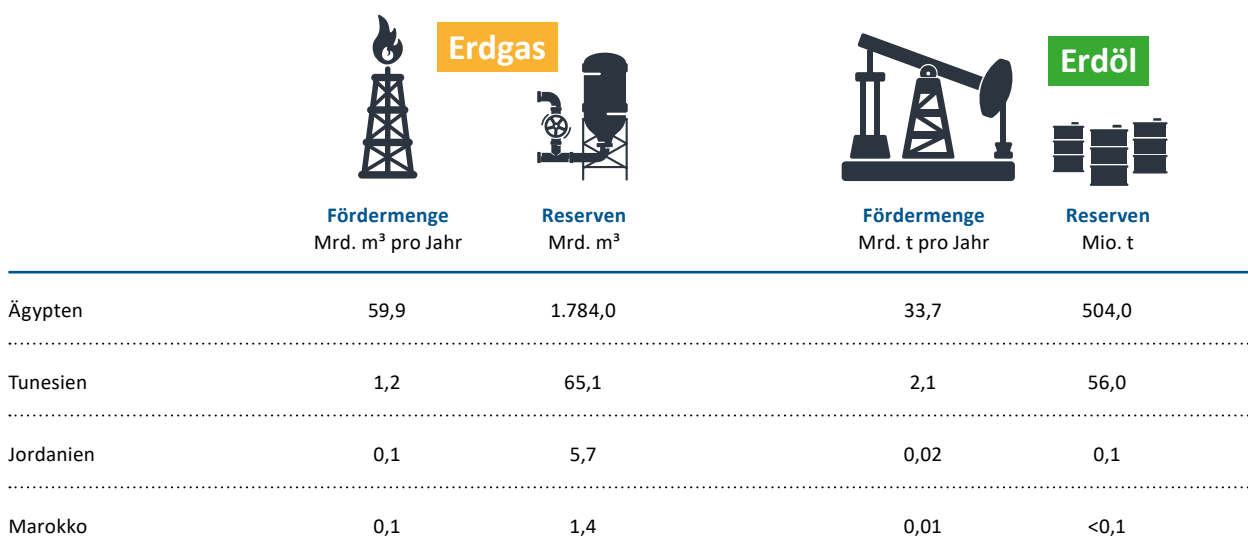


Abbildung 1: Fördermengen und Reserven von Erdöl und Erdgas in ausgewählten MENA-Ländern (2018) ^[19, 20, 21]

Kühlwässer anfallen, die aufbereitet und entsorgt werden müssen. Wird Ölsand gefördert, sind Bergeteiche eine zu berücksichtigende Abwasserquelle. Beim Fracking fällt weiterhin ein großer Anteil der eingesetzten Fracking-Flüssigkeit als Rücklaufwasser an ^[22].

Eine Vermischung verschiedener Abwasserströme ist nur bedingt möglich, da es aufgrund der gelösten Mineralien und Salze zu Ausfällungen und Ablagerungen in Rohren, Anlagen oder Bohrlöchern kommen kann. Betreiber können ihre Ausbeute maximieren, indem sie Ölverluste ins Abwasser minimieren und verkaufsfähiges Öl zurückgewinnen. Ebenso können in wasserarmen Regionen die Aufbereitung und Wiederverwendung von Abwässern nicht nur einen ökologischen, sondern auch einen wirtschaftlichen Vorteil darstellen ^[23]. Zuvor sollten die Abwasserströme hinsichtlich enthaltenen Schadstoffe analysiert werden, Risiken für die menschliche Gesundheit, Böden, Grundwasser und Pflanzen berücksichtigt und entsprechende Anforderungen und Maßnahmen definiert werden.

Abwasserströme und -eigenschaften

Lagerstättenwasser

Lagerstättenwasser ist in geologischen Formationen gespeichertes Wasser, dass durch Förderbohrungen an die Oberfläche tritt. Das Wasser enthält verschiedene Rückstände aus der einlagernden Geoformation bis hin zur Sättigung, darunter flüssige oder gasför-

Parameter	Konzentration	Einheit
Leitfähigkeit	4.200–58.600	µS/cm
pH	4,3–10	-
Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC)	0–1.500	mg/l
Feststoffe	1,2–10.623	mg/l
Öl und Fett	2–565	mg/l
Ammonium-Stickstoff	10–300	mg/l
Chlorid	80–200.000	mg/l
Sulfat	<2–1.650	mg/l

Tabelle 1: Typische Qualitätsparameter von Lagerstättenwasser aus der Erdöl-Förderung ^[26]

mige Kohlenwasserstoffe und andere organische Stoffe (z.B. Benzen, Toluol, Ethylbenzen, Xylen, Naphtalen, Phenol) entweder in gelöster Form oder als freies Öl aufschwimmend. Im Lagerstättenwasser finden sich außerdem Schwermetalle und andere anorganische Rückstände – teils mit natürlicher Radioaktivität – die sich je nach geologischer Formation selektiv im Wasser anreichern (z.B. Uran, Radium, Radon, Blei,

Arsen, Cadmium und Sulfide). Das austretende Wasser kann aufgrund seiner langen Verweilzeit in tiefen Gesteinsschichten hohe Temperaturen haben (bis zu 150°C) und nach dem Durchlaufen des Bohrlochs zusätzlich mit Produktionschemikalien verunreinigt sein (z.B. Korrosionsinhibitoren, Emulsionsbrecher, Biozide) ^[22, 24].

Lagerstättenwasser stellt in den meisten Fällen den größten Abfallstrom bei der Erdöl- und Erdgasförderung dar und mit zunehmendem Alter des Bohrlochs steigt der Anteil an gefördertem Wasser. Die Verunreinigungen machen einen bewussten Umgang und eine gründliche Aufbereitung vor der Entsorgung notwendig (Tabelle 1). Heute wird empfohlen, Lagerstättenwasser nach einer entsprechenden Aufbereitung beispielsweise als Flutwasser wiederzuverwenden, um die Umwelt zu schonen sowie Wasserressourcen zu sparen. Alternativ kann der Abfallstrom in Versenkbohrungen deponiert oder als Abwasser in die Umwelt abgeleitet werden. Beste verfügbare Technik ist die Aufbereitung von Lagerstättenwasser durch physikalisch-chemische Verfahren bis zur Umweltverträglichkeit ^[25]. Als akzeptable Wasserqualität für die Einleitung in Oberflächengewässer gilt ein Gehalt an Kohlenwasserstoffen von höchstens 10 mg/l, um ein Beispiel zu nennen (Abbildung 2).

Rücklaufwasser

Als Rücklaufwasser wird die beim Fracking eingesetzte wasserbasierte Fracking-Flüssigkeit bezeichnet, die nach Abschluss der Maßnahmen durch das Bohrloch wieder an die Oberfläche tritt. Die Menge an Rücklaufwasser beträgt etwa 10–30 % der eingesetzten Menge an Fracking-Flüssigkeit und hängt außerdem von der Anzahl der durchgeführten Fracking-Phasen und den Lagerstättenbedingungen ab. Die Inhaltsstoffe von Rücklaufwasser sind vielfältig, und setzen sich zusammen aus den chemischen Zusätzen der Fracking-Flüssigkeit und den im Bohrloch aufgenommenen Verunreinigungen. Aus der Fracking-Flüssigkeit stammen u.a. Sand, Korrosionsinhibitoren, Säuren, Biozide, Schmiermittel oder Tenside. Häufige relevante geogene Verunreinigungen aus dem Bohrloch sind aromatische Kohlenwasserstoffe (z.B. Benzen, Toluol, Ethylbenzen, Xylen), partikulär gebundene Stoffe erhöhter natürlicher Radioaktivität und flüchtige Quecksilberverbindungen ^[22, 30].

Wichtigster Entsorgungspfad für Rücklaufwasser ist die Ablagerung in Versenkbohrungen oder die Wiederverwendung für sekundäre oder tertiäre Fördermaßnahmen. Nach entsprechender Aufbereitung kann ggf. auch eine Entsorgung in die Umwelt möglich sein. Einige Verunreinigungen können sowohl bei der Wiederverwendung als auch bei der Abwasserreinigung zur technischen Herausforderung werden – so kann es etwa zum Zusetzen von Filtern, Festbetten und anderen Anlagenteilen teilen durch Polymergele, Feststoffe oder Ausfällprodukte kommen.

Flutwasser

Flutwasser wird einerseits eingesetzt, um hydrostatische Dichtheits- und Druckbeständigkeitstests der Anlagen durchzuführen. Andererseits werden durch das Wasserfluten Bohrlöcher gereinigt und damit der Ölfluss angeregt. Zur Stabilisierung des Flutwassers enthält dieses gewöhnlich eine Reihe chemischer Zusätze, etwa Korrosionsinhibitoren, Biozide, Sauer-

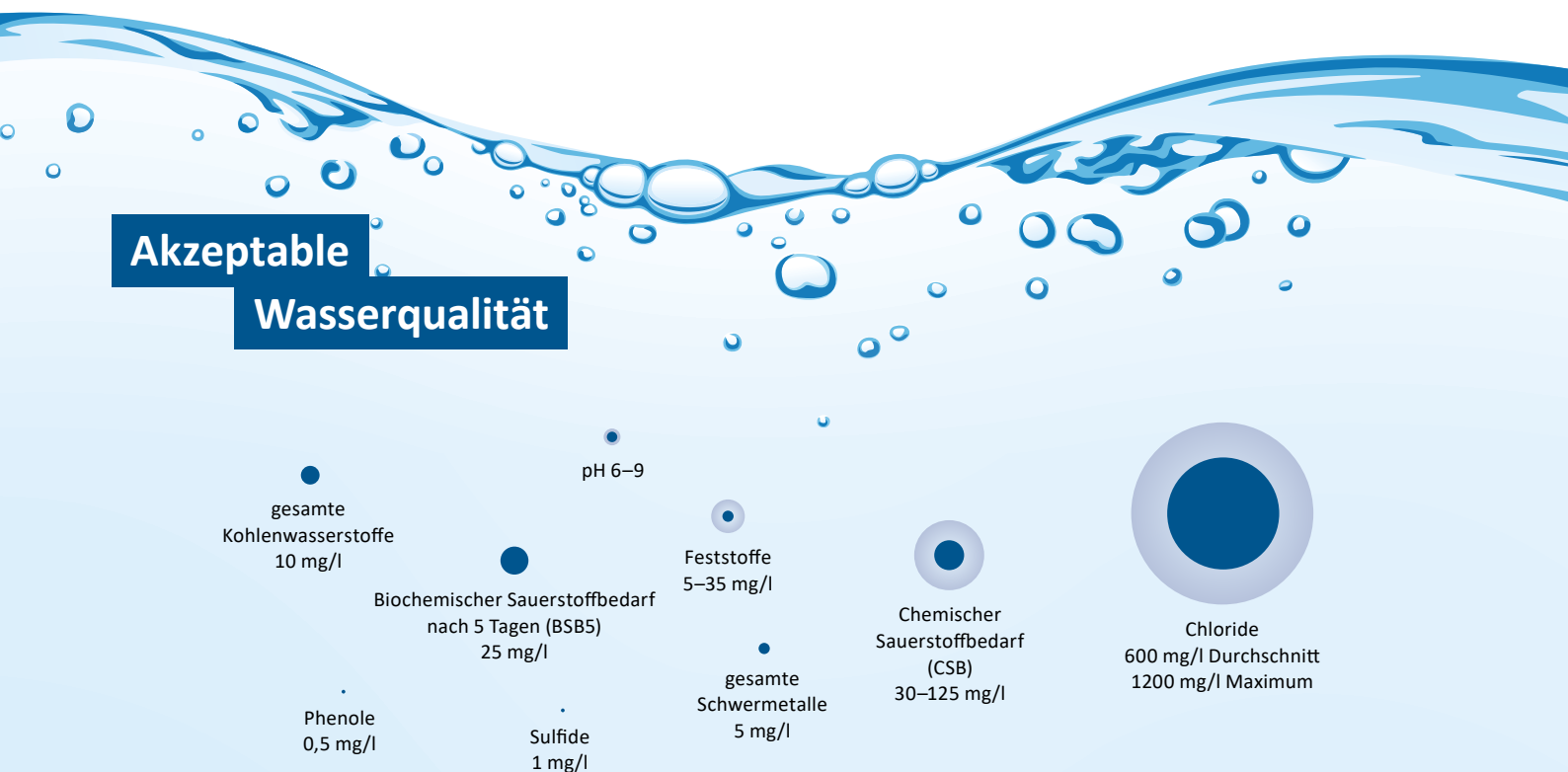


Abbildung 2: Akzeptable Wasserqualität für die Einleitung von aufbereitetem Lagerstättenwasser in Oberflächengewässer ^{[27] [28] [29]}

stoffbinder, Säuren und ggf. Tracerstoffe. Das nach dem Einsatz anfallende Abwasser ist zusätzlich dazu mit Stoffen aus dem Bohrloch verunreinigt, etwa mit Ölen, Fetten und anderen Kohlenwasserstoffen (z.B. Benzen, Toluol, Ethylbenzen, Xylen) sowie mit Feststoffen, Eisen und häufig auch Chlor^[22]. Als beste verfügbare Technologie gilt heute die Wiederverwendung des Flutwassers, ggf. nach Aufbereitung vor Ort oder durch Dritte. Falls es entsorgt werden soll, ist eine physikalisch-chemische Reinigung mit anschließender Qualitätskontrolle durchzuführen^[25].

Aufbereitungsverfahren

Verfahrenswahl und -stufen

Die Wahl der Abwasser-Aufbereitungsverfahren ist abhängig von der Zusammensetzung, von den konkreten geologischen Lagerstättenbedingungen vor Ort und der ggf. angestrebten Wieder- oder Weiterverwendung von Wasserströmen. In der Regel geschieht zuerst eine Vorbehandlung durch physikalische und chemische Trennverfahren. Dazu zählt die Grobfiltration mit Rechen, Filtern oder Festbettfiltern, oder die Sedimentation in Kombination mit elektrischer oder chemischer Koagulation zur Entfernung von Schwebstoffen.

Eine weitere Aufbereitung mittels biologischer Verfahren ist normalerweise aufgrund der nur schwer abbaubaren Organik im Abwasser nur schwer durchführbar. Stattdessen kommen mehrere Stufen weitergehender physikalischer und chemischer Verfahren zum Einsatz, um folgende Trenaufgaben zu erfüllen^[31]:

- Weitere Entfernung suspendierter Feststoffe
- Grob- und Feinabtrennung dispergierter und ungelöster Öle und Fette
- Abtrennung anderer gelöster Kohlenwasserstoffe im niedrigen Konzentrationsbereich
- Abreicherung gelöster Schwermetalle

Soll ein Abwasserstrom nach der Aufbereitung wieder- oder weiterverwendet werden – etwa als Flutwasser oder Bestandteil der Fracking-Flüssigkeit –

so muss die Verfahrenswahl höheren Qualitätskriterien genügen. In den meisten Fällen ist zumindest zusätzlich eine Entsalzung vorzusehen.

Weitergehende Aufbereitung

Zur Abtrennung von Feststoffen und Ölen werden in der weitergehenden Aufbereitung größtenteils physikalische Trennverfahren eingesetzt, die sich den Dichteunterschied der unterschiedlichen Phasen zunutze machen. Die Abtrennung feiner suspendierter Partikel kann durch die Dosierung von Flockungsmitteln unterstützt werden, während zur Abtrennung dispergierter Öle Emulsionsspalter dosiert werden können. Konkret kommen folgende Technologien in Frage^[25, 32]:

- Schwerkraftabscheider
- Hydrozyklone
- Skimmer
- Zentrifugen
- Gasflotation

Nach der Phasentrennung enthält das Abwasser noch organische und anorganische Verunreinigungen in gelöster Form, üblicherweise Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle. In den meisten Fällen werden diese durch chemische Trennverfahren aus dem Abwasser entfernt, es können aber je nach Anwendungsfall auch spezielle Filtrationsverfahren oder thermische Verfahren zum Einsatz kommen. Die häufigsten Grundoperationen sind folgende^[25]:

- Membranfiltration
- Adsorption
- Polymerextraktion
- Dampfstrippen

Wiederverwendung

Die Wiederverwendung von Abwasser in der Öl- und Gas-Förderung setzt meist eine zusätzliche Entsalzung voraus^[33]. Entfernt werden dabei sowohl Kationen (z.B. Natrium, Calcium, Magnesium, Kalium) als auch Anionen (z.B. Chlorid, Nitrat, Sulphat). Typischerweise werden folgende Verfahren eingesetzt:

- Ionentausch
- Membranverfahren
- Destillation □

FALLSTUDIE: Mineralölraffinerie-Abwasserbehandlung in der Provinz Shandong, China

Industrielle Membran-Bioreaktor (MBR)-Module

Hintergrund

Die Raffination von Rohöl ist weltweit eine wichtige Industrie, so auch in Indien und in Nordafrika. Bei der biologischen Behandlung von Abwässern aus Erdölraffinerien kommt es aufgrund der komplexen Abwasserzusammensetzung und einem vergleichsweise hohen Ölanteil im Abwasser oft zu Problemen bei der Einhaltung vorgeschriebener Ablaufwerte. Eine der Herausforderungen, die hierbei auftreten, sind ein teilweise schlechtes Absetzverhalten des Belebtschlammes in der Nachklärung der Biologie und die Bildung von sogenanntem Schwimmschlamm, der in der Nachklärung nicht zurückgehalten werden kann. Aus diesem Grund werden in diesem Bereich Technologien bei der Abwasserreinigung eingesetzt, die ein hohes Maß an Betriebssicherheit bieten. Bei dem Projekt in der Provinz Shandong / China wurde daher die Membran-Bioreaktor-Technik (MBR) für die Abwasserreinigung ausgewählt.

Parameter	Zulauf	Ablauf	Erforderlich
CSB [mg/l]	700	≤ 60	≤ 70
BSB [mg/l]	200	≤ 15	≤ 20
Gesamt-Stickstoff [mg/l]	100	8	≤ 15
Gesamt-Phosphor [mg/l]	3	0	≤ 1
TSS [mg/l]	230	≤ 10	≤ 10
Öl [mg/l]	25	0	≤ 5
Trübung (NTU)	-	≤ 0,5	≤ 1

Tabelle 1: Zulauf- und Ablaufparameter

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Das zu behandelnde Abwasser stammt aus der Raffination von Erdöl und besitzt neben hohen CSB- und BSB-Werten hohe Anteile an Ölen und Lösemitteln. Um die gesetzlich vorgeschriebenen Ablaufwerte (Tab. 1) nach der Abwasserbehandlung einzuhalten, wurde eine geeignete Prozessführung gewählt. Besonders Lösemittel, Öle und die im Rohöl vorhandenen Teerstoffe können Probleme im Anlagenbetrieb hervorrufen. Ein sicherer BSB- und CSB-Abbau kann in der biologischen Stufe nur erreicht werden, wenn diese Stoffe im Vorfeld abgetrennt werden. Weiterhin muss darauf geachtet werden, dass selbst bei schlechten Sedimentationseigenschaften des Schlammes in der Biologie und Schwimmschlamm-bildung ein erhöhter Feststoffanteil und damit verbunden erhöhte CSB- und BSB-Werte im Ablauf der Abwasserreinigungsanlage auszuschließen sind. Insbesondere dieser Aspekt prädestiniert ein membranestütztes Hybridverfahren, das niedrigste Feststoffkonzentrationen im Ablauf der biologischen Stufe erreichen kann.

Lösungsansatz

Aufgrund unzureichender Leistung wurde eine Kläranlage der Erdölraffinerie in der Provinz Shandong, China, auf eine MBR-Lösung mit MICRO-DYN BIO-CEL® XL-Modulen umgerüstet. In der Kläranlage wurden 14 BIO-CEL XL-Module eingesetzt, die eine Membranfläche von insgesamt 26.880 m² bieten. Die Module sind in zwei separaten Filtrationslinien



Abbildung 1: Getauchte Membranmodule nach Installation (links) und im Betrieb (rechts)

in einem einzigen Becken angeordnet. Der maximale und der durchschnittliche Durchfluss betragen 13.500 bzw. 9.600 m³/Tag. Zu den Prozessen des Klärsystems gehören außerdem:

- Ölabscheider
- CAF-Behandlung (Cavitation Air Flotation)
- DAF-Behandlung (Dissolved Air Flotation)
- Ausgleichsbehälter
- Anoxischer Primärtank
- Sedimentationsbehälter
- Sekundärer anoxischer Tank
- Filtrationsbehälter (MBR)

Ergebnisse

Die in Tab. 1 zusammengefassten Ergebnisse dieses MBR-Systems zeigen, dass MICRODYN BIO-CEL® XL-Module erfolgreich Abwässer aus Erdölraffinerien behandeln und die Anforderungen der Umweltge-

nehmung für Abwässer durchweg erfüllen können. Wie aus Tab. 1 hervorgeht, erfüllte das MBR-System die TSS-Abwasseranforderung von 10 mg/l. Die CSB-, BSB-, Gesamtstickstoff-, Gesamtphosphor-, Öl- und Trübungswerte wurden drastisch reduziert und übertrafen die Abwasseranforderungen des Kunden. Die Überwachung der Membranfiltrationsanlage erfolgt über die kontinuierliche Messung von Durchfluss, Transmembrandruck und Trübung.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Die Installation eines MBR-Systems ermöglicht einen stabilen Betrieb mit nahezu vollständiger Feststoffabtrennung auch unter herausfordernden Bedingungen (z.B. Schwimmschlamm). Die hier eingesetzten selbsttragenden MICRODYN-Module bieten eine sehr hohe Packungsdichte und einen vergleichsweise energieeffizienten Betrieb. □

2

CHEMISCHE

INDUSTRIE



Länderspezifische Informationen

Indien

Die chemische Industrie ist einer der ältesten Wirtschaftszweige Indiens und trägt signifikant zur nationalen wirtschaftlichen Entwicklung des Landes bei. Ein Großteil der produzierenden Chemie-Unternehmen ist in Gujarat angesiedelt, gefolgt von Maharashtra und anderen weniger bedeutenden Regionen. Die Regierung unterstützt diese wichtige Wirtschaftssäule durch die Genehmigung von 100 % ausländischer Direktinvestition und die lizenzfreie Produktion der meisten Chemieprodukte (abgesehen von gefährlichen Stoffen). Im letzten nationalen Fünf-Jahres-Plan (2012–2017) wurde neben vielfältigen Fördermaßnahmen auch ein Budget von

umgerechnet 83 Mio. USD zur Verbesserung der Umweltfreundlichkeit der Branche bereitgestellt. Das Wachstum der Branche wird für 2020–2025 auf 13–14 % geschätzt, das der Petrochemie im Speziellen auf 8–9 % ^[34]. Es sind sowohl nationale als auch internationale Großkonzerne zu finden. Einige der wichtigsten Chemieproduzenten in Indien sind Aarti Industries, Atul, BASF, Evonik, Pidlite Industries, Tata Chemicals und UPL ^[35].

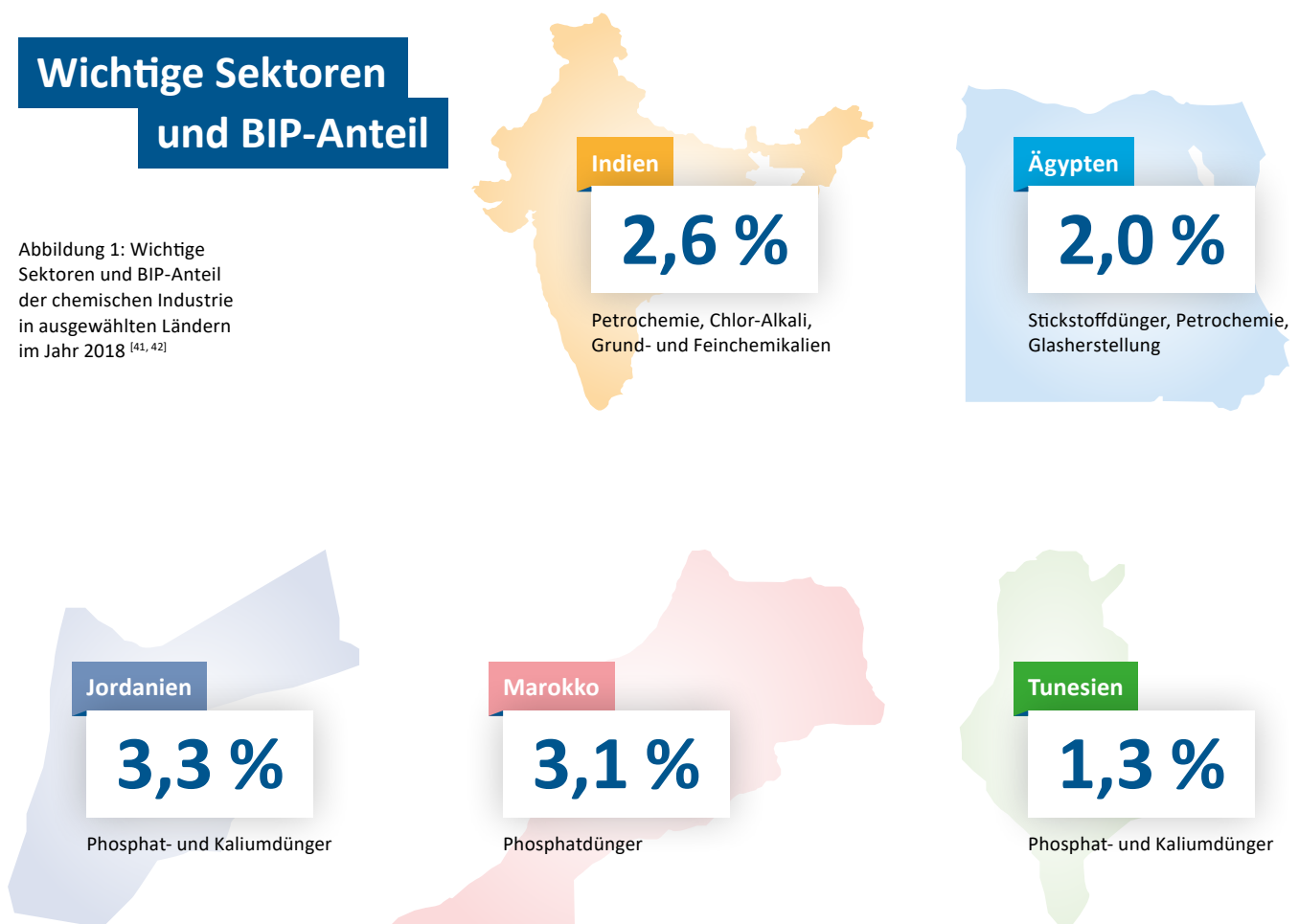
Die wichtigsten Sektoren der Chemischen Industrie in Indien sind die folgenden ^[34]:

- Petrochemie und organische Grundchemikalien
- Anorganische Grundchemikalien, insbesondere Düngemittel- und Chlor-Alkali-Industrie
- Polymere
- Fein- und Spezialchemikalien, insbesondere Farbstoffe und Pigmente
- Pharmazeutische Industrie



Wichtige Sektoren und BIP-Anteil

Abbildung 1: Wichtige Sektoren und BIP-Anteil der chemischen Industrie in ausgewählten Ländern im Jahr 2018 ^[41, 42]



MENA

In der MENA-Region hat sich die chemische Industrie im engen Zusammenhang mit den vorhandenen Ressourcen entwickelt, d.h. die bedeutendste Rolle spielt die Verarbeitung von Erdöl und -gas sowie mineralischen Rohstoffen (Abbildung 1).

In vielen MENA-Ländern ist die Düngemittel-Herstellung der wichtigste und am stärksten wachsende Sektor. Ägypten produziert jährlich ca. 2 Mio. t Düngemittel mit steigender Tendenz und ist der größte Produzent von Stickstoffdünger (Ammonium/Harnstoff) in der Region. Der Markt wird dominiert von lokalen Firmen wie Abu Qir Fertilizers und Alexandria Fertilizers ^[36]. Weitere relevante Industriezweige sind die Petrochemie und Herstellung von Polymeren, v.a. in den industriell geprägten Regionen Kairo,

Alexandria und Helwan. Das Land verfolgt außerdem einen 20-Jahres-Plan zum Ausbau der Produktionskapazitäten für (Poly-)Ethylen und andere Olefine ^[37].

Andere bedeutende Ressourcen der Region sind Phosphat- und Kalimineralien. Jordanien und Tunesien besitzen entsprechende Vorkommen und produzieren daraus v.a. Phosphor- und Kaliumdünger ^[38]. Auf marokkanischem Territorium liegen über 70 % der globalen Phosphatreserven, sodass dort die Phosphatverarbeitung zu Düngemitteln und Phosphorsäure mit Abstand den wichtigsten Zweig der chemischen Industrie darstellt ^[39, 40]. Die führenden Unternehmen der marokkanischen und jordanischen Düngemittelindustrie sind durch Partnerschaften oder Finanzierungsmodelle eng mit den jeweiligen Landesregierungen verbunden.

Abwasseranfall in der Branche

Die chemische Industrie umfasst eine sehr breite Vielfalt an Produkten und Produktionsverfahren. Die eingesetzten Verfahren unterscheiden sich je nach Unterbranche und Produkt zum Beispiel im jeweiligen Syntheseweg, der Katalyse und der Verfahrensführung. Die Petrochemie umfasst die Erdöl-Raffinerie, die Herstellung organischer Grundchemikalien, z.B. durch thermisches oder katalytisches Cracken, und darauf aufbauend die Produktion von Polymeren einschließlich synthetischen Fasern. In der Düngemittelindustrie werden häufig mineralische Rohstoffe, etwa Kali- oder Phosphatgesteine, verarbeitet. Ammoniak als Grundstoff für Stickstoffdünger wird mit dem energieintensiven Haber-Bosch-Verfahren gewonnen. Die Chlor-Alkali-Industrie erzeugt Natronlauge, Kalilauge, Chlor und als Nebenprodukt Wasserstoff. Dies sind wichtige Rohstoffe für die Herstellung von anorganischen Grundchemikalien, Feinchemikalien und Verbrauchsgütern. Anorganische Stoffe werden meist durch Kristallisation, Filtration und Trocknung aus wässrigen Lösungen der Ausgangsrohstoffe hergestellt [22, 43].

Aus der Vielfalt der Unterbranchen und Produktionsverfahren ergibt sich in der chemischen Industrie eine hohe Heterogenität von Abwasserströmen. Im Abwasser finden sich nur in geringem Maße die Ausgangsstoffe oder Zielprodukte, sondern vielmehr die Nebenprodukte verschiedener Reaktionen. Solche Verunreinigungen entstehen, wenn Reaktionen in wässriger Phase stattfinden (Wasser als Lösemittel), Stoffströme mit wässrigen Lösungen gewaschen werden, oder im Falle von Kondensationsreaktionen [22, 44].



Abwasserströme und -eigenschaften

Petrochemie und organische Grundchemikalien

In fast allen Raffinerien wird Wasserdampf für Destillations- und Trennprozesse eingesetzt. Er kommt dabei in direkten Kontakt mit den zu raffinierenden Kohlenwasserstoffen und bildet in kondensierter Form den wichtigsten Abwasserstrom der Petrochemie: Saures Wasser mit Verunreinigungen von Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Kohlenwasserstoffen. Dieser Strom kann außerdem Rückstände von Metallen, Salzen und anderer Anorganik enthalten [22, 45].

Bei der Weiterverarbeitung von Erdöl zu organischen Grundchemikalien und schließlich zu Polymeren fallen die wichtigsten Abwasserströme als Reaktionswasser oder als Waschwasser bei der (Zwischen-) Produktwäsche an. Häufig liegen hohe Organikfrachten in Form organischer Säuren oder Laugen vor. Teilweise werden aber auch Öle, (Schwer-)Metalle und andere toxische und/oder refraktäre Verbindungen als Rückstände eingesetzter Katalysatoren und Hilfsstoffe im Abwasser gefunden [46, 47, 48].

Düngemittelherstellung

In den Prozessen der Düngemittelherstellung kommen neben katalysierten Oxidationen v.a. Filtrations-, Kristallisations- und Schmelzverfahren zum Einsatz. Dabei entstehen neben den eigentlichen Produkten

auch relevante Nebenproduktströme, wie etwa Schwefel- und Phosphorsäure in der Phosphatverarbeitung oder Harnstoff und Salpetersäure in der Ammoniakverarbeitung. Sowohl Produkte als auch Neben-

produkte finden sich teils in nennenswerten Konzentrationen im Abwasser wieder, das vor allem in der Abgaswäsche, aber auch als verbrauchtes Kühlmedium oder Lösungsmittel anfällt. Die Abwasserströme sind im Allgemeinen oft sauer und enthalten vielfältige anorganische Verunreinigungen [49, 50].

Chlor-Alkali-Industrie und andere anorganische Grundchemikalien

In Chlor-Alkali-Anlagen wird durch Elektrolyse einer Salzlösung Chlor und Alkalilauge in Form von Natriumhydroxid oder Kaliumhydroxid hergestellt. Dabei entstehen sowohl saure als auch alkalische Wässer mit hohen Konzentrationen an gelösten Salzen und Metallen. Viele Wasserströme sind sehr hoch konzentriert, sodass oft die Rückgewinnung von Nebenprodukten, die Kreislaufführung von Hilfsstoffen oder die Eindampfung und Entsorgung sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll sind. Von besonderer Bedeutung sind die in traditionellen Chlor-Alkali-Anlagen eingesetzten Hilfsstoffe Quecksilber (beim Quecksilber-Verfahren) und Asbest (beim Diaphragma-Verfahren). Beide Verfahren gelten jedoch heute nicht mehr als beste verfügbare Technik und werden zunehmend durch das moderne Membranzellverfahren ersetzt, bei dem das Abwasser vergleichsweise gering belastet ist [51, 52].

Generell enthalten Abwasserströme aus der Herstellung anorganischer Grundchemikalien häufig Chloride, Sulfate, Phosphate, Fluoride und andere anorganische Verbindungen. Hier können außerdem Ammoniak und hohe Feststoffgehalte eine wichtige Rolle spielen [50, 53]. Abwässer aus der Natriumkarbonat-Produktion sind oft durch hohe pH-Werte und hohe Feststoffgehalte gekennzeichnet, während schwefelsäurehaltiges Abwasser bei der Chlorgaswäsche anfällt.

Aufbereitungsverfahren

Verfahrenswahl und -stufen

Die heterogenen und vielfältig belasteten Abwasserströme der chemischen Industrie erfordern häufig komplexe Aufbereitungsschemata, deren konkrete Ausführung von der jeweiligen Abwasserzusammensetzung abhängt. Viele Abwasserströme enthalten hohe Organikfrachten mit guter biologischer Abbaubarkeit – in diesen Fällen bildet die biologische Reinigung den Kern der Abwasseraufbereitung. Ist das Abwasser zusätzlich mit störenden Stoffen belas-

	Neutra-lisation	Fällung	Adsorption	Ionen-tausch	Extraktion	Strippen	Oxidation
Petrochemie und organische Grundchemikalien	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Düngemittelherstellung	✓			✓		✓	
Chlor-Alkali-Industrie und andere anorganische Grundchemikalien	✓	✓	✓	✓			✓

Tabelle 1: In der chemischen Industrie übliche Verfahren zur Abwasser-Vorbehandlung mit den jeweiligen Unterbranchen, in denen sie Anwendung finden (basierend auf [22, 46, 48, 50, 53, 54])

tet, muss es jedoch zunächst einer Vorbehandlung unterzogen werden, die u.a. folgende Ziele verfolgen kann ^[22]:

- Neutralisation, um optimale Bedingungen zum biologischen Abbau zu schaffen
- Entfernung von Stoffen mit toxischer Wirkung auf die Biologie
- Erhöhung der biologischen Abbaubarkeit des Abwassers (z.B. durch Oxidation)
- Entfernung von biologisch nicht abbaubaren Verunreinigungen
- Frachtreduktion von Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) oder Stickstoff entsprechend der Kapazität der Biologie

Die Aufbereitung von Wasserströmen ist in der chemischen Industrie nur schwer von Produktions- und Produktionshilfsprozessen abzugrenzen, zum Beispiel wenn es um die Kreislaufführung von Lösemitteln oder Waschwässern geht. Mit wachsenden technischen Möglichkeiten entwickeln sich auch Potenziale zur Aufbereitung, Rückführung und Weiterverwendung von Hilfsstoffen und Nebenprodukten aus wässriger Lösung. Auch spielt die Aufbereitung von Prozesswasser vor dem Einsatz im eigentlichen Prozess eine wichtige Rolle.

Vorbehandlung von Abwässern

Fast alle industriellen Abwässer müssen vor der biologischen Reinigung vorbehandelt werden. Um die oben genannten Ziele zu erreichen, kommen v.a. chemisch-physikalische oder thermische Aufbereitungsverfahren zum Einsatz (Tabelle 1). Die häufigsten sind ^[22, 46, 48, 50, 53, 54]:

- Neutralisation
- Fällung
- Adsorption
- Ionentausch
- Extraktion
- Dampfstrippen
- Oxidation

Biologische Reinigung

Die Abwasserströme der chemischen Industrie haben eine sehr unterschiedliche physikalische und chemische Beschaffenheit. Viele Abwasserströme der chemischen Industrie weisen günstige Eigenschaften für biologische Reinigungsverfahren auf, d.h. hohe Organikfrachten und moderate Temperaturen. Die biologische Reinigung umfasst zwei Stufen:

- Kohlenstoff-Abbau über das aerobe Belebungsverfahren
- Stickstoff-Elimination über Nitrifikation und Denitrifikation

Die Anlagen können mehrstufig mit unterschiedlicher Verschaltung der einzelnen Verfahrensstufen ausgelegt werden. Die Belüftung erfolgt typischerweise über robuste Injektorsysteme, die einen effizienten Sauerstoffeintrag ermöglichen. Teilweise ist eine Behandlung des Abgases der ersten biologischen Stufe nötig, um den Austrag flüchtiger Stoffe zu verhindern.

Zulauf- und Konzentrationsschwankungen, störende Verunreinigungen und hohe Salzgehalte (>20 g/l) können sich jedoch problematisch auf den Betrieb einer biologischen Reinigung auswirken. Abwässer aus der Petrochemie beinhalten zudem oft nur geringe Mengen verwertbarer Phosphorverbindungen, was eine zusätzliche Dosierung von Phosphaten oder Phosphorsäure zur biologischen Reinigung notwendig macht ^[22, 55].

Weitergehende Aufbereitung

Traditionell etabliert und für eine hohe Anlageneffizienz unerlässlich ist die produktionsnahe oder produktionsintegrierte Rückgewinnung und Wiederverwendung von Hilfsstoffen, z.B. die Kreislaufführung von Kondensaten oder die Rückgewinnung von Lösemitteln mittels Destillation. Soll Wasser zurückgewonnen und wiederverwendet werden, wird dafür meist Ultrafiltration und Umkehrosmose eingesetzt. Mit der zunehmenden Bündelung produzierender Unternehmen in Industrieparks rückt darüber hinaus die Schließung lokaler Stoffkreisläufe durch die Rückgewinnung und Weiterverwendung von (Neben-) Produkten in Reichweite. Vor allem aber ermöglichen Industrieparks eine effiziente Aufbereitung nun auch für hochkomplexe Abwässer in der chemischen Industrie ^[44]. □

Design und Betrieb einer Zero Liquid Discharge (ZLD)-Anlage

Hintergrund

2017 wurde durch Euro American Plastic Products (EAP) eine neue Produktionsanlage für die Beschichtung von Kunststoffteilen für die Automobilindustrie in der Nähe von Neu Delhi (Indien) errichtet. REMONDIS wurde von EAP im Rahmen eines BOOT-Auftrages mit dem Bau, der Finanzierung und dem Betrieb der Abwasseranlage beauftragt.

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Die Abwasserzusammensetzung ist typisch für diese Art der galvanischen Beschichtungen. Tab. 1 zeigt die

Parameter	Wert
Menge [m³/Tag]	200
pH	4–6
Lf [µS/cm]	12.000
CSB [mg/l]	113
Cr gesamt [mg/l]	1.418
Ni [mg/l]	54
Cu [mg/l]	67
Fe [mg/l]	9

Tabelle 1: Zusammensetzung Mischabwasser

Mittelwerte im November – Dezember 2017.

Aufgrund der zunehmenden Industrialisierung und dem daraus resultierenden Wasserbedarf bei gleichzeitig limitierter Wasserverfügbarkeit wurde durch die örtlichen Genehmigungsbehörden sowohl die ZLD-Technologie für die Abwasserbehandlung vorgeschrieben als auch die Zuteilung von Wassermengen für die Produktion limi-

tiert. Die Anlage musste in ein bestehendes Gebäude integriert werden, was insbesondere hinsichtlich der Puffer- und Ausgleichsbecken eine erhebliche Limitierung des verfügbaren Bauraums bedeutete.

Lösungsansatz

Die Abwasserbehandlung beginnt mit Teilstrombehandlungen für Chrom (VI)-Abwässer und für Abwässer mit hohem Komplexbildneranteil. Ersteres

wird durch Natriumbisulfit und Schwefelsäure reduziert, während das komplexbildnerhaltige Abwasser in einem separaten Batchprozess vorbehandelt wird. Anschließend erfolgt die Mischung aller Teilstrome und eine Schwermetallfällung. Die Feststoffabtrennung erfolgt über Parallelplattenabscheider, Kiesfilter und eine Kammerfilterpresse. Diese Aufbereitung entspricht dem üblichen Verfahren auch ohne ZLD-Technik. Für die Wiederverwendung des Abwassers ist zusätzlich die Abtrennung der im Produktionsprozess eingebrachten Salze mittels zweistufiger Umkehrosmose (RO) erforderlich, wobei die Stufen eine Permeatausbeute von 80 % bzw. 70 % erreichen. Der RO-Zulauf wird durch Ultrafiltration vorbehandelt, um eine Blockierung der RO-Membran mit partikulären Stoffen zu vermeiden. Der Aufbau der Membranstufe ist in Abb. 1 dargestellt.

Ergebnisse

Durch die beschriebenen Aufbereitungsschritte kann ca. 90 % des Abwassers wiederverwendet werden, während im Konzentratstrom Salze und organische Reststoffe verbleiben (Tab. 2). Diese Konzentrate werden eingedampft und die Sole zusammen mit dem Filterkuchen entsorgt. Das gewonnene Kondensat wird dem Prozesswasserkreislauf wieder zur Verfügung gestellt.

Aufbereitungsstufe	Leitfähigkeit [µS/cm]
Permeat erste RO-Stufe	220
Konzentrat erste RO-Stufe	38.500
Permeat zweite RO-Stufe	30
Konzentrat zweite RO-Stufe	3.700

Tabelle 2: Erzeugte Prozesswasserqualitäten

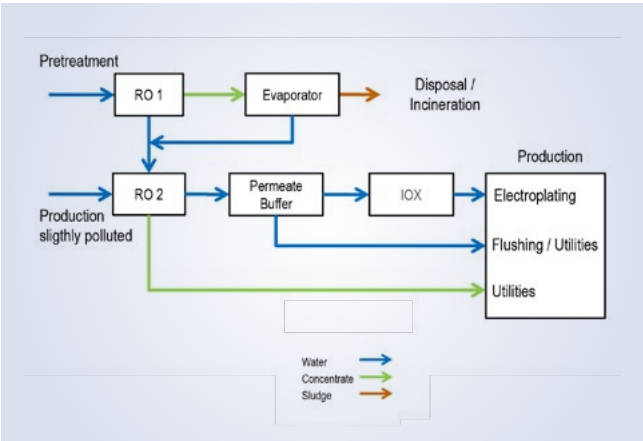


Abbildung 1: Aufbau Membranstufe mit ZLD-Technik in der Kunststoffgalvanik (links) und Bild der RO-Stufe 1 (rechts)

Um die Aufbereitungskosten zu optimieren wird bei der Rückführung des aufbereiteten Wassers in die Produktion zwischen drei verschiedenen Qualitätsstufen unterschieden. Das Konzentrat der zweiten RO-Stufe hat noch eine ausreichende Qualität für einfache Spülprozesse und sonstige Brauchwasseranwendungen. Das Permeat dieser Stufe kann entweder direkt im Galvanikbad eingesetzt werden oder es wird für besonders hohe Qualitätsanforderungen noch einmal über einen Mischbettaustauscher gereinigt.

Die anspruchsvollste Aufgabe während der Inbetriebnahme war die Erzeugung einer gleichmäßigen Abwasserqualität im Zulauf zu den RO-Stufen und die Erarbeitung eines Reinigungsregimes für alle Membranstufen. Insbesondere die erste Stufe der RO-Anlage ist besonders hohen Belastungen ausgesetzt und benötigt eine entsprechend hohe Reinigungsfrequenz. Für die Membranreinigungen hat sich als Optimum zwischen Ausbeute und Reinigungsaufwand das in Tab. 3 beschriebene Reinigungsregime ergeben.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Remondis lieferte hier ein komplettes Aufbereitungssystem für Abwasserbehandlung und Prozesswasseraufbereitung im Sinne des ZLD. Entscheidend für den effizienten Betrieb der Anlage ist die robuste Vorbehandlung durch Ultrafiltration, die hohe Foulingresistenz und effiziente Reinigung der RO-Stufen, sowie die zweckmäßige Verschaltung und Wiederverwendung der anfallenden Wasserströme. □

Stufe	Häufigkeit	Reinigungschemikalien
UF	monatlich	NaOCl und Zitronensäure
erste RO-Stufe	alle 7 bis 10 Tage	HCl und NaOH
Zweite RO-Stufe	monatlich	HCl und NaOH

Tabelle 3: Reinigungsschema Membranstufen

Parameter	Zulauf
Menge [m³/Tag]	200
pH	4–6
Leitfähigkeit [µS/cm]	12.000
CSB [mg/l]	113
Cr gesamt [mg/l]	1.418
Ni [mg/l]	54
Cu [mg/l]	67
Fe [mg/l]	9

Tabelle 4: Übersicht über Zulaufwerte der Wasseraufbereitung – Mittelwerte des Inbetriebnahmezeitraumes Nov. – Dez. 2017. Ablaufwerte in diesem Fall nicht relevant, da es sich um eine ZLD-Anlage handelt.

FALLSTUDIE: Optimierte Prozesswasseraufbereitung zur Düngemittelproduktion in Ägypten

Optimierung der Prozesswasseraufbereitung mit Umkehrosmose und Ionenaustauscher

Hintergrund

Alexandria Fertilizers Co. (Alexfert) ist einer der größten Düngemittelhersteller Ägyptens, der 2003 als Aktiengesellschaft gegründet wurde. Die Herstellung von Dünger erfordert große Mengen an hochwertigem Prozesswasser, welches vornehmlich aus einem Nil-Kanal gewonnen wird. Durch die jahreszeitlichen Schwankungen ist eine Aufbereitung besonders herausfordernd, da eine gleichbleibend hohe Wasserqualität bei gleichzeitig hoher Ausbeute gefordert ist (Tab. 1).

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Die Anlage in Alexandria produziert einen Prozesswasserstrom von ca. 5.750 m³/Tag und hat als Vorbehandlung eine Flockung zur Reduzierung der organischen Substanzen und eine Kalt-Kalkenthärtung. Um die gewünschte Qualität unter anderem zur Nutzung als Kesselspeisewasser zu erreichen, wurde eine Kombination von verschiedenen Ionenaustauscherprozessen (stark sauer (SAC), schwach basisch (WBA), stark basisch (SBA) und ein Mischbett) zur Demineralisierung eingesetzt. Da das Kanalwasser jedoch je

Abbildung 1: Wasseraufbereitung der Alexfert-Düngemittelproduktion mit Umkehrosmose-Anlage



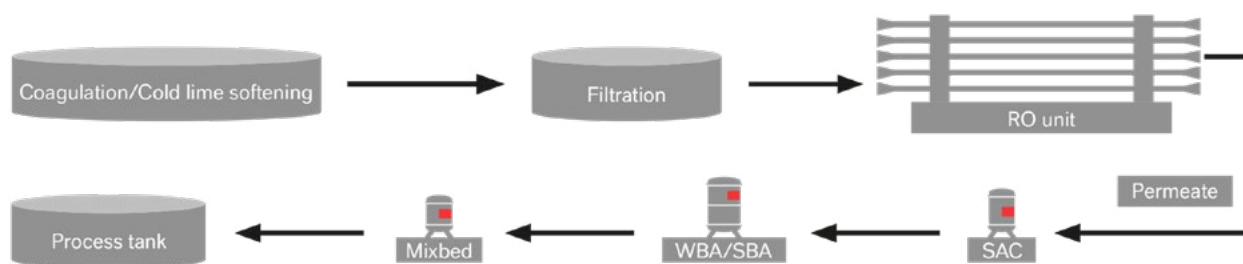


Abbildung 2: Prozesswasserbehandlung mit Umkehrosmose und Ionenaustauscher

nach Jahreszeit einen Salzgehalt von 300–550 mg/l hat, war eine regelmäßige Regenerierung der Ionenaustauscher mit Säure und Lauge notwendig. Auch verkürzte das Vorkommen von Kieselsäure die Standzeit der Ionenaustauscher.

Lösungsansatz

Lassen sich Ionenaustauscher unter schwierigen Bedingungen nur ineffizient mit kurzen Standzeiten und hohem Regenerationsmitteleinsatz betreiben, kann eine Vorbehandlung nötig sein. Die oben beschriebene Anlage wurde 2016 durch eine Umkehrosmose erweitert, die die Salzfracht vor den Ionenaustauschern reduziert (Abb. 1, 2). Da das Kanalwasser trotz Vorbehandlung eine geringe Wasserqualität hat, wurden die Umkehrosmose-Elemente Lewabrane B400 FR von LANXESS* eingesetzt, die besonders für solche Qualitäten geeignet sind. Die Anlage besteht aus zwei Linien mit jeweils zwei Konzentrastufen. Die Permeatausbeute der Umkehrosmose beträgt 74 %. Zur Demineralisierung mit Ionenaustauschern werden monodisperse Lewatit-Harze verwendet, um den Chemikalieneinsatz weiter zu optimieren.

Ergebnisse

Durch die hochvernetzte Polyamid-Membran können über 99,7 % der Salze entfernt werden. Die Leitfähigkeit liegt nach der Umkehrosmose bei 3–5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, bei einer Leitfähigkeit im Zulauf von 700–1.100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Da sich dadurch die Standzeiten der Ionenaustauscher um das Vierfache erhöhen, werden 60 % der Regenerationschemikalien eingespart. Im Ablauf der Lewatit-Ionenaustauscher konnte eine Leitfähigkeit des Produktionswassers von 0,08 $\mu\text{S}/\text{cm}$ erreicht werden, und zwar bei einer finalen Kieselsäurekonzentration von 2 ppb.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

LANXESS stellte eine besonders robuste Umkehrosmose-Anlage bereit, die auch bei niedriger Zulaufqualität eine gleichbleibend hohe Permeatqualität sicherstellt. Durch das spezielle Design der Feedspacer wird das Membranfouling – und damit auch der Druckabfall im Modul –

deutlich verringert. Die Prozessintegration erhöht die Standzeit der Ionenaustauscher und reduziert die Regenerationschemikalienmenge. □

Leistung	5.750 m ³ /Tag
Ausbeute	Ca. 74 %
Wasserart	Kanalwasser aus dem Nil
Salzgehalt Zulauf	300–550 mg/l
Salzgehalt Ablauf	<0,01 mg/l
Installation	Februar 2016

Tabelle 1: Zusammenfassung der Anlagenparameter in der Wasseraufbereitung bei Alexfert, Alexandria

*Das Membrangeschäft der Lanxess Deutschland GmbH wurde nach Redaktionsschluss von der SUEZ WTS Germany GmbH in Ratingen übernommen.

3

PHARMAZEUTISCHE

INDUSTRIE



Länderspezifische Informationen

Indien

Die pharmazeutische Industrie Indiens ist – als Unterbranche der chemischen Industrie – von großer nationaler und internationaler Bedeutung. Indien ist der größte Hersteller von Generika weltweit und stellt mehr als 80 % der eingesetzten AIDS (Acquired Immune Deficiency Syndrome)-Medikamente her. Außerdem ist Indien der führende Produzent von Paracetamol und über 50 % der global eingesetzten Impfstoffe stammen aus Indien. Das Branchenwachstum betrug 2019 9.8 %, während das Wachstum biotechnologischer Unterbranchen sogar auf ca. 30 % jährlich geschätzt wird ^[56]. Der sehr diversifizierte Markt beherbergt sowohl indische Firmen (z.B. Sun Pharma und Dr. Reddy's), sowie die meisten international tätigen Pharma-Konzerne (z.B. Pfizer, GSK, Sanofi, Merck, Roche) ^[57].

Die Medikamentenherstellung in Indien basiert stark auf importierten pharmazeutischen Wirkstoffen, die zum größten Teil aus China stammen. Ein wichtiges mittelfristiges Ziel zur Stärkung der nationalen Industrie ist demnach die Förderung der Wirkstoffproduktion im Land. Auf Empfehlung des Katoch-Komitees werden deshalb landesweit Industrieparks errichtet, die mit der entsprechenden Infrastruktur und gebündelten Dienstleistungen (Energiebereitstellung, Abwasserreinigung, Lagerräume, Testlaboratorien usw.) Anreize speziell für pharmazeutische Wirkstoff- und Medikamentenhersteller bieten sollen. Ende 2019 wurde die Realisierung eines solchen Parks in Hyderabad mit entsprechender staatlicher Förderung beschlossen („Hyderabad Pharma City“) ^[58].

Umwelt- und speziell wasserbezogene Aspekte der Produktion regelt in Indien das „Central Pollution Control Board“, das u.a. Einleitbedingungen für pharmazeutisches Abwasser festlegt. Kritisch diskutiert wird momentan besonders die Einleitung von Antibiotikarückständen aus Produktionsbetrieben, die nachweislich



zur Verbreitung antibiotikaresistenter Keime in indischen Oberflächengewässern führt. Ein Gesetzesentwurf zur strengeren Regulierung und Kontrollierung von Antibiotika-Konzentrationen in industriellen Abwasserströmen befindet sich seit Anfang 2020 in der Vernehmlassung und könnte die Anforderungen an die pharmazeutische Abwasserreinigung in Indien zukünftig deutlich erhöhen ^[59].

MENA

Die pharmazeutischen Industrien der MENA-Staaten sind vergleichsweise wenig exportorientiert und zielen stattdessen auf die Abdeckung des nationalen Bedarfs. Daraus ergibt sich eine starke Abhängigkeit vom nationalen Gesundheitssystem des jeweiligen Landes ^[60].

Wichtigster Medikamentenhersteller der Region ist Ägypten, dessen Branchenwachstum jährlich ca. 8 % beträgt. Sowohl privatisierte (Novartis, GSK, Sanofi) als auch staatliche Unternehmen tragen zur pharmazeutischen Produktion bei, die 90 %

des nationalen Bedarfs an Medikamenten deckt (v.a. durch Generika). Die Branche gilt insgesamt als stabil und zukunftsfähig, auch wenn die staatliche Kontrolle der Medikamentenpreise und die starke Abhängigkeit von importierten Ausgangsstoffen (ca. 90 %) Herausforderungen für die Produktion im Land bedeuten ^[61, 62].

Die pharmazeutische Industrie Marokkos ist die zweitwichtigste Chemiebranche im Land (nach Phosphaten) und die zweitgrößte Afrikas (nach Ägypten). Die Branche wächst mit 6.7 % jährlich, führender Hersteller ist Sanofi, gefolgt von den lokalen Firmen Cooper und Bottu SA ^[63]. 2015 konnte das Land ca. 65 % des nationalen Medikamentenbedarfs mit eigener Produktion abdecken ^[64]. Eine ähnliche Quote erzielt Tunesien, wo 60 % der Medikamente aus nationaler Herstellung stammen ^[65]. Auch in Jordanien spielt die Medikamentenproduktion eine wichtige Rolle in der nationalen Wirtschaft. Die größtenteils in Industriezonen um Amman hergestellten Pharmazeutika werden teilweise in Nachbarländer exportiert ^[66].

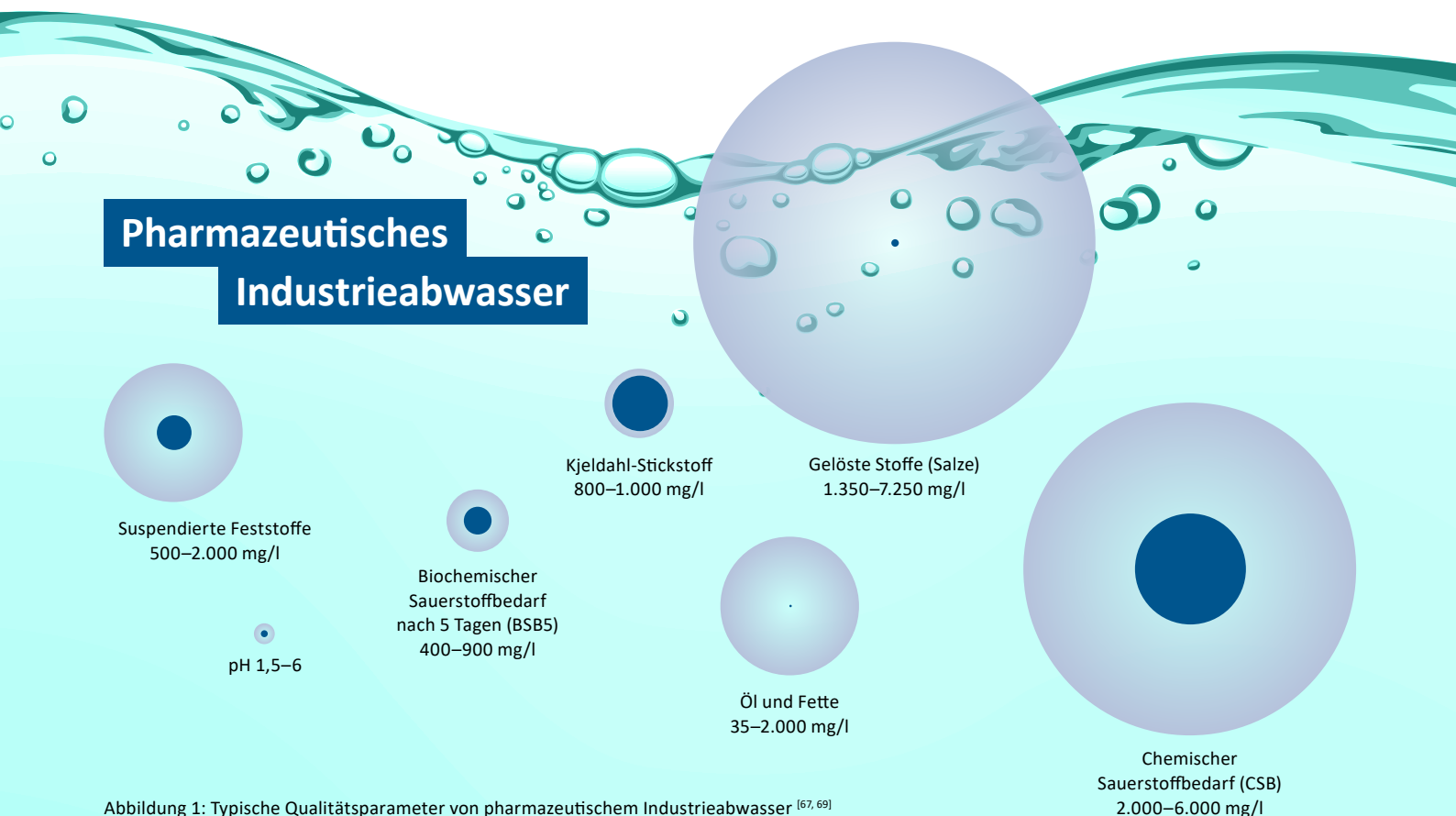


Abbildung 1: Typische Qualitätsparameter von pharmazeutischem Industrieabwasser ^[67, 69]

Branche und Abwasseranfall

Die pharmazeutische Industrie umfasst die Herstellung, Extraktion, Verarbeitung, Aufreinigung und Verpackung chemischer oder biologischer Stoffe, die in Arzneimitteln und Kosmetika eingesetzt werden. Die Branche ist gekennzeichnet von einer breiten Vielfalt an Produkten und Produktionsverfahren. Die häufigsten Verfahrensschritte in der pharmazeutischen Industrie sind die folgenden:

- Synthese organischer Chemikalien
- Biotechnologische Prozesse
- Extraktion von Naturstoffen
- Produktformulierung und -abfüllung

Die pharmazeutische Industrie unterscheidet sich von anderen Branchen v.a. durch die häufigen Chargen- und Produktwechsel. Einzelne Produktionsschritte werden häufig nacheinander in semikontinuierlicher oder Chargen-Produktionsweise in Mehrzweckreaktoren durchgeführt. Bei jeder Zwischenreinigung entstehen große Mengen an Spülwasser, die den Hauptteil des industriellen Abwassers ausmachen. Spülwässer können u.a. nennenswerte Konzentrationen an pharmazeutisch wirksamen Stoffen aufweisen und müssen deshalb gründlich gereinigt werden. Darüber hinaus fallen Regenerierlösungen und Konzentrate aus der üblicherweise sehr aufwendigen (Roh-)Wasseraufbereitung sowie Abschlammwasser aus den Kühltürmen an. Die größten Abwassermengen der pharmazeutischen Industrie stammen aus der chemischen Synthese und den Fermentationsprozessen ^[22].

Synthese

Die Synthese bezeichnet die Herstellung pharmazeutischer Wirkstoffe aus organischen und anorganischen Ausgangsstoffen in einer Reihe chemischer Reaktionen. Dabei kommt es typischerweise zur Bildung vieler Zwischen- und Nebenprodukte. Die Zielprodukte werden schließlich durch Trennverfahren (z.B. Flüssig-Flüssig-Extraktion, Kristallisation oder Filtration) separiert. Den unterschiedlichen chemischen Reaktionen entsprechend ergeben sich

sehr heterogene Syntheseabwässer, die Ausgangsstoffe, pharmazeutisch wirksame Produkte und Nebenprodukte sowie vielfältige Hilfsstoffe enthalten. Als Hilfsstoffe kommen neben Lösungsmitteln auch Säuren, Basen, Nitrate, Sulfate und Cyanide zum Einsatz. Bei pH-Werten von 1–11 ist der chemische und biologische Sauerstoffbedarf dieser Abwässer typischerweise hoch ^[67].

Fermentation

Biotechnologische Prozesse umfassen die Anzucht, Kultivierung und Fermentation von Mikroorganismen wie Pilzen und Bakterien. Während der Fermentation werden Nährstoffe, anorganische Salze und andere Stoffe dosiert, und im Anschluss werden die Zielprodukte aus der Fermentationsbrühe abgetrennt (z.B. durch Fällung und Filtration). Wichtige Fermentationsprodukte sind u.a. Antibiotika, Steroide und Vitamine. Den wichtigsten Abwasserstrom aus Fermentationsprozessen stellen Fermentationsbrühen dar, die neben unverbrauchten Roh- und Nährstoffen auch Überreste von Mikroorganismen enthalten. Auch Hilfsstoffe, wie Puffer, Chelate und Desinfektionsmittel sowie Lösungsmittel und Fällmittel wie Metallsalze und Halogene finden sich im Abwasser wieder ^[67].

Abwasserströme und -eigenschaften

Typische Verunreinigungen

Pharmazeutisches Abwasser ist geprägt von einem hohen biologischen und chemischen Sauerstoffbedarf, flüchtigen organischen Verbindungen und teilweise hochwirksamen oder toxischen Stoffen. Dazu zählen viele der in der Produktion eingesetzten Ausgangsstoffe und Katalysatoren, sowie natürlich die pharmazeutischen Wirkstoffe selbst ^[68] (Abbildung 1). Das Vorkommen von Arzneiwirkstoffen im Abwasser ist einerseits aufgrund ihrer hohen Umwelttoxizität problematisch, andererseits spielen diese Stoffeinträge bei der Verbreitung mikrobieller Antibiotika-Resistenzen eine Rolle. Eine weitere wichtige Verunreinigung können verbrauchte Lösungsmittel

(z.B. Benzen, Phenol oder Toluol) darstellen, die in Produktionsprozessen als Reaktions- und Reinigungsmedien verwendet werden und über Lösungsmittel-Rückgewinnungssysteme in das Abwasser eingetragen werden. Generell liegt in der pharmazeutischen Industrie eine Herausforderung in der großen Heterogenität in Menge und Charakteristik der einzelnen Produktionsabwässer, sowie in der hohen Persistenz und schlechten biologischen Abbaubarkeit vieler Verunreinigungen ^[22, 69].

Aufbereitungsverfahren

Biologische Reinigung

Die Abwasserbehandlung erfolgt in der pharmazeutischen Industrie traditionell durch biologische Reinigungsverfahren. Das Abwasser enthält oft eine gut biologisch abbaubare Organikfracht. Oft finden sich aber auch Stoffe im Abwasser, die schwer biologisch abbaubar sind oder sogar toxisch auf die Biologie wirken können – dies wird für viele biologische Reinigungsverfahren zur Herausforderung. Die biologische Abbaubarkeit einer chemischen Verbindung hängt v.a. von deren Stereochemie, Toxizität und Konzentration ab. Von betrieblicher Seite spielen die Eignung der jeweiligen Stammkultur, die Abbaubedingungen und die Verweilzeit in der Biologie eine wichtige Rolle ^[66].

Am häufigsten werden in der pharmazeutischen Industrie aerobe Verfahren zur Abwasserreinigung eingesetzt, da sie sehr robust im Betrieb sind. Belebtschlammverfahren mit Sedimentation und hohen Schlammaltern sind häufig das Mittel der Wahl, zur Erreichung einer hohen Ablaufqualität werden aber auch vermehrt Membranbioreaktoren eingesetzt. Aerobe Verfahren haben sich zum Abbau vieler Arzneiwirkstoffe bewährt (z.B. Ibuprofen, Naproxen, Bezafibrat und Östrogene), stoßen aber v.a. bei Sulfonamiden an ihre Grenzen (z.B. Sulfamethoxazol, Clopamid, Sotalol). Anaerobe Verfahren sind weniger verbreitet, weil sie vergleichsweise anfällig gegenüber vielen pharmazeutisch wirksamen Stoffen und Desinfektionsmitteln sind ^[67].

In den letzten Jahrzehnten sind zunehmend auch die pharmazeutischen Wirkstoffe im Abwasser in den Fokus geraten, die zwar in vergleichsweise niedrigen Konzentrationen vorkommen, aber dafür schwer zu entfernen sind und eine hohe Umwelttoxizität aufweisen. Die Entfernung dieser Wirkstoffe möglichst nah an ihrer Quelle (d.h. dezentral im jeweiligen Abwasserstrom) dient u.a. folgenden Zielen:

- Entfernung von Stoffen mit toxischer Wirkung auf die Biologie
- Erhöhung der biologischen Abbaubarkeit des Wassers
- Entfernung von biologisch nicht abbaubaren Verunreinigungen

Je nach Rahmenbedingungen und Abwassermatrix kann es auch sinnvoll sein, den Abwasserstrom im Anschluss an die biologische Reinigung weiter aufzureinigen. In beiden Fällen wird die Entfernung persistenter Arzneiwirkstoffe durch weitergehende, physikalisch-chemische Reinigungsverfahren erreicht. Die häufigsten eingesetzten Verfahren sind ^[67, 69]:

- Koagulation und Flockung
- Fällung
- Adsorption
- Oxidation
- Membranfiltration

Auch wenn vielerorts noch keine verbindlichen Grenzwerte für die Einleitung bestimmter Arzneimittelwirkstoffe existieren, ist die weitergehende Aufreinigung in vielen pharmazeutischen Produktionsbetrieben bereits verbreitet. Dies liegt u.a. daran, dass global operierende Unternehmen häufig hohe betriebliche Qualitätsstandards definieren, die unabhängig von lokalen Auflagen einzuhalten sind.

Die Wiederverwendung aufgereinigten Abwassers kommt in der pharmazeutischen Industrie, wenn überhaupt, dann nur für produktionsferne Anwendungen in Frage. Grund dafür sind die international sehr hohen Qualitätsanforderungen an Reinwasserströme, die zu Produktions- und Reinigungszwecken verwendet werden dürfen. Auch eine Ausbringung in die Umwelt ist aufgrund von Verunreinigungen problematisch. Mehr Potenzial liegt hingegen in der Rückgewinnung und Wiederverwendung anderer Rohstoffe, wie etwa von Lösungsmitteln, Säuren



und einzelnen Wirkstoffen. Grundlage solcher Rückgewinnungsansätze ist häufig der Betrieb einer effizienten und dezentralen weiterführenden Abwasserreinigung ^[22].

Oxidation

Viele chemische Verbindungen, die schwer biologisch abbaubar sind und sich durch Adsorption kaum aus dem Abwasser entfernen lassen, können durch Oxidationsverfahren gut eliminiert werden. Durch die Reaktion mit Sauerstoff bilden sich aus den ursprünglichen Molekülen Oxidationsprodukte. Häufig wird beobachtet, dass sich diese Oxidationsprodukte in einer nachfolgenden biologischen Stufe besser abbauen lassen als die Originalsubstanzen. Es ist aber auch zu beachten, dass die entstehenden Reaktionsprodukte nicht prinzipiell unschädlich sind und teilweise sogar eine höhere Toxizität aufweisen können als die Ausgangsstoffe.

Das am häufigsten eingesetzte Oxidationsverfahren in der industriellen Abwasserbehandlung ist die Behandlung mit gasförmigem Ozon. Die Ozonmoleküle reagieren selektiv mit bestimmten funktionellen Gruppen der Abwassermatrix, sie zerfallen aber auch

zu Hydroxylradikalen, die Abwasserbestandteile weniger selektiv oxidieren und ein höheres Oxidationspotenzial besitzen. Ozonungsverfahren sind in der pharmazeutischen Industrie weit verbreitet, zum Beispiel zur gezielten Entfernung von Antibiotika aus Abwasserströmen ^[70].

Alternativ zur Ozonung werden vermehrt auch weitergehende Oxidationsverfahren ("Advanced Oxidation Processes") eingesetzt, die v.a. auf die Bildung nicht-selektiv reagierender Hydroxylradikale abzielen und die Bildung problematischer Oxidationsprodukte reduzieren sollen. Die Bandbreite erprobter Verfahren ist groß und reicht von der homogenen bis hin zur heterogen katalysierten Reaktion. Bei den eingesetzten Katalysatoren handelt es sich meist um Übergangsmetalle, zusätzlich kann auch eine externe Energiequelle, wie etwa UV-Strahlung, genutzt werden. Gängige weitergehende Oxidationsverfahren zur Abwasseraufbereitung sind beispielsweise ^[71, 72]:

- Kombination von Ozon und Wasserstoffperoxid
- (Photo-)Fenton-Prozess mit Eisensalz als Katalysator
- Elektro-Oxidation
- TiO₂-Photokatalyse (derzeit im Pilotmaßstab) □

FALLSTUDIE: Pharmaindustrie Indien

Membranfiltration zur Rückführung von biopharmazeutischem Abwasser bis zu Zero Liquid Discharge (ZLD)

Hintergrund

Ein weltweit tätiges Biotechnologie-Unternehmen war auf der Suche nach einer zuverlässigen und effizienten Abwasserbehandlung für seine neu errichtete Produktionsanlage zur Herstellung industrieller Enzyme und Mikroorganismen in der Nähe von Mumbai, Indien.

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Abwässer biotechnologischer Produktionsverfahren sind für gewöhnlich gekennzeichnet durch eine hohe, gut abbaubare Organikfracht, und können darüber hinaus Hilfsstoffe enthalten (z.B. Fällmittel, Lösemittel oder chemische Inaktivierungsmittel). Für den Anlagenbetreiber kam zur Reinigung seiner Abwasserströme deshalb zunächst eine biologische Behandlung in Frage, gefolgt von einer zweistufigen Membranfiltration (Ultrafiltration und Umkehros-mose). Unter den konkreten Bedingungen vor Ort war bei dieser Verfahrenswahl allerdings mit folgenden Betriebsproblemen zu rechnen:

- Schlammabtrieb aus der biologischen Stufe und eine entsprechend aufwendige Vorbehandlung für die Ultrafiltration, v.a. beim Vorkommen von Schwebstoffen
- Bedarf großer Mengen an Rückspülwasser für die Membrananlagen und mit der Spülwasserrückführung einhergehende hydraulische Mehrbelastung der Anlage
- Hoher Chemikalienverbrauch und hoher Platzbedarf für die Verfahrenskombination

In Anbetracht dieser Herausforderungen war der Betreiber an einer möglichst passgenauen und kostengünstigen Lösung der Abwasserbehandlung interessiert. Wichtigstes Ziel war die weitgehende Aufbereitung aller Abwasserströme, um dem in Indien häufig geforderten Zero Liquid Discharge-Konzept (ZLD) zu entsprechen und gereinigtes Wasser vollständig wieder- oder weiterzuverwenden.

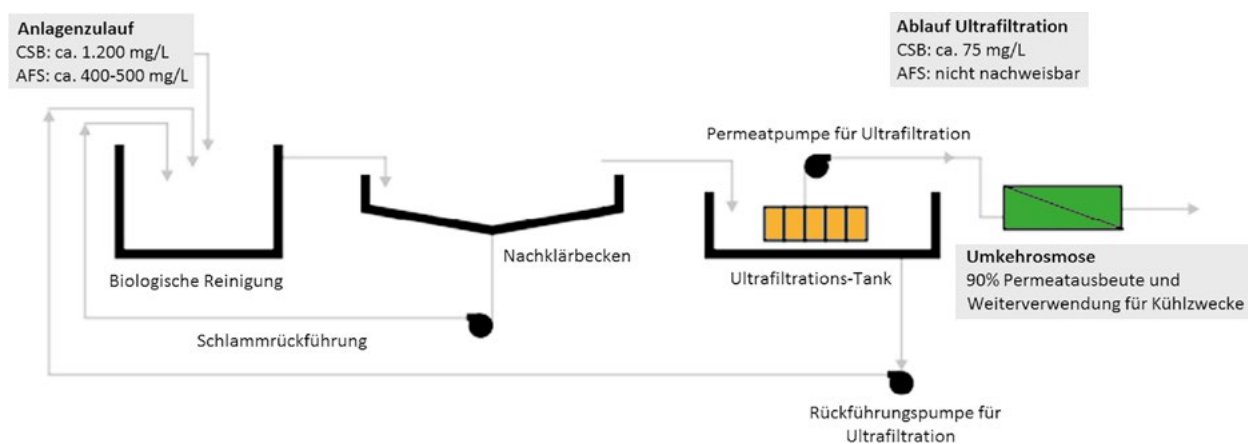


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Prozessablaufs für das SUFRO®-Verfahren



Abbildung 2: 8.3 m³/h SUFRO®-Anlage bei Mumbai, Indien – Biologische Reinigung (links), Umkehrosmose (mitte), Nachklärbecken und Ultrafiltrationstank (rechts)

Lösungsansatz

A.T.E. HUBER Envirotech (AHET) erarbeitete in enger Zusammenarbeit mit dem Kunden die folgende Technologielösung: AHET schlug ihr biologisches Behandlungssystem mit der SUFRO®-Technologie vor. Das System beinhaltet eine Biomem-Membranfiltration von HUBER SE – ein getauchtes und mit Unterdruck betriebenes Ultrafiltrations-Membranlaminat mit einer Porengröße von 38 nm anstelle einer herkömmlichen Überdruck-Ultrafiltration – gefolgt von einer Umkehrosmoseanlage (Abb 1).

Diese Technologie versprach große Vorteile hinsichtlich des Anlagenbetriebs sowie des Rückspül- und Platzbedarfs und fand daher konzeptionell die Akzeptanz und Zustimmung der Geschäftsleitung.

Ergebnisse

Eine biologische Abwasserreinigungsanlage auf Basis der SUFRO®-Technologie mit einer Kapazität von umgerechnet 8.3 m³/h wurde von AHET geplant, installiert und in Betrieb genommen.

Die Biomem-Membranfiltration ist aufgrund ihrer Konstruktion und Betriebsweise deutlich robuster gegenüber erhöhten Schwebstoffgehalten im Zulauf als eine konventionelle Druck-Ultrafiltration. Die sonst benötigte Vorbehandlung mittels Drucksandfiltern, Aktivkohlefiltern oder Korbfiltern entfällt. Die Biomasse im Überlauf der Nachklärung wird effektiv im Membrantank zurückgehalten und in das

Belüftungsbecken zurückgeführt, sodass ein Auswaschen der Biomasse verhindert wird. Die hydraulische Belastung der biologischen Behandlung wird durch den Anfall von Rückspülwasser nicht erhöht, da dieses im Membrantank aufgefangen wird. Bei der Membran-Rückspülung werden im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren außerdem weniger Chemikalien und Wasser verbraucht. Das Ultrafiltrations-Permeat wird ohne zusätzliche Vorbehandlung direkt in eine 3-stufige Umkehrosmose geleitet. Mit der Verfahrenskombination kann der CSB-Gehalt von bis zu 1.200 mg/l auf unter 75 mg/l reduziert werden, während gleichzeitig die Schwebstoffe auf ein nicht nachweisbares Niveau gebracht werden (Abb. 1). Die hohe Qualität des gereinigten Abwassers macht eine Wiederverwendung von bis zu 90 % als Kühlwasser in der Produktionsanlage möglich.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Die realisierte Anlage zeichnet sich durch ihre hohe Robustheit (z.B. gegenüber hohen Feststoffkonzentrationen) und einfache Bedienbarkeit aus. Das Entfallen weiterer Vorbehandlungsschritte macht das System zu einer sehr kompakten Lösung für die Wasserwiederverwendung bis zum Zero Liquid Discharge (ZLD). Die sehr effiziente Membranreinigung reduziert die benötigten Wasser- und Chemikalienmengen auf ein Minimum. □

4

BERGBAU



Länderspezifische Informationen

Indien

Indien verfügt über umfangreiche Mineralvorkommen und eine entsprechend entwickelte Bergbauindustrie, die sich v.a. im Nordosten des Landes angesiedelt hat (Bundesstaaten Jharkhand, West Bengal und Orissa). Die wichtigsten Ressourcen sind der Energieträger Kohle, Eisenerz zur Stahlproduktion und Bauxit, aus dem Aluminium gewonnen wird (Abbildung 1). Das Branchenwachstum im indischen Bergbau betrug 2019 3,6 % und ist eng gekoppelt an die Entwicklung nachgelagerter Wirtschaftszweige. Der am stärksten wachsende Sektor ist die Förderung von Eisenerz, das

in der Bau-, Infrastruktur-, und Automobil-Industrie eingesetzt wird. 85 % der indischen Bergbau-Industrie sind in staatlicher Hand (z.B. National Mineral Development Corporation, Vedanta, Hinalco Industries), v.a. im Sektor der Kohleförderung. Speziell im Abbau metallischer Ressourcen sind aber auch nationale und internationale Privatunternehmen aktiv ^[75]. Je nach Sektor lässt der Staat ohne weitere Überprüfung bis zu 100 % ausländisches Investment zu und gewährt Pachtverträge mit 20–30 Jahren Laufzeit. Die 2019 verabschiedete „National Mineral Policy“ soll außerdem für die Regelung, Transparenz und Nachhaltigkeit in Indiens Bergbau sorgen. In den national geltenden Umweltschutzrichtlinien findet der Bergbau keine spezifische Erwähnung, gefordert wird allerdings die Erarbeitung und Umsetzung progressiver Pläne zu geordneten Minenstilllegungen ^[73, 76].



MENA

Die Bergbau-Industrie der MENA-Region ist von der Förderung nicht-metallischer Ressourcen geprägt. Der wichtigste Rohstoff ist sicher Phosphat-Gestein, für das weltweit eine große Nachfrage zur Düngemittelherstellung besteht. Wichtigster Phosphat-Produzent der Region ist Marokko – das Land ist weltweit der drittgrößte Produzent und auf marokkanischem Territorium liegen ca. 75 % der globalen Phosphor-Reserven. Der Phosphat-Bergbau wird vom staatlichen Unternehmen OCP (Office Chérifien des Phosphates) betrieben und trägt je nach Schätzung ca. 7 % zum BIP Marokkos bei ^[77]. Phosphatmineral ist auch in Tunesien (Staatskonzern Chimique de Tunisie) und Jordanien (teilprivatisierte Jordan Phosphate Mines) die bedeutendste Ressource der Bergbau-Industrie, neben anderen nicht-metallischen Rohstoffen, zum Beispiel Kalisalzen oder Gips. Der Bergbau zählt hier insgesamt jedoch nicht zu den stärksten Branchen ^[78].

Die ägyptische Bergbau-Industrie konzentriert sich auf die Östliche Wüste und die Sinai-Halbinsel und fördert dort v.a. Kohle und metallische Ressourcen. Neben Gold ist Tantalit ein wichtiger Rohstoff (viertgrößter Produzent weltweit) – dieses Metall wird als Speichermedium in der Elektronikindustrie eingesetzt. Indem die Regierung Anfang 2020 die Konditionen für ausländische Investoren lockerte, soll eine weitere Erschließung und Nutzung der Ressourcen gefördert werden ^[79].

Branche und Abwasseranfall

Die Bergbau-Industrie umfasst die Erschließung, Gewinnung und Aufbereitung von Bodenschätzen, wie metallische Rohstoffe, fossile Energieträger und Mineralien. Die Förderung der Rohstoffe kann im Tagebau (z.B. Phosphat, Gold, Eisenerz) oder im Tiefbau (z.B. Kohle) geschehen. Das abgebaute Gestein wird gewöhnlich zunächst mechanisch zerkleinert und der Zielstoff anschließend entweder mechanisch (Flotation oder Magnetscheidung) oder chemisch (durch Laugung und Fällung) abgetrennt. Die Umweltrelevanz ist in diesem Bereich ein globales Thema: Neben dem großen Flächenbedarf spielen die hohe Wasserverwendung und die mögliche Freisetzung umweltschädlicher Stoffe in Luft und Wasser eine wichtige Rolle.

Frischwasser wird im Bergbau im Wesentlichen für folgende Zwecke eingesetzt:

- Zur Förderung von Rohstoffen in Form von Schlämmen oder Suspensionen
- Für Verfahrensschritte der Zerkleinerung oder Trennung in der Wasserphase, wie etwa Mahlen oder Flotieren
- Gezielte saure oder basische Extraktion von Metallen aus Erzen und Böden



Kohle



Eisenerz



Bauxit



Chromit

729

Mio. t (2020)

206

Mio. t (2020)

2.909

Mio. t (2019)

4,2

Mio. t (2019)

Jährliche
FördermengeDrittgrößter
Produzent weltweitViertgrößter
Produzent weltweitSiebtgrößte
Reserve weltweitZweitgrößter
Produzent in Asien

Rang

Abbildung 1: Wichtigste Mineralressourcen in der indischen Bergbau-Industrie ^[73] ^[74]



Diese Wasserströme werden als Prozesswasser bezeichnet und können nach entsprechender Aufbereitung zu einem großen Anteil wiederverwendet werden. Überschüssiges Prozesswasser fällt als Abwasser an. Der Großteil verunreinigten Abwassers entsteht beim Bergbau allerdings nicht aus Prozesswasser, sondern durch den Ablauf und die Versickerung von Regenwasser. Beim Durchlaufen von Gruben und Abräumhalden reichert sich das Regenwasser mit mineralischen Verunreinigungen an und kann darüber hinaus Versäuerungsreaktionen in Gang setzen. Als sogenanntes (saures) Sickerwasser stellt es den problematischsten und volumenmäßig größten Abwasserstrom im Bergbau dar ^[80].

Abwasserströme und -eigenschaften

Prozesswasser

Prozesswässer fallen im Bergbau unter vergleichsweise kontrollierten Bedingungen an und werden in ihrer Zusammensetzung unmittelbar von der jeweiligen Verfahrensführung beeinflusst. Wasser, das zur

Förderung, Zerkleinerung oder mechanischen Trennung von Rohstoffen eingesetzt wird, ist im Wesentlichen mit Feststoffen und mineralischen Verunreinigungen belastet. Kritischer sind die Wasserströme nach saurer Laugung zu betrachten: Zur weit verbreiteten Phosphatgewinnung aus dem sehr schlecht löslichen Mineral Apatit ist der Einsatz starker Säuren (Schwefel- oder Phosphorsäure) nötig. Teilweise werden zur Verbesserung der Löslichkeit oder Komplexbildung auch Chemikalien zugesetzt, z.B. Cyanide oder Sulfate, die sich ebenfalls im Wasser anreichern ^[81, 82].

Sickerwasser

Erze, die normalerweise unter Sauerstoffabschluss in Gesteinsschichten eingebunden sind, werden durch den Bergbau zerkleinert und oxidierender Umgebung ausgesetzt. Der Kontakt mit Umgebungsluft und Regenwasser löst chemische Reaktionen aus, je nachdem wie gut löslich, hydrolysierbar oder adsorptionsfähig der jeweilige Rohstoff ist. Das entstehende Sickerwasser ist häufig sehr sauer und löst dadurch zum Beispiel Metalle und Sulfate in hohen Konzentrationen aus dem Gestein. Typische Eigenschaften von Sickerwasser sind pH-Werte <6 (teilweise auch bis pH 9) und hohe Sulfatkonzentrationen im Bereich 1–10 g/l ^[80].

Verunreinigung	Konzentration im Abwasser	
	vor Auf- bereitung	nach Auf- bereitung
pH [-]	5–10	6–9
Gelöststoffe [mg/l]	k.A.	<1.000
Feststoffe [mg/l]	10–500	5–35
Sulfat [mg/l]	5.000–10.000	50–2.000
Stickstoffverbindungen [mg/l]		
- Nitrit	0,1–1	0,01–1
- Nitrat	1–100	0,1–50
- Ammonium	1–50	0,1–10
Phosphor [mg/l]	0,1–10	0,01–2
Chlor [mg/l]	k.A.	20–200
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) [mg/l]	k.A.	15–100
Metalle [mg/l]		
- Arsen	0,1–5	0,01–0,05
- Cadmium	0,005–0,5	0,002–0,02
- Chrom	0,005–0,05	0,002–0,02
- Kupfer	0,02–0,2	0,0002–0,1
- Eisen	2–50	0,02–2,5
- Blei	0,05–5	0,01–0,05
- Nickel	0,1–0,5	0,01–0,2
- Zink	0,5–5	0,01–0,5
Cyanide [mg/l]	k.A.	<0,1

Tabelle 1: Typische Verunreinigung in Prozesswässern aus dem Bergbau ^[80]

Typische Verunreinigungen

Die im Bergbau anfallenden Abwasserströme sind häufig sehr sauer und durch hohe Konzentrationen an Metallen, Halbmetallen und teilweise Salzen belastet (Tabelle 1). Verunreinigungen im Abwasser stammen größtenteils direkt aus den jeweiligen geologischen Formationen, teilweise handelt es sich aber auch um Hilfsstoffe aus der Rohstoffverarbeitung. Die wichtigsten Belastungen sind die folgenden ^[80, 81, 83, 84]:

- **pH-Wert:**
Wird beeinflusst von der Zusammensetzung des geförderten Gesteins. Zusätzlich können saure oder basische Extraktionsmittel zur Lösung von Metallen eine Rolle spielen, wie etwa bei der Gewinnung von Gold, Aluminium oder Uran.
- **Gelöststoffe und Feststoffe:**
Der Gehalt an gelösten Stoffen hängt von den Eigenschaften des Rohstoffs ab. Bei der Kalisalz-Gewinnung fallen Abwässer mit besonders hohen Salzgehalten an. Hohe Konzentrationen an suspendierten Schwebstoffen treten v.a. im Kohlebergbau auf.
- **Nährstoffe:**
Stickstoff wird üblicherweise über Sprengstoffe zur Gesteinsgewinnung eingetragen und liegt üblicherweise als Nitrit, Nitrat oder Ammonium vor. In der Phosphatförderung finden sich oft hohe Restkonzentrationen an Phosphor im Abwasser, aber auch in anderen Sektoren kann Phosphor aus der Haldenbegrünung (z.B. durch Bodenerosion oder aus Düngemitteln) ins Abwasser eingetragen werden. Phosphor kommt im Abwasser vorwiegend in Form von Phosphat vor.
- **Andere:**
Je nach Zusammensetzung des geförderten Rohstoffs kann das Abwasser relevante Konzentrationen an Chlor und Sulfaten enthalten. Gerade in der Kalisalz-Industrie sind diese Verunreinigungen von Bedeutung. Ebenso können Rückstände von Metallen aus dem Gestein das Abwasser verunreinigen, z.B. Arsen im Gold- oder Cadmium im Phosphatbergbau. Einige Metalle und Cyanide werden auch als Hilfsstoffe eingesetzt, v.a. zur Extraktion von Gold in basischer Lauge.

Aufbereitungsverfahren

Verfahrenswahl und -stufen

Gerade in trockenen Regionen spielt die Wasserwiederverwendung zur Reduktion des Frischwasserbedarfs eine wichtige Rolle. Prozesswässer werden heute in den meisten Bergbau-Betrieben separat gesammelt, aufbereitet und zum größten Teil im jeweiligen Verfahrensschritt wiederverwendet. Dies kann auch die effiziente Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe aus den Wasserströmen ermöglichen. Durch den Anfall von überschüssigem Prozesswasser und zusätzlichen großen Mengen an Sickerwasser ist der Bergbau vom Ziel „Zero Liquid Discharge“ in der Praxis aber noch weit entfernt.

Die Aufbereitung von Abwasser erfolgt normalerweise mit physikalisch-chemischen Verfahren, die folgende Aufgaben erfüllen sollen:

- Abtrennung von Feststoffen
- Entfernung von gelösten Salzen, Nährstoffen und Metallen
- Weitgehende Neutralisierung

Bei der Verfahrenswahl kommen einerseits die auch in anderen Branchen verbreiteten aktiven Verfahren zum Einsatz, die unter Einsatz von Energie und/oder Hilfsstoffen eine zielgerichtete Behandlung von Abwasserströmen ermöglichen. Alternativ oder ergänzend kommen aber auch passive Verfahren in Frage, die sich über länger Zeiträume (10–30 Jahre) ohne nennenswerten Betriebsaufwand selbst erhalten. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um biologische oder physikalische Prozesse, die v.a. bei niedrigen Wasserflüssen (<50 l/s) und geringen Belastungen (Säurefracht <10 kg/Tag bzw. <800 mg/l) einsetzbar sind. Häufig eingesetzte passive Verfahren sind beispielsweise Klärteiche oder (künstlich angelegte) aerobe oder anaerobe Feuchtgebiete ^[80, 83].

Physikalisch-chemische Aufbereitung

Zur Abtrennung von Feststoffen aus dem Abwasser werden üblicherweise schwerkraftgetriebene Verfahren eingesetzt, oft unter der Zugabe von Flockungsmitteln. Je nach Volumenstrom und Eigenschaften

der Schwebstoffe finden aber auch Filtrationsprozesse Anwendung. Als beste verfügbare Technik gelten die folgenden Verfahren ^[80]:

- Sedimentation in Schwerkraftabscheidern oder Klärteichen
- Gasflotation
- Zentrifugation
- Oberflächen- oder Raumfiltration

Bei Klärteichen handelt es sich um künstlich angelegte Becken, die bis zu mehrere 100.000 m³ Abwasser fassen können. Sie werden im flachen Gefälle durchströmt, wobei eine undurchlässige Grundabdichtung das Austreten von Wasser verhindert. Hier laufen zwei Prozesse parallel ab, nämlich die Verdunstung von sauberem Wasser (solange das Abwasser keine flüchtigen Bestandteile enthält) und die Sedimentation von Feststoffen, wie z.B. Fällungsprodukten ^[80, 81].

Gelöststoffe werden typischerweise mittels physikalisch-chemischer Verfahren aus dem Abwasser entfernt. Dazu werden u.a. folgende Prozesse angewendet:

- Fällung
- Adsorption
- Ionentausch
- Membranverfahren

Je nach Abwasserzusammensetzung können verschiedene chemische Bedingungen zur Ausfällung von Verunreinigungen führen. Einige Metalle verringern ihre Löslichkeit unter oxidativen Bedingungen (entweder künstlich belüftet oder durch aktive biologische Belüftung), andere durch Reduktion unter anaeroben Bedingungen. Viele Metalle lassen sich auch im Zuge einer Neutralisation als Hydroxid- oder Carbonat-Verbindungen ausfällen und abtrennen ^[80, 83]. □



FALLSTUDIE: Gold-Bergbau in Südafrika

Pumpen entwässern überflutete Minen in Südafrika

Hintergrund

Der Abbau von Edelmetallen ist in Indien ein hochrelevanter Wirtschaftszweig, und aus dem folgenden Beispiel in Südafrika ergeben sich potenziell Parallelen zur Situation vor Ort. Die Stadt Johannesburg wurde im Zuge des Witwatersrand-Goldrausches 1886 gegründet. Seitdem wurden 40.000 t – 30 % des Weltgoldes – aus den dortigen Minen gefördert. Von diesem Goldrausch zeugen heute noch zahlreiche verlassene Schächte und Minen unter der Stadt. Diese stellen allerdings ein zunehmendes Risiko für Mensch und Umwelt dar. Durch das Eindringen von Regenwasser in diese Schächte hat sich unter der Stadt ein See mit stellenweise stark verunreinigtem saurem Wasser gebildet, der sich immer weiter ausdehnt. Während des Bergbaubetriebs wurde das eindringende Grundwasser durch die bestehende Infrastruktur aus den Minen gepumpt.

Doch mit der Stilllegung vieler Minen wurde dieser Prozess eingestellt. Das sogenannte Western Basin füllte sich und begann 2002, sich zu entleeren. Im Central Basin wurde das Pumpen 2008 und im Eastern Basin Anfang 2011 eingestellt.

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Das Abpumpen des Minenwassers birgt einige Herausforderungen, insbesondere wegen seiner chemischen Zusammensetzung. Das metamorphe Gestein der Bergwerksstollen enthält das Mineral Pyrit, das mit sauerstoffhaltigem Regen- oder Grundwasser

reagiert, was zu erhöhten Sulfatkonzentrationen und schließlich zu niedrigen pH-Werten führt. Bei pH-Werten von zwei löst die Schwefelsäure Aluminium, potenziell toxische Metalle und Uran aus dem Gestein und produziert Eisenoxid als Nebenprodukt, wenn der pH-Wert ansteigt. Infolgedessen kann der pH-Wert im Wasser Werte erreichen, die es zu einer Gefahr für Mensch und Umwelt machen. Die Minen-

entwässerung ist somit zu einer ökologischen Frage und Herausforderung geworden.

Lösungsansatz

Zum Schutz von Oberflächen- und Grundwasser sollten bei der Stilllegung von Bergbauminen alle Optionen ausgeschöpft werden, z.B. eine möglichst vollständige Versiegelung oder eine langfristige passive Behandlung der anfallenden Minenwässer. Zuverlässige Pumpentechnologien können hierbei einen wichtigen Beitrag leisten.

Der internationale Technologiekonzern ANDRITZ verfügt über eine Pumpenbaureihe, die speziell für die schwierigen Bedingungen im Bergbau konzipiert wurde – die Baureihe Heavy Duty Mining (HDM) (Abb. 1). Bei diesem Pumpentyp werden zwei Unterwassermotorpumpen übereinander gegenläufig angeordnet und von einer durchgehenden Pumpenwelle angetrieben. Die Saugbereiche der beiden Pumpen befinden sich hierbei jeweils an den Enden der HDM. Jede der beiden Pumpen transportiert den halben Förderstrom bei vollem Druck zur Pumpenmitte. Dort leitet eine Umlenkstufe den Förderstrom über außenliegende Gehäusekanäle in



Abbildung 1:
ANDRITZ-Unterwassermotorpumpe
aus der HDM (Heavy Duty Mining) Serie



Abbildung 2: Installation einer der ANDRITZ-Pumpen

die Druckleitung. Die doppelflutige Bauweise neutralisiert den Axialschub vollständig und Belastungen des Aggregats werden auf ein Minimum reduziert.

Um diese Pumpen zur Förderung von saurem Minenwasser einsetzen zu können, mussten bestimmte Komponenten gegen die aggressive Säure geschützt werden. Zu diesem Zweck wurden die Tauchmotoren so gekapselt, dass der Innendruck den Außendruck übersteigt. Dadurch wird verhindert, dass Wasser eindringt und die Komponenten im Inneren des Motors angreift. Um eine hohe Langlebigkeit der Werkstoffe mit Mediumkontakt zu gewährleisten, wurden mehrere Materialoptionen gewählt und qualifizierende Tests durchgeführt. Aus den in Frage kommenden Werkstoffen wurden jene mit den besten mechanischen Eigenschaften für die Teile der Pumpeneinheit ausgewählt, um eine kompakte Bauweise zu ermöglichen. Die variable Förderhöhe der ausgewählten Pumpen beträgt zwischen 300–500 m bei einer Fördermenge bis zu 1500 m³/h. Die Motorgröße beträgt 2400 kw.

Ergebnisse

Alle Pumpeneinheiten sind identisch und haben die gleiche Hydraulik. Mindestens ein komplettes Pumpenaggregat wird zerlegt vor Ort gelagert; das bedeutet, dass eine Ersatzpumpe sofort verfügbar ist. Zusätzlich wird auch eine Reihe ausgewählter Ersatzteile vor Ort gelagert. Die beiden Pumpen –

21 t schwer mit je 15 m Länge und 1 m Durchmesser – sind seit Juni 2014 in Betrieb (Abb. 2). Frei aufgehängt an 430 m langen Rohren aus Duplex-Stahl fördern sie das saure Grubenwasser an die Oberfläche und dann zu einer benachbarten Aufbereitungsanlage. Hier wird durch die Zugabe von Kalk der pH-Wert angehoben, die Säure neutralisiert und die im Wasser gelösten Schwermetalle werden als Hydroxide ausgefällt.

Die Behörden errichten zwei weitere Pumpstationen westlich und östlich von Johannesburg mit dem langfristigen Ziel, den Wasserspiegel in den überfluteten Minen von derzeit etwa 200 m auf eine Tiefe von 1.000 m zu senken. Mit diesem Schritt will der Betreiber auch wieder Zugang zu den höheren Ebenen erhalten, um dort den Abbau von Gold und Golderzen wieder aufnehmen zu können. ANDRITZ lieferte insgesamt sieben Pumpen, die in diesen beiden Pumpstationen installiert wurden.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Die Vorteile der bereitgestellten Pumpentechnologie liegen in ihrer hohen Langlebigkeit und Wartungsfreiheit bei sehr großen Fördermengen unter sehr aggressiven Bedingungen. Diese wird einerseits durch die gezielte Auswahl von chemisch und mechanisch höchst stabilem Material gewährleistet, andererseits erlaubt die spezielle Kapselung mit erhöhtem Innendruck einen Schutz der kritischen Anlagenkomponenten. □

5

LEBENSMITTELINDUSTRIE

Länderspezifische
Informationen**Indien**

Die indische Lebensmittelindustrie fußt auf einer stabilen nationalen Landwirtschaft mit großen Nutzflächen und günstigen Klimabedingungen. Durch wachsenden Wohlstand, zunehmende Verstädterung und sich wandelnde Ernährungsgewohnheiten nimmt auch die Lebensmittelverarbeitung im Land eine immer größere Rolle ein. Heute beträgt der Kapitalwert der lebensmittelverarbeitenden Industrie ca. 30 % der indischen Lebensmittelindustrie und damit ca. 188 Mrd. USD ^[85, 86].

Der Gartenbau (Obst und Gemüse) ist der ertragreichste Landwirtschaftszweig Indiens, dem zweitgrößten Produzenten von Obst und Gemüse weltweit (Tabelle 1). Allerdings werden in Indien nur ca. 2 % der Produkte weiterverarbeitet, was im internationalen Vergleich (USA: 65 %, Philippinen: 78 %, China: 23 %) sehr wenig ist. Etwas höher liegen die Verarbeitungsquoten von Reis und Weizen. Das Land ist in Bezug auf Reis und Weizen eigenversorgend. In Indien sind ca. 10 Mio. Milchbauern aktiv, die das Land zum größten globalen Milchproduzenten machen. Ca. 35 % des Umsatzes werden in der Lebensmittelverarbeitung zur Herstellung von Milchpulver, Butter, Käse und anderen Molkereiprodukten eingesetzt. Das macht die Molkerei-Industrie zu einem wichtigen Wirtschaftszweig im Land, der Sektor wird dominiert



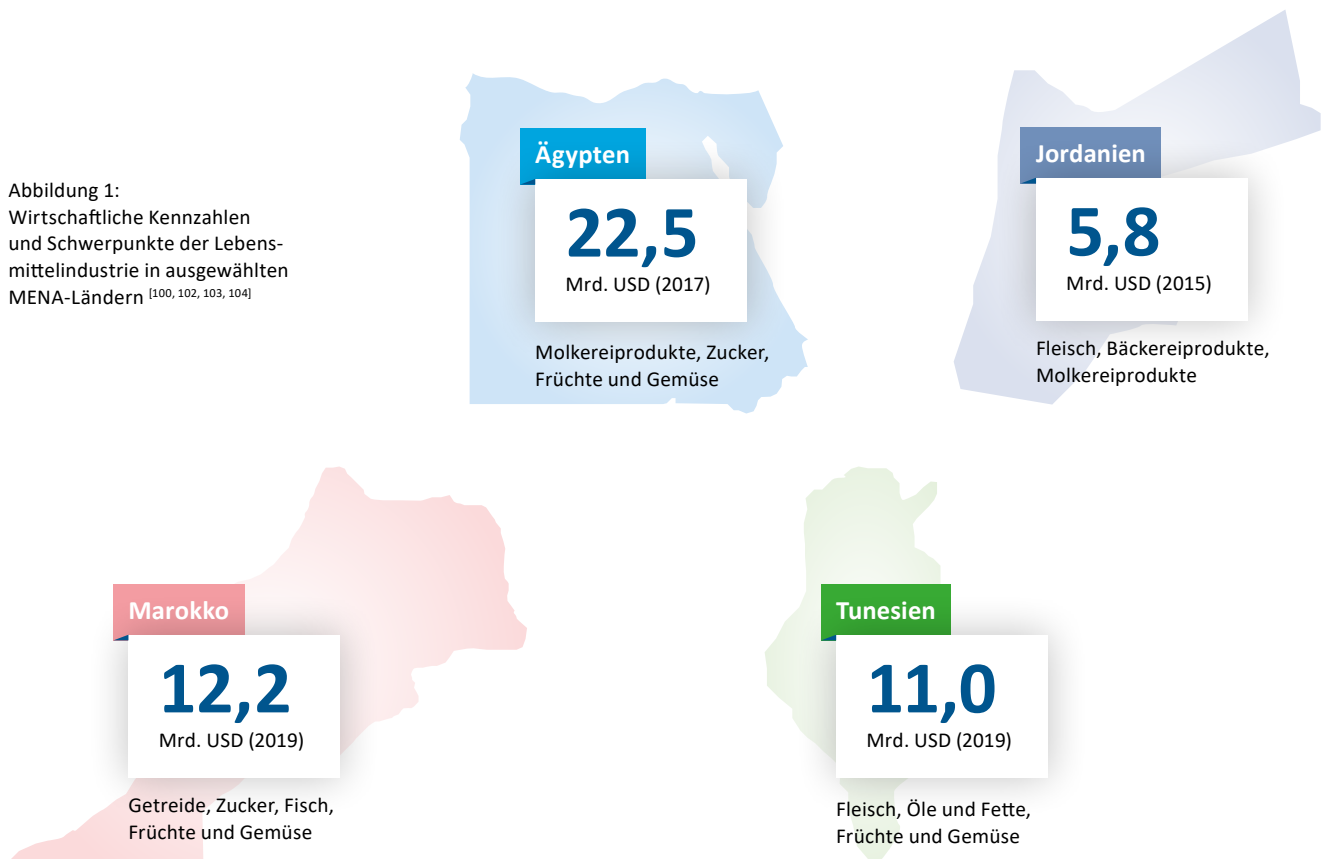
Produkt	Jährl. Produktion	Jährl. Umsatz	Jährl. Wachstum	Wichtigste Regionen
Obst und Gemüse	282 Mio. t (2017–18)	42 Mrd. USD (2017–18)	4,2 % (2017–18)	Maharashtra, Andhra Pradesh, Uttar Pradesh, West Bengal, Bihar
Milch	176 Mio. t (2017–18)	72 Mrd. USD (2016)	15 % (2010–15)	Delhi, Punjab, Gujarat, Surat, Lucknow, Bihar, Hyderabad
Reis	113 Mio. t (2017–18)	53 Mrd. USD (2020)	6,5 % (2020)	Punjab, Haryana, West Bengal, Uttar Pradesh, Tamil Nadu, Orissa, Andhra Pradesh
Weizen	107 Mio. t (2020)	61 Mrd. USD (export 2020)	3,5 % (2020)	Punjab, Haryana, Uttar Pradesh, Madhya Pradesh
Fisch (im Inland)	9 Mio. t (2017–18)	3,5 Mrd. USD (2012–13)	6 % (2012–13)	West Bengal, Andhra Pradesh, Gujarat, Kerala
Fleisch	7,7 Mio. t (2017–18)	16,5 Mrd. USD (2020)	8 % (2020)	Uttar Pradesh, West Bengal, Andhra Pradesh, Haryana, Tamil Nadu

Tabelle 1: Gegenüberstellung der wichtigsten Sektoren der indischen Lebensmittelindustrie ^{[87, 89, 90, 91, 92, 93, 94] [95, 96, 97] [98]}



Schwerpunkte der Lebensmittelindustrie

Abbildung 1:
Wirtschaftliche Kennzahlen
und Schwerpunkte der Lebens-
mittelindustrie in ausgewählten
MENA-Ländern ^[100, 102, 103, 104]



von lokalen Großkonzernen. Die Erzeugung von Fisch (zweitgrößter Produzent weltweit) und Fleisch (sechstgrößter Produzent weltweit) spielt ebenfalls eine Rolle, auch wenn die Produkte im Wesentlichen nur verpackt und (tief-)gekühlt verkauft werden ^[87].

Die Lebensmittelbranche Indiens sieht sich momentan noch mit teils hohen Produktverlusten (v.a. im Gartenbau), unklaren regulatorischen Bedingungen und nicht ausreichend ausgebauten Lieferketten konfrontiert. In Zukunft wird es immer wichtiger sein, strenge Qualitäts- und Hygienormen einzuhalten und sich technologisch an internationalen Best Practices zu orientieren. Das Ministerium für die nahrungsmittelverarbeitende Industrie fördert daher gezielt Modernisierungen und Investitionen (auch 100 % ausländische Investitionen) in der Branche ^[86, 87].

(Umwelt-)technologische Entwicklungen in der indischen Lebensmittelverarbeitung werden v.a. von international agierenden Konzernen durch Annahme globaler Benchmarks und Nachhaltigkeitsziele vorangetrieben. Dazu zählen die Reinigung organisch hochbelasteter Abwässer durch biologische Verfahren und die vermehrte Wasserrückgewinnung, um saisonale Schwankungen der Rohwasserverfügbarkeit auszugleichen ^[88].

MENA

Die Ausprägung der Lebensmittelindustrie ist häufig eng an die landwirtschaftlichen Ressourcen im jeweiligen Land gekoppelt. Bedingt durch relativ heißes und trockenes Klima konzentriert sich die Landwirtschaft vieler MENA-Länder auf intensive Tierhaltung zur Milch- und Fleischproduktion und auf den Anbau geeigneter

Frucht-, Gemüse- und Getreidesorten. Die wichtigsten Sektoren der lebensmittelverarbeitenden Industrie sind dementsprechend Molkereien sowie die Verarbeitung von Fleisch, Fisch und Getreide (Abbildung 1). Allgemein ist durch die Verbreitung „westlicher“ Ernährungsgewohnheiten eine steigende Nachfrage nach Convenience-Produkten, wie Milchpulver, Instant-Nudeln, Tiefkühl-Produkten zu beobachten, die zu einem Anstieg der Lebensmittelverarbeitung führt.

Die Molkereibranche ist in vielen Ländern traditionell verankert und erlebt zurzeit ein starkes Wachstum (z.B. 32 % jährliches Wachstum in Jordanien). Zu den wichtigsten Produkten zählen in der MENA-Region pasteurisierte Milch, Joghurt und verschiedene Käsearten ^[99, 100]. In Tunesien und Jordanien spielt außerdem die Fleischproduktion eine wichtige Rolle, wobei es sich mit Abstand zum größten Teil um Geflügel handelt. Ein bedeutender lokaler Akteur ist hier die stark diversifizierte Poulina Unternehmensgruppe. Die Verarbeitung konzentriert sich auf die Haltbarmachung und die Herstellung verschiedener Wurstwaren ^[101, 100]. Im Gartenbau werden Tomaten, Zitrusfrüchte und Datteln angebaut, die vor dem Verkauf oder Export kaum verarbeitet werden. In Tunesien macht außerdem die Olivenproduktion einen wichtigen Wirtschaftszweig aus, und bildet die Grundlage für die industrielle Herstellung und Raffinierung von Olivenöl (wichtigster Produzent ist die lokale „Société de conditionnement des huiles d’olive“). Marokko gilt mit seiner Küstenlänge von 3.500 km als größter Fischproduzent Afrikas.

Durch die enge Verknüpfung mit landwirtschaftlichen Aktivitäten ist der Wasserverbrauch der lebensmittelverarbeitenden Industrie nicht immer klar einzugrenzen – in Jordanien wird dieser aber auf ca. 10 % des gesamten industriellen Wasserkonsums geschätzt ^[101], um ein Beispiel zu nennen. Um Frischwasserressourcen zu schützen, werden vielerorts Bestrebungen zur industriellen Abwasserreinigung und Wasserwiederverwendung gefördert. Besonders multinationale Konzerne und Unternehmen der Fleischverarbeitung erfüllen häufig bereits die Vorgaben der ISO 14001 und anderer freiwilliger Standards. Der hohe Anteil wenig strukturierter kleiner und mittelständischer Unternehmen im Lebensmittelsektor erschwert aber in vielen Fällen eine flächendeckende Umsetzung von Umweltschutzmaßnahmen ^[100, 101].

Branche und Abwasseranfall

In der Lebensmittelindustrie werden landwirtschaftliche Erzeugnisse durch den Einsatz von Rohstoffen, Arbeitskraft und Technologie für die menschliche Ernährung verarbeitet. Die Sektoren der Branche werden nach den jeweils verwendeten Ausgangsprodukten kategorisiert:

- **Milch:**
Kühlung und Pasteurisierung von Milch, Herstellung von Käse, Butter, Joghurt und anderen Molkeerprodukten, sowie von Milchpulver
- **Früchte und Gemüse:**
Waschen und Zerkleinern, Herstellung und Verarbeitung von Saft, Konzentrat und Mus bis hin zu Endprodukten (z.B. Ketchup, Marmelade oder Kartoffelchips)
- **Getreide:**
Mahlen und Verarbeitung von Mehl bis hin zum Endprodukt (z.B. Nudeln, Backwaren), sowie Extraktion von Stärke, Glukose und Malz
- **Fleisch und Fisch:**
Kühlung und Zerkleinerung, Haltbarmachung (z.B. durch Tiefkühlen oder Räuchern) oder Zubereitung von Endprodukten (z.B. durch Vorgaren oder Frittieren)

Innerhalb jedes Sektors kann dabei die Verarbeitungstiefe schwanken; von leichter (Sortieren, Waschen oder Verpacken) bis hin zu intensiver Verarbeitung (Fermentationsprodukte oder Backwaren). Die Herstellung von Getränken und Fertiggerichten lässt sich generell einem oder mehreren der genannten Sektoren zuordnen, wird teilweise aber auch als separater Sektor gelistet.

In der Lebensmittelindustrie wird Frischwasser zum Waschen von Rohstoffen, zur Anlagenreinigung oder direkt im Produktionsverfahren eingesetzt. Durch die Einhaltung hoher Hygienevorschriften in der Produktion stellen Reinigungswässer mit Abstand den größten Teil des industriellen Abwassers dar ^[105, 106].

Abwasser von lebensmittel- verarbeitender Industrie

Branche	Total Suspended Solids (TSS) [g/l]	CSB [g/l]	BSB5 [g/l]	Öl/Fett [g/l]	pH
 Molkerei	0,15–1	0,8–4,5	0,8–5	0,05–0,5	3,5–13
 Fleischverarbeitung	0,8–4	2–8	1–4	0,3–2,5	6–8
 Fischverarbeitung	0,5–5	5–50	1–10	0,02–0,5	4,9–7,1
 Olivenöl-Herstellung	<100	30–300	10–150	<300	4–6

Abbildung 2: Typische Abwassercharakteristika ausgewählter lebensmittelverarbeitender Industriezweige [22, 115, 108, 113, 110]

Abwasserströme und -eigenschaften

Molkereien

In der milchverarbeitenden Industrie werden aus Rohmilch verzehrfähige Produkte hergestellt. Wichtige Verfahrensschritte in der Milchverarbeitung sind ^[107]:

- Entfernung von Schmutzpartikeln und Entrahmung der Milch, meist durch Zentrifugation oder Filtration
- Homogenisierung unter hohem Druck
- Entkeimende Wärmebehandlung mittels Pasteurisation, Hoherhitzung oder Ultrahocherhitzung
- Käseherstellung via Dicklegen der Milch durch Lab, Abtrennung der Festphase und Reifung
- Herstellung von Sauermilcherzeugnissen durch Vergärung von Lactose zu Milchsäure
- Haltbarmachung durch den Entzug von Wasser, wie durch Eindampfen oder Membranfiltration

In Molkereien entsteht durchschnittlich ca. 1 m³ Abwasser pro t verarbeitete Milch. Dieses Abwasser stammt einerseits direkt aus der Produktion (z.B. Tropfverluste, Spülmilch, Kondensate), andererseits aus Reinigungsprozessen (z.B. Reinigungslösungen, Desinfektion). Produktionsabwässer können je nach Verschmutzungsgrad z.T. wiederverwendet oder ohne Aufbereitung entsorgt werden. Reinigungsabwasser fällt hingegen in sehr großen Mengen (oft diskontinuierlich) an und ist oft sehr stark belastet ^[22].

Die wichtigste Verschmutzung im Molkereiabwasser ist Milch selbst, mit der entsprechenden organischen Zusammensetzung (v.a. Eiweiß, Milchzucker, Fett) (Abbildung 2). Charakteristisch sind hier hohe Stickstoff- und Phosphorkonzentrationen, auch im Verhältnis zum CSB. Hinzu kommen Rückstände von Nebenprodukten (z.B. Molke), Fermentationskulturen, Reinigungsmitteln und Produktionshilfsstoffen (z.B. Käsereisalz) ^[108, 109].

Fleisch- und Fischverarbeitung

Zur Fleischverarbeitung zählen die der Schlachtung nachgelagerten Schritte zur Herstellung verzehrfähiger Produkte aus Rohfleisch. Analog dazu wird hier

die Verarbeitung von frischem oder tiefgeköhltem Fisch bis hin zum Endprodukt betrachtet. Die wichtigsten Verarbeitungsschritte umfassen in beiden Fällen:

- Reinigen und Zuschneiden, wie die Entfernung von Haut, Schuppen, Knochen und anderen Körperteilen
- Zugabe von Zusatzstoffen, wie Gewürzen, Konservierungsmitteln oder Enzymen
- Haltbarmachung, wie durch Fermentieren, Räuchern oder Trocknen
- Zubereitung spezieller Lebensmittel, wie durch Emulgieren, Formen oder Garen
- Abfüllung und Verpackung, z.B. in Konserven

In der Fleisch- und Fischverarbeitung entstehen große Mengen tierischer Abfälle, die erfasst und entsorgt werden müssen – etwa 30–70 % des Fisches fallen bei der Herstellung von Fischkonserven als Abfall an. In vielen Fällen lassen sich diese Abfälle als Tier- oder Fischmehl verwerten. Abwasser stammt v.a. aus der häufigen Reinigung von Prozessflächen und Anlagen, die zur Sicherstellung von Hygienestandards nötig ist. In weitergehenden Verarbeitungsschritten steigt auch die Belastung des entstehenden Abwassers, beispielsweise bei Garvorgängen oder der Zugabe von Zusatzstoffen.

Tierische Rückstände – v.a. Proteine und Fette – bilden mit Abstand die wichtigste Verschmutzung des industriellen Abwassers. Sie führen zu hohen Organikkonzentrationen (CSB und BSB), Phosphorwerten im Bereich 30–100 mg/l und Stickstoffwerten meist >100 mg/l (Abbildung 2). Gerade Blut hat einen sehr hohen CSB-Gehalt und sollte daher, wo immer möglich, getrennt erfasst und entsorgt werden. Viele tierische Rückstände, wie Federn, Schuppen oder Gewebe, liegen in suspendierter Form vor und müssen als Feststoffe separiert werden ^[22, 110, 111, 112].

Herstellung von Olivenöl

Olivenöl wird traditionell durch einfaches Pressen und Filtrieren hergestellt, wie in allen Industriesektoren ist aber auch hier eine zunehmende Technologisierung zu beobachten. Die Gewinnung von Öl aus der Olivenmaische wird heute vorwiegend durch Zentrifugation in zwei oder drei Phasen erreicht. Dreiphasen-Dekanter benötigen bis zu 50 kg Frisch-

wasserzugabe für die Aufbereitung von 100 kg Olivenmaische. Das gewonnene Öl wird in den meisten Fällen chemisch oder physikalisch raffiniert, um störende Phospholipide, freie Fettsäuren und Trübstoffe zu entfernen. Dabei können Phosphorsäure, Natronlauge und andere Hilfsstoffe zum Einsatz kommen.

Bei der Olivenöl-Herstellung entsteht üblicherweise ca. 1 m³ Abwasser pro t Produkt, und zwar vor allem im Raffinationsschritt, z.B. bei der Nassentsäuerung. Das Abwasser ist allem voran durch eine hohe Organikbelastung gekennzeichnet, die sich aus Polyphenolen, Zuckern, Tanninen, Lipiden usw. zusammensetzt (Abbildung 2). Speziell Phenole können Konzentrationen über 10 g/l erreichen und sind für ihre hohe Umwelttoxizität bekannt ^[113, 114].

Aufbereitungsverfahren

Verfahrenswahl und -stufen

Die Herausforderung in der Abwasserreinigung lebensmittelverarbeitender Industrien besteht in der hohen Belastung mit organischen Stoffen – Feststoffen, Ölen und gelösten Stoffen. Grob- und Schwebstoffe werden üblicherweise in einem ersten Aufbereitungsschritt entfernt, um Verstopfungen in nachfolgenden Verfahrensstufen zu vermeiden. Die sonst häufig eingesetzte Schwerkraft-Sedimentation ist in der Lebensmittelindustrie wenig vertreten, da die Dichteunterschiede zwischen Fest- und Flüssigphase vergleichsweise gering sind. Stattdessen kommen bevorzugt folgende Technologien zum Einsatz ^[22, 110]:

- Stationäre oder bewegte Rechen und Siebe
- Zentrifugation (teilweise auch Dreiphasenzentrifugation zur gleichzeitigen Ölabscheidung)
- Flockung und Flotation

Öle und Fette werden entweder parallel zu den Feststoffen oder in einem nachfolgenden Verfahrensschritt entfernt. Gelöste Organik und Nährstoffe lassen sich im Anschluss üblicherweise sehr gut biologisch abbauen. An die Wieder- oder Weiterverwendung behandelten Abwassers werden in der Lebensmittelindustrie aufgrund strenger Hygiene-

auflagen besonders hohe Anforderungen gestellt. Unter günstigen Bedingungen können Prozessströme unmittelbar recycelt werden; für gesammeltes und aufgereinigtes Abwasser gibt es hingegen nur selten produktionsnahe Einsatzfelder.

Abtrennung von Ölen und Fetten

Industrieabwasser der Lebensmittelverarbeitung enthält oft unlösliche Fette und Öle tierischen oder pflanzlichen Ursprungs. Der einfachste und am weitesten verbreiteten Ansatz zur Abtrennung einer öligen Abwasserphase ist die statische Fettabcheidung. Bei geringer Strömungsgeschwindigkeit wird dabei der Dichteunterschied zwischen Wasser- und Fettphase genutzt, um die auftreibende Fettschicht an der Wasseroberfläche abzuschöpfen. Eine schnellere und vollständigere Trennung wird erreicht, wenn die Phasentrennung durch Zentrifugalkräfte anstelle der Schwerkraft oder durch Anlagerung an Gasblasen herbeigeführt wird. Dazu kommen entweder statische Hydrozyklone mit rotierender Strömung oder rotierende Zentrifugen bzw. Gasflotationsanlagen in Frage.

In der Milch-, Fleisch- und Fischverarbeitung kommen aber v.a. emulgierte Fette vor, die sich nicht durch herkömmliche Schwerkraft- oder Zentrifugalabscheider entfernen lassen. Der gängigste Ansatz ist in diesen Fällen eine Emulsionsspaltung durch den Einsatz von Säuren, Metallsalzen oder Calciumhydroxid. Durch das Ausflocken der Fette wird deren Abscheidung erleichtert, beispielsweise in einer nachfolgenden Gasflotationsstufe. Flotationsverfahren haben sich zur Abtrennung von Fetten und Ölen bewährt, weil dispergierte Gasbläschen sich bevorzugt an hydrophobe Stoffe anlagern und dadurch die Phasentrennung erleichtern. In der Lebensmittelindustrie kommt vor allem die Druck-Entspannungsflotation zum Einsatz. Bei komplexeren Trennaufgaben kann auch die Öl-Entfernung durch Ultrafiltration eine geeignete Lösung darstellen. In einem solchen Fall lässt sich parallel zur Entfettung etwa auch die Abtrennung hartnäckiger Schweb- oder Farbstoffe realisieren ^[22, 110].

Biologische Reinigung

Die biologische Aufbereitung eignet sich sehr gut zur Abwasserreinigung in der Lebensmittelindustrie. Zu beachten ist dabei, dass die Biologie vor einer Über-

lastung mit Ölen und Fetten zu schützen ist. Vor allem in Molkereien und in der Olivenölherstellung muss die biologische Stufe in der Regel durch eine vorgelagerte Fettabtrennung entlastet werden.

Zur biologischen Aufbereitung von Abwässern aus der Lebensmittelindustrie kommen aerobe und anaerobe Verfahren in Frage. Anaerobe Verfahren sind in der Regel sehr robust und eignen sich besonders für stark belastete Abwässer. Ein weiterer Vorteil liegt in der vergleichsweise geringen Produktion von Überschussschlamm. Die Realisierung erfolgt üblicherweise in Abwasserteichen oder in Biogasreaktoren mit oder ohne Bakterienrückführung. In den meisten Fällen wird der Anaerobanlage eine aerobe Stufe nachgeschaltet um die Grenzwerte einzuhalten; heute üblicherweise in Form von Belebungs- oder Tropfkörperverfahren.

Beim Betrieb von biologischen Reinigungsstufen kann es – je nach Abwasserzusammensetzung – teilweise zu Schwierigkeiten kommen. Einige typische seien hier genannt ^[22, 113]:

- Bildung von Blähschlamm durch hohe Zulaufkonzentrationen von sehr leicht abbaubarem CSB
- Schlechte Absetzeigenschaften des Belebtschlammes durch ein zu hohes Natrium/Calcium (Na/Ca)-Verhältnis im Abwasser, z.B. aus der Milchverarbeitung. In diesem Fall kann eine Schlammabtrennung durch Flotation der herkömmlichen Sedimentation überlegen sein.
- Störung des biologischen Abbaus durch Vorhandensein hemmender Stoffe, wie etwa durch Phenole aus der Olivenölherstellung
- Unzureichende Entfernung schlecht abbaubarer organischer Verunreinigungen, z.B. langkettiger Fettsäuren oder bestimmter Phenolverbindungen aus der Olivenölherstellung □



FALLSTUDIE: Olivenverarbeitende Industrie in Jordanien, Syrien und Libanon

Behandlung von Abwasser aus olivenverarbeitenden Betrieben

Hintergrund

Die Verarbeitung von Oliven ist ein großer wirtschaftlicher Faktor in den MENA Staaten. enviplan® hat im Auftrag des UNDP (United Nations Development Programme) eine mobile Anlage entwickelt, konstruiert und als Prototyp gefertigt, mit der diese Abwässer behandelt werden können. In Syrien, im Libanon und in Jordanien sind ca. 2.500 kleine Betriebe aktiv, die überwiegend frische Oliven verarbeiten. Für die Verarbeitung von 1 t Oliven wird ca. 1 m³ Frischwasser benötigt und extrem verunreinigt. Diese Betriebe sind wirtschaftlich nicht in der Lage, ein eigenes Abwasserbehandlungssystem zu errichten. UNDP möchte während der jährlichen Verarbeitungskampagne mobile Systeme anbieten, die die über die Länder verteilten Anlagen anfahren und deren Abwässer dezentral reinigen. Die Anlage steht seit der Inbetriebnahme 2009 in Syrien.

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Viele dezentrale Betriebe generieren bei der Verarbeitung von Oliven ein hochkritisches Abwasser, das in vielen Fällen schon zur Kontamination von Trinkwasser geführt hat. Hohe CSB-Frachten, hohe Polyphenolkonzentrationen und der diskontinuierliche Betrieb machen eine biologische Reinigung unmög-

lich. Wirtschaftliche und technische Rahmenbedingungen erschweren den Produzent*innen die Installation einer eigenen Abwasserbehandlungsanlage vor Ort. Die Abwässer sollen daher während der Kampagne mit dezentralen, mobilen Anlagen an Sammelstellen gereinigt werden.



Abbildung 1: Mobile AQUATECTOR® Microfloat®-Anlage für die saisonale Behandlung von Abwässern aus der Olivenverarbeitung als Pilotprojekte im Libanon, Syrien und Jordanien

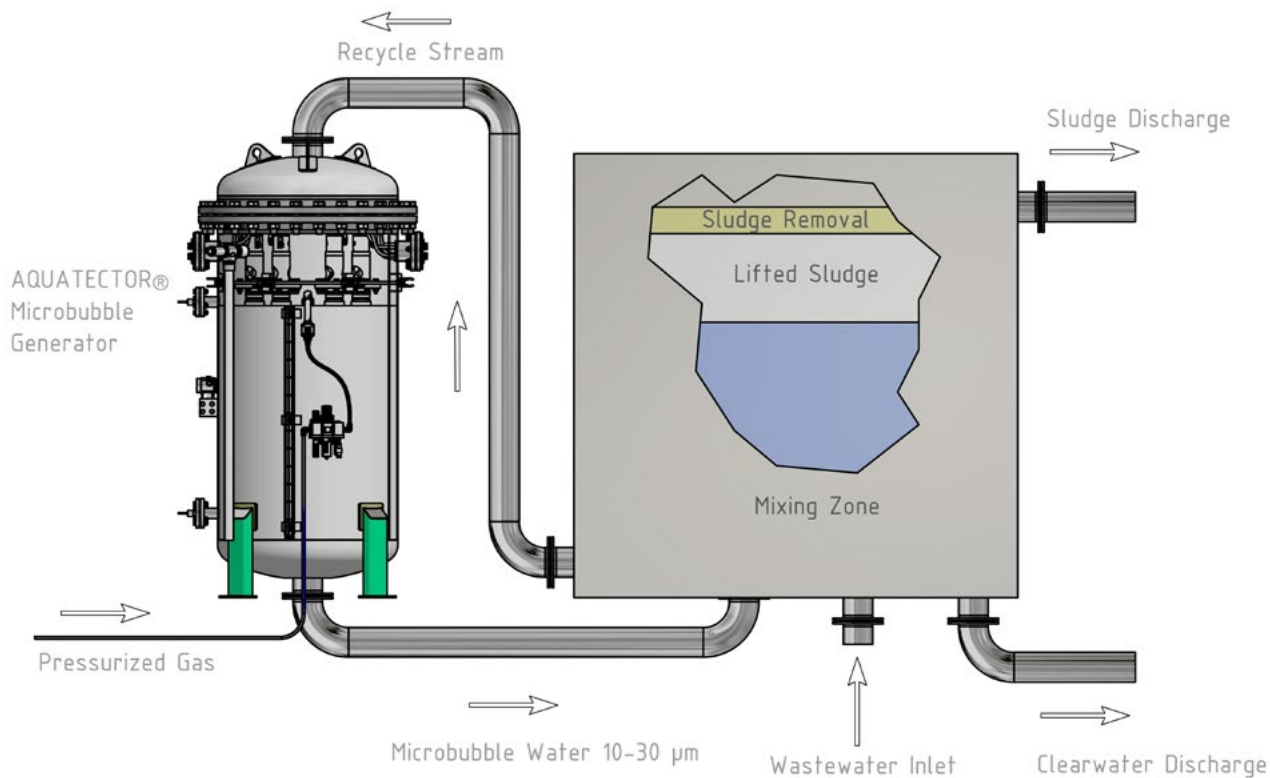
Lösungsansatz

Als weltweit einziges Verfahren ermöglicht die AQUATECTOR® Microfloat® Mikroflotation eine physikalisch-chemische Vorbehandlung zur anschließenden weiteren Reinigung mittels rückspülbarer Umkehrosmose. Dieses Kombinationsverfahren

hat das Potenzial, Abwasser bis auf Trinkwasser-niveau aufzubereiten. Das von enviplan® entwickelte und patentierte Verfahren wurde als technisches Demonstrationsprojekt im Jahre 2009 als mobiles, containerisiertes System vorgestellt (Abbildung 1). Das System hat eine Leistung von 2–5 m³/h und kann als Trailervariante ohne großen Aufwand transportiert werden. Containerlösungen sind ebenfalls realisierbar.

Die Verfahrenskombination besteht aus den folgenden Komponenten:

- Ölabscheider
- Zweistufige AQUATECTOR® Microfloat® Mikroflotation als physikalisch-chemische Reinigungsstufe
- Offenkanal-Umkehrosmoseanlage



Ergebnisse

Das mobile System erreicht die in Tab.1 genannten Ablaufqualitäten. Es ist eine robuste Technologie, mit der im Kampagnenbetrieb an verschiedenen Sammelpunkten eine Behandlungsmenge ab 2–5 m³/h gereinigt werden kann. Drei zentrale Anlagen wurden z.B. in Spanien mit Kapazitäten von 35 m³/h errichtet. Hierbei werden die Systeme als Abwasservorbehandlungsstufen ausschließlich mit der AQUATECTOR® Microfloat® Technologie eingesetzt, da eine ganzjährige Betriebsweise gewünscht wurde. Die Überwachung der Mikroflotation geschieht über ein HD-Kamerasystem, welches eine optische Bewertung der Flotatdecke ermöglicht. Die Anlagen-Ablaufqualität wird zusätzlich über Trübungsmessung, Leitfähigkeitsmessung, Temperatur und pH-Kontrolle gesteuert.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Die AQUATECTOR®-Anlage erlaubt die effiziente Abwasserreinigung im Hinblick auf Öle, Feststoffe und andere Organik. Im Vordergrund stehen dabei der geringe Platzbedarf und die große Robustheit des Verfahrens. Eingebettet in eine Verfahrenskombination mit Ölabscheidung und Umkehrosmose kann das Abwasser auf sehr kompakte Weise bis zur Trinkwasserqualität aufbereitet werden. □

Parameter	Einheit	Anlagen-Zulauf	Anlagen-Ablauf (Reduktion)
Freie Öle	g/l	Max. 20	95–99 %
CSB	mg/l	100.000	90–95 %
BOD	mg/l	50.000	90–95 %
Feststoffe	mg/l	2.000–3.000	>99 %
Polyphenole	mg/l	500–5.000	>95–98 %

Tabelle 1: Zu- und Ablaufwerte der realisierten Anlage (Beispielwerte)

FALLSTUDIE: Fischverarbeitende Industrie in Marokko

Biologische Abwasserbehandlung zur sicheren Einhaltung der rechtlichen Vorgaben

Hintergrund

Für eine Fabrik zur Herstellung von Fischkonserven in Süd-Marokko, die hauptsächlich Sardinen, Makrelen und Thunfisch verarbeitet, sollte eine Abwasserbehandlungsanlage installiert werden, die alle rechtlichen Vorgaben zur Einleitung in die örtliche Kanalisation sicher einhält. Die marokkanischen Vorgaben betreffen grundsätzlich die Parameter Temperatur, pH, CSB, BSB₅, Fett und Feststoffgehalt.

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Bei der Verarbeitung der Fische fallen große Mengen an Schuppen, Fischresten, Fetten, Ölen und anderen organischen Abfällen an, die z. T. ins Produktionsabwasser gelangen. Diese Abwasserfracht kann zu Verstopfungen in der kommunalen Kanalisation und unangenehmen Gerüchen führen.

Es sollte eine Abwasserbehandlungsanlage geplant und gebaut werden, die bei stark limitiertem Bau-raum die sehr hohe organische Abwasserfracht sicher auf die geforderten Grenzwerte reduziert.

Charakteristisch für die Produktion sind täglich stark schwankende Abwassermengen und -frachten. Außerdem sollte mit der Anlagenlösung eine Geruchsbildung vermieden werden und die Schlammbehandlung eine Trockensubstanz (TS) von 30 % erreichen.

Lösungsansatz

Von EnviroChemie wurde für die Aufgabenstellung eine mehrstufige Anlagenlösung geplant, installiert und in Betrieb genommen. Bevor etwa eine Tagesmenge des Produktionsabwassers in einem Tank gepuffert wird, wird es über einen Hochleistungssiebbandfilter und einen Fettabscheider vorbehandelt. So werden Feststoffe, vor allem Fischschuppen, und 50 % des Fett- und Ölgehaltes aus dem Abwasser entfernt. Anschließend entfernt eine Druckentspannungsflotation des Typs Flomar® anorganische und organische Abwasserinhaltsstoffe und reduziert so effektiv und wirtschaftlich die Abwasserschmutzfracht. Der kontinuierlich arbeitenden Flotationsstufe ist eine chemisch-physikalische Konditionierung vorgeschaltet. Damit werden bis zu 98 % Feststoffe und Fett und bis zu 60 % CSB entfernt. Der Flotatschlamm wird entwässert und zusammen mit dem Überschussschlamm mit einem TS von 30 % deponiert und die anfallenden Abwässer von der Entwässerung in einen Vorfluter abgeleitet.

Das Abwasser wird dann in einem Aerobreaktor vom Typ Biomar® OBBR (Oxidativer moving Bed Biofilm Reactor) geleitet, in dem die CSB- und BSB-Fracht weiter reduziert wird. Die Biomar® OBBR Technologie nutzt speziell entwickelte Kunststoffkörper, die für Mikroorganismen eine ideale Aufwuchsfläche in einer geschützten Umgebung bereitstellen. Diese Kunststoffkörper bewegen sich frei im Wasser und werden



Abbildung 1: Platzsparend installiert – Flomar® Flotation zur Abwasservorbehandlung und Schnecken- presse zur Schlamm- entwässerung in einer Fischfabrik in Marokko

im Reaktor durch die Belüftung in schwebender Bewegung gehalten. Die einzigartige Struktur der Aufwuchskörper und die freie Beweglichkeit im Wasser sorgen für den Schutz der Biomasse und ermöglichen einen optimalen Kontakt des Biofilms mit den Abwasserinhaltsstoffen und Sauerstoff. Die Belüftung der Biologie wird durch den Einsatz von Kompressoren gesichert.

Das Abwasser wird nach einer Verweilzeit von etwa einem Tag in ein Sedimentationsystem geleitet. Ein Teil des Bioschlammes wird in der Biologie wiederverwendet, der Rest wird zusammen mit dem Flotatschlamm in einem Schlammtank gespeichert. Abschließend wird der Schlamm mit einer Schneckenpresse entwässert und deponiert.

Der Puffertank, der Schlammtank und die Flotation sind abgedeckt. Entstehende Gase werden abgesaugt und in die Biologie geleitet, um die Geruchsmoleküle abzubauen. Die Anlage läuft vollkommen automatisch und alle Motoren sind mit Frequenzumformern ausgestattet, um den Energieverbrauch zu optimieren.

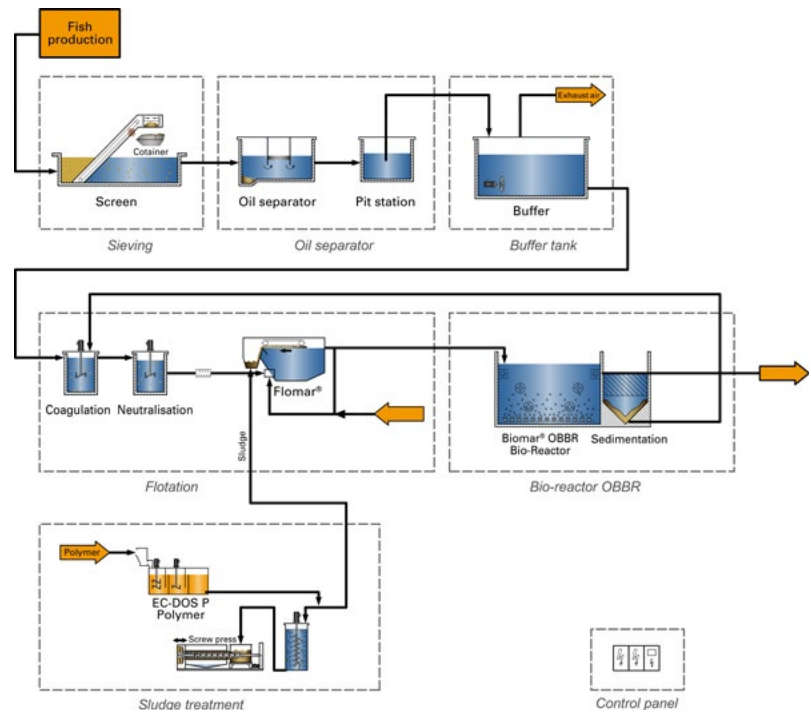


Abbildung 2: Prozessdiagramm der Anlage zur Abwasserbehandlung in einer Fischfabrik in Marokko

Ergebnisse

Die neu installierte, energieeffiziente Anlagenlösung zur Abwasserbehandlung erreicht sicher alle geforderten Reinigungsziele (s. Tabelle 1). Gerüche werden wirksam unterbunden. Die Schlammbehandlung erzielt einen TS von 30 %. Die komplette Anlagentechnik wurde automatisiert wie auch visualisiert für eine einfache Handhabung der Betreiber vor Ort.

Ein zusätzlicher Nutzen entsteht aus der Entfernung von ca. 95 % der Schuppen und Fischreste aus dem Abwasser. Diese werden zu Fischmehl weiterverarbeitet, welches vermarktet werden kann. Auch die abgeschiedenen Fette und Öle werden zu Fischmehl weiterverarbeitet.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Die hier installierte Anlage umfasst die vollständige und maßgeschneiderte Abwasserreinigung einschließlich mechanischer und biologischer Behandlungsstufen. Das sehr kompakte System toleriert Mengen- und Frachtschwankungen des Abwasserzulaufs und minimiert dabei die Geruchsbildung. Die abgetrennten Öle, Fette, Schuppen und Fischreste werden als Fischmehl weiter verwertet. □

Parameter	Einheit	Anlagen-Zulauf	Anlagen-Ablauf
Abwassermenge	m ³ /Tag	800	800
Fette und Öle	mg/l	3.000–6.000	<50
CSB	mg/l	13.000–25.000	<2.500
BSB	mg/l	6.500–12.500	<1.000

Tabelle 1: Zu- und Ablaufwerte der realisierten Anlage

FALLSTUDIE: Milchverarbeitung in Indien

Prozesswasserbehandlung von Molkereiabwässern

Hintergrund

Chitale Dairy, ein führendes Unternehmen der milchverarbeitenden Industrie in Indien, stand vor der Aufgabe seinen erweiterten Produktionsstandort in Bhilwadi, Maharashtra, mit einer neuen Prozesswasserbehandlung auszustatten.

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Die Herausforderung bei der Behandlung von Molkereiabwässern liegt meist in deren hohen Fett-, CSB- und BSB-Gehalten, die es zu entfernen gilt. In diesem Fall sollten geeignete Verfahrensschritte identifiziert werden, um hochbelastete Abwassermengen bei annehmbaren Investitions- und Betriebskosten zu behandeln.

Lösungsansatz

Bei der Erweiterung seines Anlagenstandorts vergab das Unternehmen den Auftrag zum Aufbau einer Prozesswasserbehandlungsanlage mit einem Durchsatz von 1.800 m³/Tag. A.T.E. HUBER Envirotech (AHET) gab daraufhin einen umfassenden Überblick über die auf dem Markt verfügbaren Technologien sowie deren Vor- und Nachteile. Biologische Verfahren können bei stabilem Anlagenbetrieb und entsprechender messtechnischer Überwachung eine effiziente Option zur Reinigung von Molkereiabwässern darstellen. Nach einer ausführlichen Diskussion mit den Betreibern fiel die Entscheidung auf die AVR-AF®-Technologie der Firma AHET, die zum effektiven Abbau von Fetten, Proteinen und Speiseölen geeignet ist.

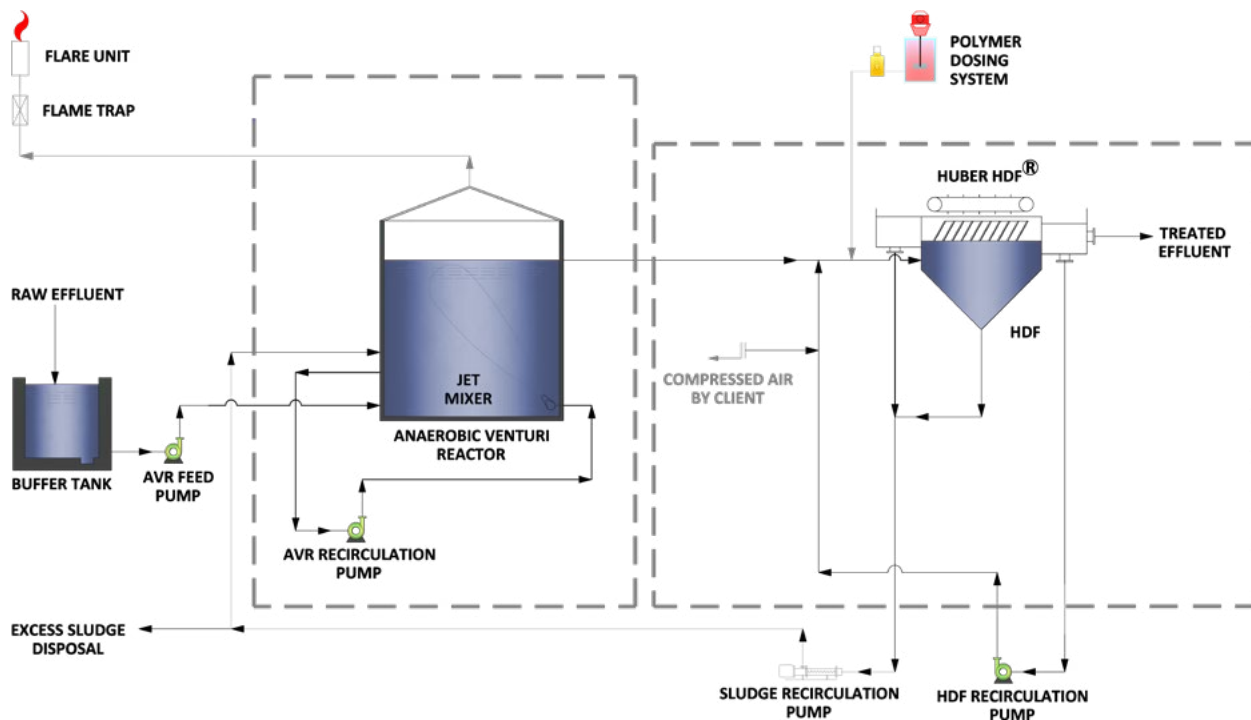


Abbildung 1: Fließbild des Anlagenaufbaus auf Basis der AVR-AF®-Technologie von A.T.E. HUBER Envirotech bei Chitale dairy in Bhilwadi, Maharashtra, Indien



Abbildung 2: Anlage für Chitale dairy in Bhilwadi, Maharashtra, Indien



Bei der AVR-AF®-Technologie handelt es sich um einen anaeroben Venturi-Reaktor mit anschließender Druckentspannungsflotation (HUBER HDF®) und aerober Nachbehandlung (Abb. 1). Es handelt sich um einen Reaktor nach Strahlzonen-Schlaufenbauweise. Im Reaktor werden energieeffiziente Düsenstrahlmischer anstelle mechanischer Mischer eingesetzt, die keine beweglichen Teile haben und eine gleichmäßige Durchmischung gewährleisten. Das Verfahren ist für hohe Konzentrationen von suspendierten Stoffen von bis zu 15.000 mg/l geeignet.

Im Vergleich zu anderen Technologien zeichnet sich die AVR-AF® Technologie durch eine geringere Schlammproduktion und einen geringeren Wartungsaufwand aus. Bestehende anaerobe Rührkesselreaktoren können auf AVR-AF® aufgerüstet werden. Die Druckentspannungsflotation trägt dazu bei, eine hohe Konzentration an suspendierten Stoffen beizubehalten. Diese wiederum trägt zur Steigerung der Prozesseffizienz und zur Verringerung des anaeroben Tankvolumens bei. Das in der anaeroben Stufe erzeugte Biogas wird aufbereitet (Entfernung von H_2S) und in einem Blockheizkraftwerk verstromt. Die Energiegewinnung war in Anbetracht der Betriebskosteneffizienz ein weiteres ausschlaggebendes Kriterium für den Betreiber.

Ergebnisse

Eine Anlage zur Behandlung von 1.800 m³/Tag Molkerieabwasser wurde von AHET entworfen, installiert und in Betrieb genommen. Der durchschnittliche CSB-Gehalt im Zulauf betrug 2.100 mg/l und im Ablauf weniger als 50 mg/l, was einer CSB-Entfernung von etwa 96 % entspricht. Die Qualität des Ablaufs erfüllt alle indischen Umweltschutznormen, und es werden fast 750 m³ Biogas am Tag erzeugt, was 50 % des Energiebedarfs der Anlage deckt.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Die hier eingesetzte AVR-AF®-Technologie ermöglicht aufgrund der speziellen Düsenmischtechnik die energieeffiziente Behandlung von Abwasser und in Kombination mit der Druckentspannungsflotation (HUBER HDF®) sehr hohe Feststoffkonzentrationen. Damit ist die Anlage kompakt und im Vergleich zu anderen Verfahren sind Wartungsaufwand und Schlammproduktion gering. Zudem wird Biogas als Energieträger gewonnen werden. Die aerobe Nachbehandlung ermöglicht sehr geringe Ablaufkonzentrationen. □

FALLSTUDIE: Lebensmittelverarbeitung Soja

Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser für Kühlungssysteme mit Umkehrosmose

Hintergrund

Die Produktion und Verarbeitung von Sojabohnen ist sowohl in Indien als auch in vielen anderen tropischen und subtropischen Regionen ein wichtiger Wirtschaftszweig. Ein in Thailand ansässiges Unternehmen, das Soja als Nahrungsmittel verarbeitet, hatte bisher Leitungswasser für seine Kühlaggregate verwendet. Die Kosten für Leitungswasser sind in der Region in den letzten Jahren allerdings erheblich gestiegen. Der Kunde war auf der Suche nach einer Aufbereitungslösung, die es ermöglicht, gereinigtes Abwasser aus der bestehenden Kläranlage wiederzuverwenden. Ein Teilstrom des gereinigten Abwassers wird der Umkehrosmose zugeführt, die dann das entsalzte Wasser ebenfalls dem Kühlsystem zuführt.

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Die Qualität des gereinigten Abwassers ist sehr schlecht. Hohe Mengen an nicht abgebauten Proteinen und Öl sind tägliche Herausforderungen, die zu einem ausgeprägten Membranfouling führen können. Außerdem begünstigt die Lagerung der Abwassers in Klärteichen die Vermehrung von Algen. Der Einsatz von Membrantechnologie zur Abwasserreinigung ist unter diesen Bedingungen dann eine sinnvolle Option, wenn – wie in diesem Beispiel aufgrund ökonomischer Kriterien – das gereinigte Wasser wieder oder weiterverwendet werden soll.

Lösung

Die Herausforderungen der Wasserqualität werden mit den keramischen Flachmembranen von CERA-FILTEC mit prozessintegrierter Membranreinigungsfunktion (CapClean) gelöst. Die getauchten Ultrafiltrationsmembranen werden bei jedem automatisierten Reinigungszyklus unter Verwendung von Chlor mit einer Einweichzeit von drei Minuten vollständig regeneriert. Dieses neuartige Reinigungsverfahren

ist nur mit out-in-Keramik-Flachmembranen und einem Moduldesign mit chemischer Sprinkleranlage möglich. Das anfallende Retentat (8%) wird der Kläranlage wieder zugeführt. Der Betreiber vor Ort überwacht routinemäßig Durchfluss, Druck, Trübung und pH-Wert in der Anlage.

Ergebnisse

Die Anlagenphase 1 mit 300 m³/Tag ist im Dezember 2019 in Betrieb genommen worden. Der Kunde hat nach einer 6-monatigen Leistungsbewertung mit der Kapazitätserweiterung der Anlage um weitere 2.100 m³/Tag begonnen. Aufgrund des sehr geringen Stromverbrauchs der Anlage sowie der Einsparungen beim Leitungswasserverbrauch wurde ein Break-even-point von weniger als drei Jahren ermittelt.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Die installierte Membrananlage besitzt eine integrierte Reinigungsfunktion und erlaubt durch ihr spezielles Moduldesign eine sehr effiziente Membranreinigung. Dadurch lässt sie sich auch unter herausfordernden Bedingungen, z.B. hohes Foulingpotenzial des Abwassers, stabil und mit geringem Energieaufwand betreiben. □

Kenngröße	Einheit	Zulauf	Ablauf
Farbe	Pt-Co	117	39
COD	mg/l	68	30
BOD ₅	mg/l	9	4
TSS	mg/l	18	<1
TDS	mg/l	946	967
Trübung	mg/l	11,2	0,18
Ölkonzentration	mg/l	7,2	0,2

Tabelle 1: Relevante Konzentrationen um Zu- und Ablauf der Cerafiltec-Anlage

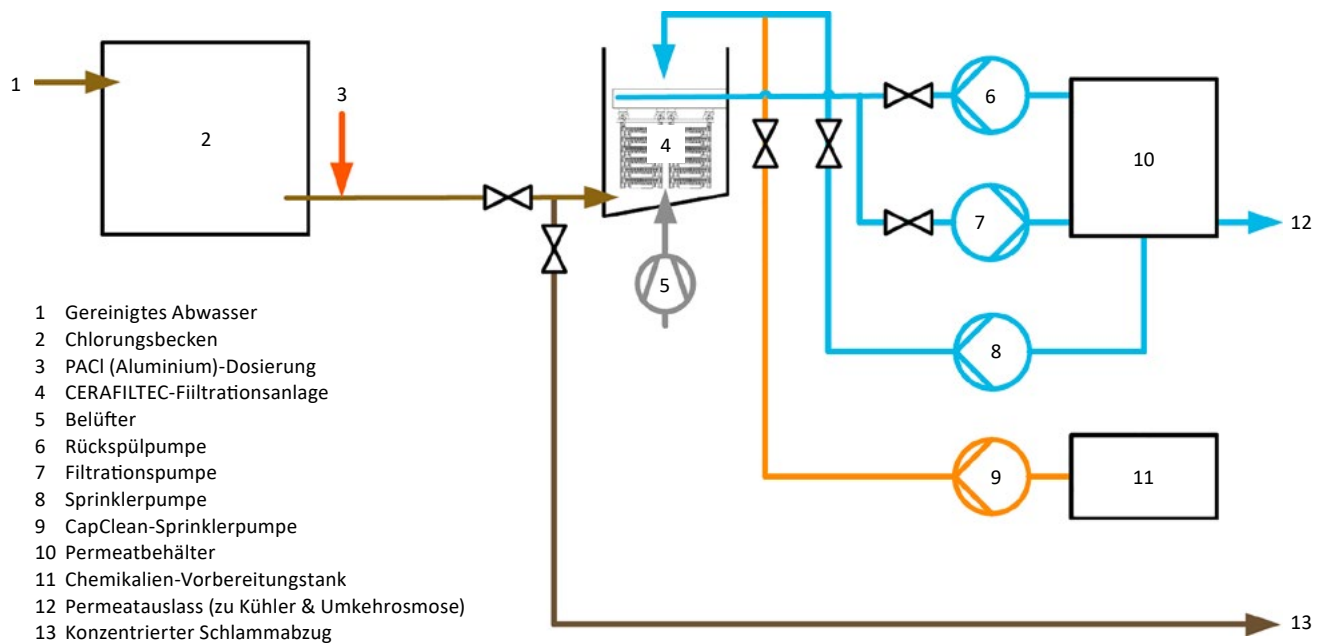


Abbildung 1: Prozess-Fließbild der Cerafiltec-Filtration zur Wasserwiederverwendung



Abbildung 2: Fotografie der eingebundenen Cerafiltec-Anlage

6

METALLERZEUGUNG

UND -BEARBEITUNG

Länderspezifische Informationen

Indien

Die Metallindustrie ist aufgrund der vorhandenen Erzressourcen traditionell ein wichtiger Treiber der indischen Wirtschaft. Die Stahlindustrie hat sich im letzten Jahrzehnt zur zweitstärksten Produktion weltweit entwickelt und trägt mit einer Jahresproduktion

von ca. 110 Mio. t erheblich zum nationalen Bruttoinlandsprodukt bei (Tabelle 1). Andere Metalle, wie Kupfer oder Aluminium werden ebenfalls in nennenswerten Mengen gefördert. Zusätzlich zur Wertschöpfung innerhalb der Metallproduktion bildet Stahl eine wichtige Grundlage für eine Vielzahl nachgelagerter Industrien. Der mit Abstand größte Anteil (über 60 %) des produzierten Stahls findet im Baugewerbe Verwendung, z.B. im Infrastruktur- und Gebäudebau. Andere relevante Stahlverbraucher sind die Konsumgut- und Automobilindustrien ^[9].



Zentren der Stahlproduktion sind aufgrund ihrer geografischen Nähe zu den natürlichen Eisenerz- und Kohleressourcen Indiens die Bundesstaaten Odisha, Jharkhand, Chhattisgarh und Karnataka. Hier werden in modern ausgestatteten Stahlwerken Stähle verschiedener Güteklassen hergestellt. 45 % der Stahlproduktion geschieht direkt in belüfteten Hochöfen. Ein wichtiges Zwischenprodukt der indischen Stahlindustrie ist aber auch der Eisenschwamm, der typischerweise durch Direktreduktion unter Einsatz von Kohle gewonnen und anschließend meist in Lichtbogenöfen verhüttet wird.

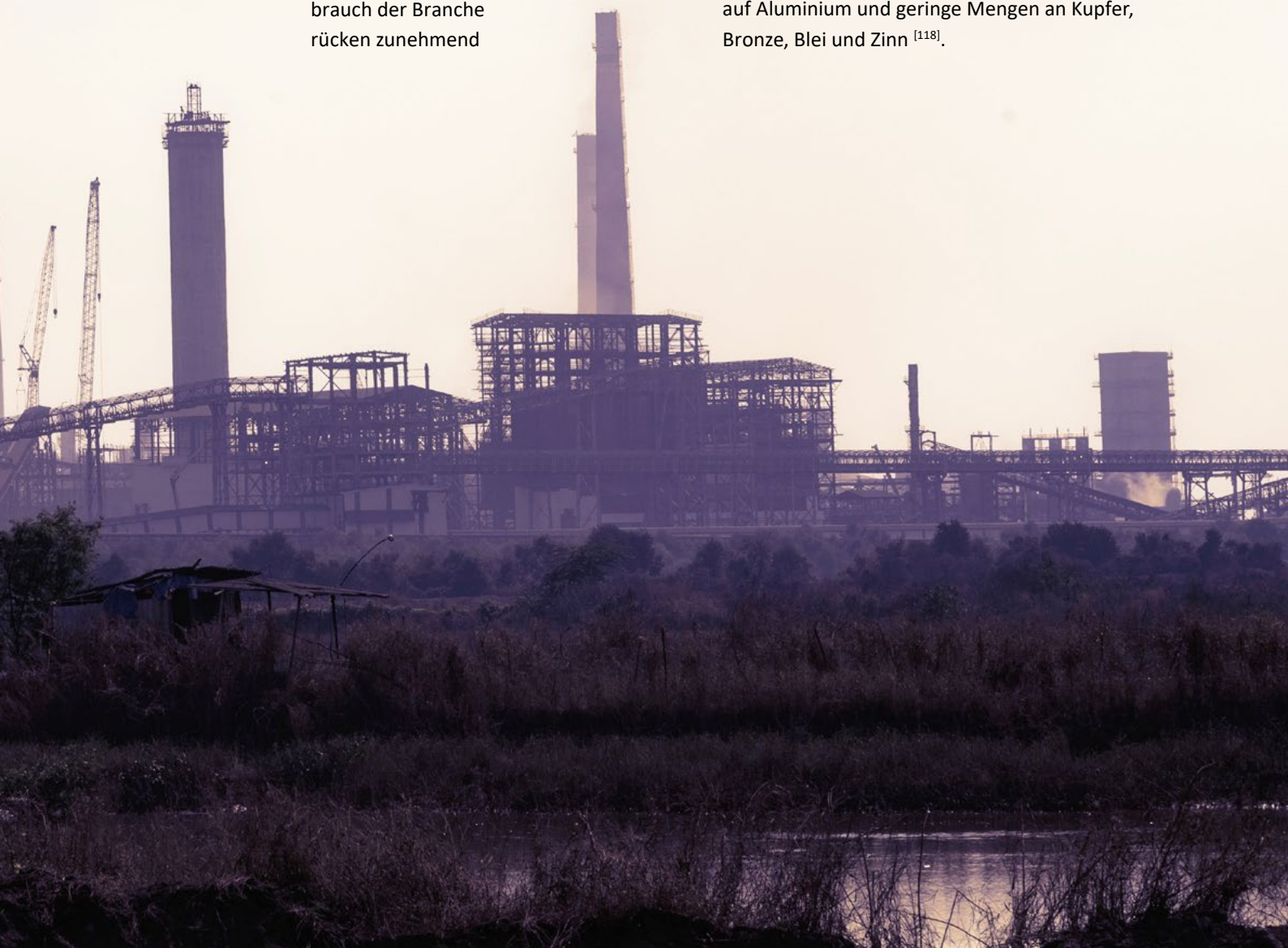
Die indische Metallindustrie befindet sich zum größten Teil (ca. 80 %) in privater Hand, die dominanteste Firma ist die international tätige Tata Steel. Etwa 50 % des Stahls werden von integrierten Produktionsunternehmen hergestellt, die die gesamte Produktionskette von der Stahlschmelze bis zur Weiterverarbeitung abdecken ^[116, 9].

Neben dem außerordentlich hohen Energieverbrauch der Branche rücken zunehmend

auch andere Umweltschutzaspekte in den Vordergrund. Strengere Umweltschutzaufgaben befinden sich derzeit in Vorbereitung durch die Regierung. Die Einhaltung unternehmerischer Energie- und Wassermanagementpläne gilt schon heute als Standard – die wichtigste konkrete Maßnahme ist hier oft die produktionsnahe Wiederverwendung von Wasserströmen und die Kreislaufführung von Kühlwasser ^[117].

MENA

Auch in der MENA-Region ist der Bedarf an Metallen und Metallkomponenten eng an das allgemeine Wirtschaftswachstum gekoppelt. Die meisten Länder sind allerdings Netto-Importeure und produzieren lediglich Stahl in relevanten Mengen vor Ort (Tabelle 1). In einigen Ländern, wie Ägypten oder Jordanien, werden die vorhandenen Produktionskapazitäten aufgrund von Rohstoff- und Erdgasknappheit seit Jahren nur unzureichend ausgeschöpft. Die Produktion von Nichteisenmetallen spielt eine weiter untergeordnete Rolle und beschränkt sich im Wesentlichen auf Aluminium und geringe Mengen an Kupfer, Bronze, Blei und Zinn ^[118].



Die Stahlproduktion erfolgt typischerweise in Lichtbogenöfen, lediglich in Ägypten sind zusätzlich dazu auch Hochöfen in Betrieb ^[119]. Bei den Stahlprodukten handelt es sich im Wesentlichen um Kohlenstoffstahl und teilweise Edelstahl, während Spezial- und Legierungsstähle eine deutlich geringere Rolle spielen. Eine Oberflächenveredelung findet – wenn überhaupt – meist in Form der Feuerverzinkung statt. Der wichtigste Abnehmer für Stahl ist in der MENA-Region das Baugewerbe, z.B. im Gebäude- und Infrastrukturbau. Mittelfristig wird außerdem ein steigender Stahlbedarf der lokalen Automobil- und Energiebranchen erwartet. Die Stahlindustrie produziert der Nachfrage entsprechend deutlich mehr Langerzeugnisse (ca. 70–80 %) als Flacherzeugnisse (ca. 20–30 %). In Marokko, Ägypten und Jordanien sind Bewehrungsstäbe mit Abstand für den größten Anteil des Umsatzes im Stahlmarkt verantwortlich ^[120].

Branche und Abwasseranfall

Für die Herstellung verschiedener Konsum- und Investitionsgüter stellt die Metallerzeugung und -bearbeitung einen wichtigen vorgelagerten Industriezweig dar. Hierzu zählen die Produktion von Eisen, Stahl und anderen Metallen, deren Bearbeitung durch ur- und umformende Verfahren und die Oberflächenveredelung ebenso wie die Herstellung von Metallerzeugnissen.

Metallerzeugung

Die Erzeugung von Eisen- und Nichteisenmetallen erfolgt in der Regel durch das Schmelzen von entsprechenden Erzen. Traditionell wird Roheisen bei Temperaturen bis zu 2.000°C in Hochöfen gewonnen und anschließend zu Stahl oxidiert, wobei als Abfallströme stark staubbelastetes Konvertergas und Stahl-

Jährliche Produktionsmengen



Land	Stahl	Aluminium	Kupfer	Zink
Indien	109.272	2.750	450	688
Ägypten	7.807	317	4	n.a.
Marokko	600	n.a.	n.a.	n.a.
Jordanien	150	n.a.	n.a.	n.a.
Tunesien	50	n.a.	n.a.	n.a.

Tabelle 1: Jährliche Produktionsmengen für ausgewählte Materialien im Jahr 2018 [1.000 t pro Jahr] ^[119, 118]

werksschlacke entstehen. Alternativ dazu hat sich regional die Stahlschmelze aus Eisenschwamm oder Roheisen im Lichtbogenofen durchgesetzt. In der anschließenden metallurgischen Weiterbehandlung wird zur Einstellung der Stahllegierung und -reinheit Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff oder Wasserstoff entfernt und mit dem Abgas abgeführt ^[121, 122].

Nichteisenmetalle werden mittels Hydro- oder Pyrometallurgie aus Erzen gewonnen und durch elektrolitische Verfahren weiter aufkonzentriert. Dank seiner herausragenden thermischen und elektrischen Leitfähigkeit ist Kupfer heute ein wichtiges industrielles Nichteisenmetall. Außerdem spielt Aluminium aufgrund seines geringen spezifischen Gewichts eine immer größere Rolle. Aluminium wird typischerweise im Bayer-Verfahren aus Bauxit gewonnen, indem das Mineral bei erhöhten Temperaturen in Natronlauge aufgelöst und anschließend als Aluminiumhydroxid ausgefällt wird ^[123]. Aufgrund der großen Mengen stark belasteter Abgasströme entstehen die wichtigsten Abwasserströme der Metallerzeugung aus den Waschwässern der Abgasreinigung.

Ur- und umformende Verfahren

Stahl und anderes Metall wird heute meist kontinuierlich im Stranggießverfahren abgegossen und anschließend im Warmwalzwerk zu Lang- oder Flacherzeugnissen weiterverarbeitet. Beim Gießen in Schachtofen kann Gichtgas entstehen, das Ähnlichkeiten mit Konvertergas hat und entsprechend trocken oder nass gereinigt werden muss. Beim Warmwalzen wird Wasser neben der Indirektkühlung auch zur Hochdruckentzunderung und zur Direktkühlung eingesetzt und kommt dabei unmittelbar mit dem Metallprodukt in Kontakt. Nach mechanischer oder chemischer Oberflächenbehandlung, z.B. zur Zunderentfernung, werden die Eigenschaften des Metallprodukts durch Kaltwalzen weiter verfeinert. Die weitere Bearbeitung durch spanende, umformende oder fügende Verfahren bildet den Übergang zur Herstellung von Metallerzeugnissen und kommt in der Regel ohne nennenswerten Wasserverbrauch aus ^[124, 125].

Oberflächenveredelung

In vielen Fällen werden Metallkomponenten einer Oberflächenveredelung unterzogen, um ihre funktionalen oder dekorativen Eigenschaften zu verbessern,

z.B. zum Korrosionsschutz. Zunächst ist dazu eine Oberflächenvorbehandlung durch chemisches und teilweise mechanisch unterstütztes Reinigen, Entfetten oder Beizen nötig. Den Kern der Oberflächenveredelung bildet eine metallische Beschichtung, die typischerweise durch elektrolitische Abscheidung, aber auch durch Reduktions- oder Tauchverfahren realisiert werden kann. Zu den am weitesten verbreiteten Beschichtungsverfahren zählen die Galvanik (z.B. Verchromen) und das Schmelztauchen (z.B. Feuerverzinken). Abschließend kann die Metalloberfläche durch Oxidation weiter modifiziert werden (z.B. Brünieren). Die chemische und elektrolitische Oberflächenveredelung erfolgt meist in Tauch- oder Spritzbädern, die (semi-) kontinuierlich regeneriert und bis auf wenige Ausnahmen abwasserfrei betrieben werden. Abwasser fällt hier v.a. in den Spülvorgängen an, die jedem einzelnen Behandlungsschritt nachgeschaltet sind ^[126, 127].

Abwasserströme und -eigenschaften

Gaswäsche

Stark belastete Abgase entstehen u.a. bei der Koks-erzeugung, in Hochöfen und anderen pyrometallurgischen Prozessen. Neben der trockenen Abgasreinigung ist in vielen Fällen auch heute noch die nasse Gaswäsche Stand der Technik, wenn sowohl gas- als auch partikelförmige Verunreinigungen zu entfernen sind. Trockene Entstaubungsverfahren kommen v.a. im Zusammenhang mit Lichtbogenöfen zum Einsatz, sodass dort im Vergleich zur Hochofenroute kaum Gaswaschwasser anfällt. Das entstehende Waschwasser wird üblicherweise im halbgeschlossenen Kreislauf gefahren. Zu den häufigsten Verunreinigungen in Gaswaschwässern zählen (Tabelle 2) ^[122, 128, 129]:

- Suspendierte Staubpartikel
Abwasser aus der Gaswäsche von Hochöfen enthalten ca. 1–10 kg Feststoffe pro t produziertes Metall. Dabei handelt es sich v.a. um Eisen- und Manganoxide, sowie um Phosphor- und Stickstoffverbindungen.

- **Wasserlösliche Gase**
Vor allem Konvertergas und vergleichbare Gase aus der Nichtmetall-Erzeugung können hohe Frachten von Stickoxiden und Schwefeldioxid in das Abwasser eintragen. Eine häufige Verunreinigung ist außerdem gelöstes Dicyan.
- **Gelöste Stickstoffverbindungen**
Gaswaschwässer aus der Kokserzeugung enthalten oft organische Stickstoffverbindungen sowie anorganischen Stickstoff (v.a. Ammonium, aber auch Thiocyanide).
- **Gelöste Salze**
Durch den Kontakt mit dem Sekundärrohstoff enthalten Abgase typischerweise weitere gelöste anorganische Verunreinigungen, z.B. Schwefelverbindungen, Fluoride und Chloride. Speziell in Waschwässern von Konvertergas können auch Schwermetalle (z.B. Arsen) eine relevante Rolle spielen
- **Organische gelöste Stoffe**
Viele Gaswaschwässer sind mit organischen Verunreinigungen belastet, z.B. mit Phenol, Naphtalin oder polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen. Gichtgase aus Gießereiöfen können außerdem Hilfsstoffe aus den Gießformen in das Abwasser eintragen (z.B. Trenn- und Bindemittel wie Amine)
- **Cyanide**
In den meisten Gaswaschwässern werden erhöhte Konzentrationen von Cyaniden beobachtet. Im Konvertergas steht die Cyanidbelastung im engen Zusammenhang mit Entlastungs-, Anfahr- und Abschaltvorgängen.

Unmittelbarer Produktkontakt

In einigen Prozessschritten der Branche kommt Prozesswasser in direkten Kontakt mit dem Metall oder Nebenprodukten. Dies gilt zum Beispiel für Granulationswasser zur Verarbeitung von Hochofenschlacken, das alkalisch reagiert und Sulfide enthält. Der größte durch unmittelbaren Produktkontakt verunreinigte Abwasserstrom entsteht allerdings aus den beim Stranggießen und Warmwalzen eingesetzten Produktkühlwässern. Sie sind v.a. durch Feststoffe belastet – so werden pro t Walzstahl ca. 15–40 kg

Walzzunder im Prozesswasser abgeführt. Außerdem finden sich häufig hohe Konzentrationen von Ölen und Emulsionen, die aus der Produkt- und Anlagenschmierung oder Hydraulikleckagen stammen (Tabelle 2) ^[22, 130].

Oberflächenveredelung

Die sauren oder alkalischen Behandlungsbäder und Elektrolytbäder der Oberflächenveredelung werden üblicherweise (semi-)kontinuierlich regeneriert und nach langer Standzeit ggf. nach entsprechender Aufkonzentrierung als Sonderabfall entsorgt. Die in den zwischengeschalteten Produktpülungen anfallenden Prozesswässer werden nach Stand der Technik im

Verfahrensschritt	Typische Verunreinigungen
Gaswäsche (Koksofen)	1–4 g/l Phenol
	2–6 g/l NH_4^+
Gaswäsche (Konvertergas)	0,2–1 g/l TSS
	0,1–5 mg/l Phenol
	2–200 mg/l NH_4^+
	0,1–50 mg/l Cyanid
Direktkühlung (Warmwalzen)	0,1–2 g/l TSS
	10–200 mg/l Öl
Entfetten	0,5–1 g/l TSS
	0,1–0,2 g/l Öl
	0,3–0,5 g/l CSB
	5–100 mg/l TSS
Elektrolytische Oberflächenbeschichtung	0,1–1 g/l CSB
	0,1–10 mg/l Phosphat-P
	0,1–0,5 mg/l VOX (leichtflüchtige organische Halogene)

Tabelle 2: Konzentrationsbereiche der wichtigsten Verunreinigungen in Abwässern unterschiedlicher Verfahrensschritte der Metallerzeugung und -bearbeitung ^[130, 131, 133]

halbgeschlossenen Kreislauf betrieben, wobei der abgeführte Teilstrom als Abwasser behandelt werden muss.

Bei den Spülwässern aus der Vorbehandlung handelt es sich meist um saure Lösungen (v.a. Salz-, Schwefel- oder Salpetersäure) (Tabelle 2). Auch wenn dies nicht mehr als Stand der Technik gilt, können sie ggf. auch organische Lösemittel und chlorierte Kohlenwasserstoffe enthalten. Typische Verunreinigungen dieser Spülwässer sind neben gelösten Metallen auch Cyanide, Chloride, Sulfate und Phosphate. Abwässer aus elektrolytischen Verfahren enthalten neben den entsprechenden Metallionen oft eine Bandbreite an Hilfsstoffen wie Netzmittel, Glanzbildner, Tenside, Komplexbildner und pH-Puffer. Beim Feuerverzinken und anderen Tauchverfahren wird Wasser im Wesentlichen zur indirekten Kühlung der Schmelzöfen eingesetzt und kann entsprechend mit Härtesalzen, Bioziden und Antiscalants (Kesselsteinhemmer) belastet sein ^[131, 132].

Kühlwasser

Kühlwasser wird bei fast allen industriellen Prozessen verwendet und dient dazu, überschüssige Energie abzuführen und Produkte- oder Prozesswässer nach der Verarbeitung wieder auf Umgebungstemperatur zu bringen. Insbesondere in der Metallbearbeitung bei hohen Temperaturen fällt Kühlwasser in großen Mengen an – je mehr Energie in einem Prozess eingesetzt wird, desto mehr Energie muss auch abgeführt werden. Die im Folgenden beispielhaft aufgeführten Einsatzmöglichkeiten von Kühlwasser (nach ^[22]), gelten teilweise auch für andere Industriesektoren.

Bei der Durchlaufkühlung wird Wasser einmalig für die Kühlung benutzt, etwa bezogen aus einem Brunnen oder Oberflächengewässer, und verlässt nach der Nutzung den Betrieb wieder. Daraus resultiert zwar ein sehr hoher Wasserverbrauch, allerdings je nach Einleitbedingungen kaum oder kein Behandlungsbedarf des Wassers.

Im offenen Kühlkreislauf wird Wasser über einen klassischen Nasskühlturm verdunstet und partiell im Kreis geführt. Dadurch ergibt sich ein geringerer Wasserverbrauch als bei der Durchlaufkühlung, allerdings führt die partielle Verdunstung auch zu einer Erhöhung der Konzentration chemischer Inhaltsstoffe. Diese können zu Ablagerungen und Korrosion

führen und müssen somit aus dem Kühlwasser entfernt werden. Weiterhin ist das feucht-warme Milieu eines Kühlkreislaufes eine ideale Umgebung für das Wachstum von Bakterien – insbesondere ist hier auf die Gefahr durch Legionellen hinzuweisen.

Im geschlossenen Kühlkreislauf erfolgt die Kühlung über einen Wärmetauscher, sodass das Kühlwasser nicht mit der umgebenden Atmosphäre in Kontakt kommt – die einzigen Wasserverluste resultieren hier aus Leckagen oder anderen Verlusten im System. Die Erhöhung der Konzentration von Inhaltsstoffen spielt daher in diesem System fast keine Rolle, allerdings können sich Korrosionsprodukte ansammeln. Der größte Nachteil dieses Verfahrens ist der relativ hohe Energiebedarf.

Aufbereitungsverfahren

Verfahrenswahl und -stufen

Die in der Metallerzeugung und -bearbeitung anfallenden Abwässer können sich bezüglich ihrer Volumenströme und Zusammensetzung stark unterscheiden, wodurch die Auswahl geeigneter Reinigungsverfahren stark standort- und anlagenabhängig ist. Weit verbreitet ist die gemeinsame Aufbereitung aller gesammelten Abwässer in einer zentralen Indus-



trikläranlage durch chemisch-physikalische Verfahren (z.B. Sedimentation, Fällung, Filtration) und/oder eine biologische Reinigung. Die Zielsetzung ist in der Regel folgende ^[22]:

- Feststoffabtrennung
- Abtrennung von Ölen und Fetten, falls nötig
- Entfernung gelöster organischer, metallischer und anderer anorganischer Verunreinigungen
- Neutralisation, falls nötig

In vielen Fällen kann eine dezentrale Vorbehandlung einzelner Abwasserströme die Gesamteffizienz der Abwasserreinigung deutlich verbessern. Dabei kann das Aufbereitungsschema konkret an die jeweils relevanten Verunreinigungen und Reinigungsziele angepasst werden.

Eine dezentrale Reinigung von Prozessabwässern ist auch Voraussetzung für die (teilweise) Wiederverwendung von Wasser. Gänzlich geschlossene Wasserkreisläufe lassen sich typischerweise in geschlossenen Kühlsystemen realisieren, z.B. zur Kühlung von Gießformen über Wärmetauscher. In vielen Fällen kann behandeltes Abwasser, das für eine Wiederverwendung nicht die benötigte Reinheit besitzt, für andere Anwendungen mit niedrigeren Qualitätsanforderungen eingesetzt werden ^[22, 130, 134].

Gaswäsche

In den meisten Fällen wird anfallendes Gaswaschwasser zunächst neutralisiert, bevor die enthaltenen suspendierten Feststoffe entfernt werden. Die Feststoffabtrennung geschieht durch Sedimentation in Rundklärbecken, üblicherweise unter Zugabe von Flockungshilfsmitteln, um die Absetzeigenschaften der sehr fein suspendierten Partikel zu verbessern. In Einzelfällen kann eine Verfahrenskombination mit Hydrozyklonen oder Sandfiltern nötig sein, um weitgehende Feststofffreiheit im Ablauf zu erreichen.

Eine weitere Aufreinigung, beispielsweise mittels Ionentausch oder Adsorption, kann dann sinnvoll sein, wenn das Abwasser entweder von umweltgefährlichen Stoffen befreit werden soll (z.B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) oder wenn es wertvolle Metallverbindungen enthält, deren Rückgewinnung wirtschaftlich lohnend ist. Cyanidhaltiges Abwasser kann durch Strippen, Oxidation, biologischen Abbau oder Komplexierung aufbereitet

werden. Am häufigsten eingesetzt wird die Reaktion zu Glykonitril unter Zugabe von Formaldehyd, mit anschließender Oxidation des Glykonitrils (z.B. durch Wasserstoffperoxid) ^[128, 129, 134].

Unmittelbarer Produktkontakt

Abwasser aus direktem Produktkontakt enthält oft hohe Konzentrationen an Feststoffen, die zu Ablagerungen und Anlagenschäden (z.B. an Pumpen) führen können. Daher wird meist möglichst nah am Anfallsort zumindest ein Sandfang installiert, um einen Großteil der Feststoffe zu entfernen. Im Fokus der Abwasserreinigung steht typischerweise die Abtrennung von Ölen und die weitere Feststoffabbreicherung. Im ersten Schritt werden meist aufschwimmende Öle und Fette durch Schwerkraftabscheidung entfernt, um ein Zusetzen der nachgelagerten Anlagen zu verhindern. Die Feststoffentfernung erfolgt in der Regel in einem zweistufigen Verfahren, bestehend aus Sedimentation und Sandfiltration. Oft werden in der Sandfiltration auch noch Rückstände von Ölen und Fetten zurückgehalten. Gelegentlich kommen auch alternative Ansätze zur gleichzeitigen Öl- und Partikelabtrennung zum Einsatz, wie etwa Spaltfiltration oder Flotation. Enthält das Abwasser nennenswerte Konzentrationen an Kühlschmieremulsionen, kann zusätzlich eine thermische oder chemische Emulsionsspaltung, ggf. in Kombination mit einer biologischen oder oxidativen Nachbehandlung, erforderlich sein. Wird das Abwasser nach Stand der Technik aufbereitet, gilt eine 95 %-ige Wiederverwendung (z.B. zur Produktkühlung im Warmwalzwerk) als realisierbar ^[22, 130, 135].

Oberflächenveredelung

Der erste Aufbereitungsschritt von Abwässern aus der Oberflächenvorbehandlung und -veredelung ist aufgrund der oft niedrigen pH-Werte meist die Neutralisation, z.B. mit Calciumhydroxid oder Natronlauge. In vielen Fällen treten dabei bereits Fällungsreaktionen auf, d.h. gelöste Metallionen werden als Hydroxide abgeschieden und können im folgenden Schritt als Feststoffe abgetrennt werden. Die Feststoffabtrennung erfolgt üblicherweise durch Sedimentation (ggf. unter Zugabe von Flockungshilfsmitteln), gelegentlich auch in Kombination mit Filtrationsverfahren.



Eine weitergehende Aufbereitung ist dann nötig, wenn das Abwasser umweltgefährliche Gelöststoffe enthält. Cyanide werden typischerweise mittels UV-Strahlung oder Wasserstoffperoxid oxidiert, da es beim Einsatz von Hypochlorit zur Bildung adsorbierbarer organisch gebundener Halogene kommen kann. Sollte zur Oberflächenbehandlung noch das hochtoxische Chrom (VI) eingesetzt werden, müssen entsprechende Rückstände im Abwasser mittels Natriumbisulfit oder Eisen (III)-Sulfat zum weniger problematischen Chrom (III) reduziert werden. In einigen Fällen kann das entsprechend aufbereitete Wasser für die Produktpülung wieder- oder weiterverwendet werden – speziell Passivierungs- und Chromatierungsverfahren stellen allerdings so hohe Anforderungen an die Wasserreinheit, dass eine Wiederverwendung hier nicht in Frage kommt ^[22, 131, 136].

Kühlwasser

Wie oben erwähnt ist die Behandlung von Kühlwässern in den weitverbreiteten offenen Kühlkreisläufen ein wichtiger Prozess ^[22]. Einerseits verursachen hohe Chlorid-Konzentrationen im Kühlsystem – besonders bei niedrigen pH-Werten – oft Metallkorrosion, die potenziell zu Leckagen im System führt. Ablagerungen auf Wärmetauschern und anderen Kühlelementen, z.B. durch Calciumcarbonat, sind ein weiteres verbreit-

tetes Phänomen. Die Ablagerung führt zum Verlust von Wärmetransferleistung und begünstigt außerdem das Wachstum von Biofilmen. Bakterienwachstum – insbesondere Biofilme, die pathogene Legionellen enthalten können – ist eines der Hauptprobleme in Kühlsystemen und kann aufgrund des hohen Gesundheitsrisikos schnell zu Schließungen von Betrieben führen. Typischerweise werden diese Probleme durch den Einsatz von Chemikalien, z.B. Bioziden, Enthärtern und Korrosionsinhibitoren, behandelt. Diese müssen extern eingekauft und oft in großer Menge eingesetzt werden, was unter ökonomischen Gesichtspunkten ein Nachteil ist. Außerdem sind die eingesetzten Stoffe oftmals umweltschädlich, weshalb das den Betrieb verlassende Kühlwasser zusätzlich gereinigt werden sollte. Aus diesen Gründen werden vermehrt alternative Prozesse entwickelt und eingesetzt, um den Verbrauch von Chemikalien zu reduzieren. Einige Beispiele sind hier genannt (basierend u.a. auf ^[137]):

- UV-Desinfektion zur Entfernung von Bakterien
- (Membran-)Filtration zur Abtrennung von Feststoffen
- Entsalzung und physikalische Konditionierung des Wassers
- Vor-Ort-Generierung von Bioziden
- Elektrodeposition zur gezielten Entfernung von Ionen □

FALLSTUDIE: Zinkgewinnung/Zinkauswaschung in Indien

Anwendung von pH-Sonden und modularem Mehrkanalmessgerät zur pH-Regelung

Hintergrund

Hindustan Zinc Ltd ist ein bedeutender indischer Bergbau- und Rohstoffproduzent mit einem Jahresumsatz von rund 250 Millionen Euro und etwa 6.800 Beschäftigten. Die Hauptprodukte sind Zink, Blei, Silber und Cadmium. Am Standort Chittorgarh/Rajasthan sollte der Zinkgewinnungsprozess mit robuster Messtechnik weiter optimiert und automatisiert werden.

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Wasser wird als Lösungsmittel bei der Extraktion von Zink aus Zink-Calcit verwendet. Um das Zink aus dem Zinkoxid herauszulösen, hat das Prozesswasser in der ersten Verfahrensstufe einen neutralen oder leicht sauren pH-Wert. Dieser muss mit Zugabe von Schwefelsäure angepasst und während des Prozesses aufrechterhalten werden. In einem weiteren Verfahrensschritt wird das Prozesswasser wieder zu einer stark sauren Lösung angereichert, um das restliche Zink aus Zinkoxid und Zinkeisen zu gewinnen. Das Ergebnis dieses Prozesses ist ein Feststoff und eine Flüssigkeit; die Flüssigkeit enthält das Zink und wird als Produkt der Auswaschung bezeichnet; der Feststoff wird als Rückstand bezeichnet, der allerdings Edelmetalle (normalerweise Blei und Silber) enthält, die als Nebenprodukte verkauft werden. Am Ende des Prozesses muss das Prozesswasser gereinigt und neutralisiert werden. Aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung belastete das Prozesswasser die bisherigen elektrochemischen pH-Sensoren, was wiederum die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit der Messwerte reduzierte. Es wurde deshalb eine Kombination aus geeigneter robuster Messtechnik, automatisierter Probenahme und Sensorreinigung sowie integrierter pH-Regelung gesucht.



Abbildung 1:
pH- und Redox-
Sensoren
JUMO tecLine HD



Abbildung 2:
modulares Mehrkanal-
messgerät mit inte-
griertem Regler und
Bildschirmschreiber
JUMO AQUIS touch S

Lösungsansatz

Bei der Zinkgewinnung misst und regelt der Kunde den pH-Wert des Prozesswassers. Um diesen Vorgang zu optimieren und zu automatisieren, hat Jumo vorgeschlagen eine Kombination zweier Produkte jeweils in zweifacher Ausführung zu installieren: Die pH- und Redox-Einstabmesskette JUMO tecLine HD mit HD-Elektroden und das modulare Mehrkanalmessgerät für die Flüssigkeitsanalyse mit integriertem Regler und Bildschirmschreiber JUMO AQUIS touch S.

Ergebnisse

Die pH- und Redox-Einstabmesskette JUMO tecLine HD wurden in einer Bypass-Leitung installiert, wo Proben des Prozesswassers gemessen werden. Das kombinierte System besteht aus pH-Sensor, Sendegerät, Füllstandsensor, Reinigungssystem und Ventilen

für die Dosierung von Säure und Wasser und wurde auf den Kunden speziell abgestimmt. Mit dieser Kombination können das Messen und die gesamte Prozessoptimierung und -Automatisierung in einem einzigen Steuergerät ausgeführt werden. Der Einsatz von Prozesswasser und Schwefelsäure konnte insgesamt maßgeblich reduziert werden, mit Zielwerten zwischen mind. 8 bis max. 15 % Einsparung. Der Kunde ist mit der installierten Lösung durch JUMO vollauf zufrieden.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Die installierte Messtechnik bietet durch die selbständige Systemprogrammierung maximale Flexibilität, wodurch ein optimierter Betrieb der Prozessabläufe erreicht wurde. Durch die hohe Verfügbarkeit von Ersatzteilen vor Ort werden außerdem die Servicekosten reduziert. □

7

TEXTIL-

UND LEDER-

INDUSTRIE



Länderspezifische Informationen

Indien

Die Textilindustrie ist ein wichtiger Industriezweig des Landes und trägt ca. 61 Mrd. USD zum nationalen BIP bei (2,3 %). Die bedeutendsten Zentren der Textilherstellung liegen in Tamil Nadu, Gujarat, Maharashtra und Rajasthan. Die Unterstützung durch die indische Regierung in Form von Exportförderungsmaßnahmen und die Zulassung von 100 % ausländischen Investitionen haben in den letzten Jahren zu einem Investitionsschub in der Branche geführt ^[138].

Die indische Textilindustrie deckt eine breite Vielfalt von Unternehmensgrößen ab, von traditionellen Kleinbetrieben bis hin zu den kapitalintensiven Fabriken multinationaler Konzerne (z.B. Arvind, Vardhman Textiles, Welspun India). Die Kleinst- und Kleinunternehmen sind dabei in der Überzahl. Die gesamte Wertschöpfungskette von der Rohstoffverarbeitung bis hin zur Bekleidungsherstellung ist dabei vertreten. Als Ausgangsstoffe dienen synthetische Fasern, z.B. Polyester, Viskose und Nylon, aber auch Naturfasern. Indien ist mit 33,7 Mio. Ballen Jahresproduktion der größte Baumwollproduzent weltweit und mit 18 % Anteil an der globalen Seidenproduktion der zweitgrößte Seidenhersteller. Garnspinnereien, Webereien und Strickereien bilden den stärksten Zweig der Textilindustrien in Indien. In der Textilveredelung ist eine Vielzahl kleiner und mittelständischer Färbereien und Druckereien aktiv. Abgeschlossen wird die Wertschöpfungskette durch – meist industriell geprägte – Nähereien. Speziell die Unterbranchen der Textilveredelung, Färbereien und Bleichereien wurden vom Central Pollution Control Board als hochgradig umweltschädlich eingestuft und werden daher intensiv auf Wasserverschmutzungen hin überwacht.

Für Betriebe mit einem Abwasseraufkommen über 25 m³/Tag ist zudem ein ZLD-Ansatz vorgeschrieben ^[139, 140]. Viele Unternehmen stellt das vor große Herausforderungen, da oft einfachste Abwasserbehandlungsanlagen (z.B. Sedimentationsbecken, Neutralisation) nicht vorhanden sind, falsch dimensioniert sind oder schlecht gewartet und betrieben werden.

Die indische Lederindustrie trägt als zweitgrößter Produzent ca. 13 % zur globalen Produktion von Leder und Lederwaren dabei. Eine wichtige Grundlage dafür bildet die Verfügbarkeit des entsprechenden Rohstoffs – Indien besitzt 20 % des globalen Rinder- und 11 % des sonstigen Viehbestandes und stellt in seinen Gerbereien jährlich 280 Mio. m² Leder her. Ein Großteil der Lederproduktion ist in den Bundesstaaten Tamil Nadu, Westbengal und Uttar Pradesh angesiedelt. In diesen, aber auch in anderen vielversprechenden Regionen fördert die Regierung zurzeit die Entwicklung von „Mega Leather Clusters“. Dabei handelt es sich um spezialisierte Industrieparks, die durch optimale Infrastrukturanbindung die Effizienz des Sektors erhöhen und den Umweltschutz verbessern sollen. Ein Fokus liegt dabei auch auf der Errichtung gemeinsamer

industrieller Abwasserbehandlungsanlagen, da Gerbereien zu den stärksten Wasserverschmutzern Indiens zählen und Gerbereiabwasser kürzlich als hochgradig umweltverschmutzend eingestuft wurde ^[140, 141].

MENA

Die Textilindustrie der MENA-Region ist sehr stark exportgeprägt, mit den USA und Europa als wichtigsten Absatzmärkten. Während sich viele Länder traditionell auf die Produktion von Rohstoffen und Ausgangsmaterialien konzentriert haben, werden heute zunehmend vollständige Wertschöpfungsketten erschlossen. In vielen Fällen versuchen die Regierungen, die Branche durch gezielte Fördermaßnahmen zu unterstützen. Dazu zählt neben dem Abschluss von Handelsabkommen auch finanzielle Unterstützung beim Aufbau neuer Produktionsstandorte (z.B. Ägypten) und bei der Weiterbildung von Fachkräften (z.B. Marokko) ^[142, 143].

In Ägypten spielt die Textilindustrie eine wichtige Rolle, denn sie trägt ca. 3 % zum BIP des Landes bei. Eine wichtige Grundlage hierfür bildet die Verfügbarkeit des Rohstoffs Baumwolle, während Kunstfasern üblicherweise importiert werden. Die weitere Wertschöpfungskette umfasst Spinnereien, Webereien und die Textilveredelung und wird von Unternehmen des öffentlichen Sektors dominiert. Nähereien befinden sich hingegen zu 90 % in privater Hand, hier sind z.B. die Oriental Weavers als einer der größten Teppichproduzenten weltweit und die Firma Yesim als Produzent für Marken wie Nike zu nennen ^[142, 144]. Die marokkanische Textilindustrie erlebt einen Aufschwung, seit Wertschöpfungsketten über die Bereitstellung von Rohstoffen (Baumwolle, Garn) hinaus erschlossen werden. Diese Entwicklung soll durch gezielte Förderung weiter gestärkt werden, mit dem Ziel, den Anteil am nationalen BIP weiter zu erhöhen (derzeit 8 %) und mehr Arbeitsplätze zu schaffen ^[143, 145]. Im Vergleich dazu ist die Textilindustrie in Tunesien und Jordanien weniger robust. Ausländische Unternehmen stellen den Großteil der Investitionen in dieser Branche, aber wirtschaftliche Unsicherheiten schwächen die internationale Wettbewerbsfähigkeit der beiden Länder. Eine mögliche Perspektive stellt v.a. in Tunesien eine Fokussierung auf wertschöpfungsintensivere Untersektoren dar, wie z.B. technische Textilien ^[146, 147].

Die Lederherstellung und -verarbeitung ist in vielen MENA-Ländern traditionell verankert, spielt aber in der heutigen Wirtschaft meist eine untergeordnete Rolle. Ebenso wie in der Textilbranche wird hier vielerorts mit staatlichen Maßnahmen versucht, die Wettbewerbsfähigkeit und Attraktivität für ausländische Investoren zu erhöhen.

Dazu zählt auch die Förderung neuer Produktionsstandorte mit moderner Infrastruktur, um die v.a. von Gerbereien ausgehende Wasserverschmutzung zu reduzieren und internationalen Standards zu genügen ^[148, 149, 150].

Branchen und Abwasseranfall

Textilindustrie

In der Textilindustrie werden aus Rohfasern Flachgewebe hergestellt und diese zu Textilien verarbeitet. Die Textilindustrie ist die wichtigste Vorstufe der Bekleidungsindustrie, es werden aber auch technische oder medizinische Textilien produziert. Wasser wird in der Textilindustrie einerseits in großen Mengen als Lösemittel für chemische Farb- und Hilfsstoffe eingesetzt, und andererseits zum Auswaschen überschüssiger Chemikalien verwendet. Die wichtigsten Verfahrensschritte der Textilindustrie sind die folgenden ^[151]:

- **Spinnen**
Herstellung von Garn aus natürlichen Rohfasern (z.B. Tierwolle, Baumwolle) oder Synthetikfasern (z.B. Polyester, Polyamid, Polypropylen)
- **Gewebeherstellung**
Herstellung von Flächengebilden, meist durch Weben, maschenbildende Verfahren oder Flechten von Garn
- **Veredelung**
Veredelungsprozesse können bei Fasern, Garnen, Flächengebilden oder bei fertig konfektionierter Ware durchgeführt werden. Hierzu zählen Vorbehandlung (einschließlich Entschlichten, Bleichen, Mercerisieren), Färbung, Ausrüstung (z.B. Knitterfreiausrüstung, flammhemmende Ausrüstung), Drucken und Beschichtung.

Lederindustrie

Die Lederindustrie umfasst die Umgestaltung und Veränderung von Tierhäuten zu vielseitig nutzbarem, dauerhaft haltbarem Leder. Die wichtigsten Fertigungsschritte der Lederherstellung sind ^[152]:

- Wasserwerkstatt: Vorbereitung der Häute durch Weichen, Äschern (Enthaaren) und Entfleischen
- Gerberei mit allen dazugehörigen Zwischenschritten
- Nasszurichtung und Färberei: Neutralisieren und Fetten, sowie Färben und Trocknen der Leder
- Vor- und Endzurichtung: Stollen, Schleifen, Prägen und Walken von Ledern
- Herstellung von Lederwaren: Weiterverarbeitung des Materials, wie zu Schuhen und anderen Lederwaren

Die Lederindustrie ist eine sehr wasser- und abwasserintensive Branche, da Wasser als wichtigstes Löse- und Transportmittel eingesetzt wird. So fallen bei der Verarbeitung von 1 t Tierhäuten ca. 600 kg feste Abfälle und 15–50 m³ Abwasser an. Etwa 500 kg Chemikalien werden zur Verarbeitung eingesetzt, wovon 85 % wieder mit dem Abwasser ausgespült werden. Der mit Abstand größte Anteil des Abwassers fällt in der Wasserwerkstatt beim Weichen, Äschern und Gerben an. Die Vor- und Endzurichtung und Weiterverarbeitung zu Lederwaren ist hingegen deutlich weniger umweltrelevant ^[153, 154].

Abwasser der Textilindustrie

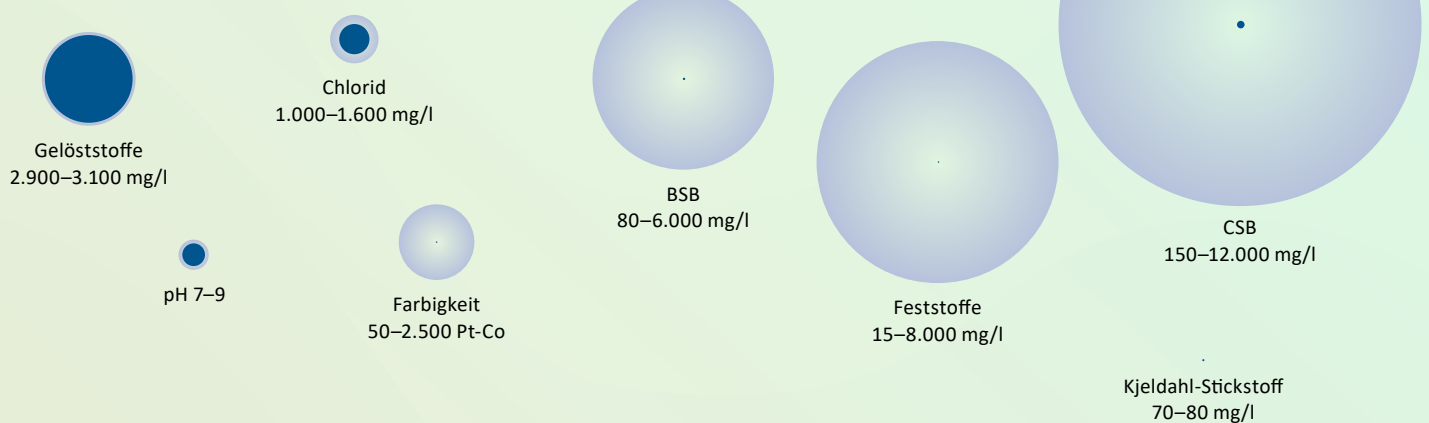


Abbildung 1: Typische Konzentrationen von Verunreinigungen im Abwasser der Textilindustrie ^[155]

Abwasserströme und -eigenschaften

Spinnen und Gewebeherstellung

Abwässer der Textilindustrie können alle chemischen Stoffe enthalten, die entlang der Herstellungskette vorkommen. In der Vorwäsche von Spinnereien werden oft Verunreinigungen von Rohfasern in das Abwasser eingetragen, wie etwa Pestizidrückstände von Naturfasern. Die Garne werden vor der Gewebeherstellung geschlichtet (d.h. imprägniert) und danach wieder entschlichtet. Das Abwasser der Entschlichtung enthält dementsprechend sowohl die Schlichtemittel (z.B. Stärke, Stärkeether, Alkohole oder Polyvinylalkohol) als auch Hilfsstoffe der Entschlichtung (z.B. Säure oder Oxidationsmittel) ^[22].

Textilveredelung

Die wichtigsten Abwasserströme in Veredelungsbetrieben sind die Abwässer aus Vorbehandlung und Färbung und aus der Ausrüstung, die je nach Veredelungsart und Faserart folgende Verunreinigungen enthalten können (Abbildung 1):

- Farbstoffe
- Ausrüstungschemikalien (z.B. Weichgriffmittel, Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS), Flammenschutzmittel)
- Chemische Hilfsstoffe für die Vorbehandlung, Färberei und Ausrüstung (z.B. Tenside, Komplexbildner, Reduktions- und Oxidationsmittel)
- Säuren, Basen und Neutralsalze

Verfahrensstufe	Arbeitsschritte	Abwasser
Weichen und Entfleischen	Einweichen von (ggf. konservierten) Häuten unter Einsatz von Hilfsstoffen, anschließend mechanisches Entfleischen	- BSB, CSB und Feststoffe tierischen Ursprungs - Salze - Organischer Stickstoff - Hilfsstoffe
Äschern und Enthaaaren	Quellung und Aufschluss der Häute unter alkalischen Bedingungen zur Ablösung der Haare	- Kalk und Alkalien - Sulfide - Organischer Stickstoff (Ammonium) - BSB, CSB und Feststoffe tierischen Ursprungs
Entkalken und Beizen	Entfernen der Rückstände vom Äschern, anschließend Vorbereitung der Haut auf die Aufnahme des Gerbstoffes durch Zugabe von Enzymen und ggf. Säure	- Ammonium - Sulfide - Calciumsalze - BSB, CSB und Feststoffe tierischen Ursprungs
Gerben und Nachgerben	Umwandlung der Kollagen- in Lederfasern und Konservierung der Häute durch Einbindung von Gerbstoffen, ggf. Nachgerben nach Neutralisation	- Gerbstoffe, z.B. Chrom (III) - Säuren - Komplexbildner - Hilfsstoffe
Färben	Durchfärben des Leders und Fixieren des Farbstoffs, anschließend ggf. zusätzliche Pigmentierung oder Beschichtung	- Farbstoffe - Organische Lösemittel - Organisch gebundene Halogene (AOX)

Tabelle 1: Arbeitsschritte und typische Abwasser-Verunreinigungen der umweltrelevantesten Verfahrensstufen in der Lederindustrie ^[157]

Neben anderen Prozessschritten mit hoher CSB-Belastung wie z.B. Entschlichten werden beim Bleichen nicht nur Rückstände von Oxidationsmitteln, sondern auch etwaige Reaktionsprodukte und Hilfsstoffe in das Abwasser eingetragen. Wird Natriumhypochlorit (NaClO) eingesetzt, bilden sich oft organische Halogenverbindungen, z.B. Trichlormethan. Beim Bleichen mit Wasserstoffperoxid sind eher die Hilfsstoffe problematisch, wie die zur Stabilisierung eingesetzten Komplexbildner.

Die Zusammensetzung von Färbereiabwässern hängt stark von den jeweiligen Fasern und Farbtönen ab. Wegen der jeweils eingesetzten Metallkomplexfarbstoffe sind typische Verunreinigungen beispielsweise Kupfer beim Färben dunkler Farbtöne oder Chrom (III) beim Färben von Polyamid und Wolle. Eine wichtige Stickstoffquelle im Abwasser kann Harnstoff sein, der zum Druck von Cellulose mit Reaktivfarbstoffen

eingesetzt wird. In der Ausrüstung kommen häufig fluororganische, niedrigmolekulare Verbindungen und Flammschutzmittel zum Einsatz ^[153, 22].

Wasserwerkstatt

75 % des BSB und CSB der Lederherstellung stammen aus der Wasserwerkstatt (Tabelle 1, Tabelle 2). Beim Weichen und Äschern fallen v.a. Abwässer mit organischen Rückständen an, z.B. Blut- und Gewebereste oder lösliche Eiweißstoffe. Abgelöste Haare und andere Feststoffe stellen hier eine sehr relevante Abwasserbelastung dar. Als Hilfsstoffe zum Enthaaren kommen häufig Kalk, Ammonium und gelöste Hydrogensulfide zum Einsatz, die ebenfalls ins Abwasser eingetragen werden und dort zu pH-Werten von 12 und höher führen. Zusätzlich kann das Abwasser Hilfsstoffe enthalten, wie etwa Konservierungsmittel (meist Natriumchlorid), Tenside, Enzyme oder Biozide ^[22, 156].

Verfahrensstufe	pH-Wert [-]	CSB [mg/l]	Organischer Stickstoff [mg/l]	Ammonium- Stickstoff [mg/l]	Sulfid [mg/l]	Chrom [mg/l]
Weichen und Entfleischen	7–13	2.500–100.000	200–5.000	20–300	1.200–4.000	
Äschern und Enthaaren	12–13	17.000–100.000	2.000–5.000	100–300	1.200–4.000	
Entkalken und Beizen	7–9	1.000–17.000	300–900	30–7.000	<300	
Gerben und Nachgerben	3–4	3.000–12.000	ca. 200	<300		300–4.000
Färben	3,5–5	8.000–70.000	ca. 200	100–900		10–500

Tabelle 2: Typische Konzentrationen von Verunreinigungen im Abwasser der Lederindustrie ^[154]

Ledergerberei

Durch den Einsatz mineralischer, synthetischer oder pflanzlicher Gerbstoffe wird schließlich die Lederherstellung abgeschlossen und das Material stabilisiert. 80–90 % der Gerbereien weltweit nutzen Chrom (III)-Salze zum Gerben, da sie gut verfügbar sind und eine hohe Lederqualität erzeugen. In diesen Fällen sind die Abwässer der Gerberei, aber auch vieler nachgelagerter Verfahrensschritte, oft stark chrombelastet. Ein alternativer Gerbstoff, v.a. in der Möbel- und Autolederherstellung, sind die giftigen und umweltgefährlichen Glutaraldehyde. Zusätzlich zu den Gerbstoffen enthalten Gerbereiabwässer oft Lederfasern, anorganische Salze und Fette ^[157, 22].

Aufbereitungsverfahren

Verfahrenswahl und -stufen

Die Abwässer aus der Textil- und Lederindustrie weisen je nach Industriezweig, Verfahrensstufe und konkretem Produkt sehr unterschiedliche Eigenschaften auf. Die wichtigsten Ziele der Abwasserreinigung sind die folgenden:

- Abtrennung von suspendierten Feststoffen
- Reduktion der organischen Belastung (BSB und CSB) sowie Stickstoff und Phosphor
- Entfernung von hochkonzentrierten Hilfschemikalien
- Entfärbung
- Neutralisation

Besonders das Abwasser beispielsweise aus der Wasserwerkstatt bei der Lederverarbeitung benötigt oft eine separate Vorbehandlung zur Abtrennung von Feststoffen. Dazu werden je nach Anwendungsfall sowohl Sedimentations-, als auch Filtrations- oder Flotationstechnologien eingesetzt. Dadurch können die Effizienz und der störungsfreie Betrieb der nachgelagerten Abwasseraufbereitung gewährleistet werden. Die zentrale Stufe der Abwasseraufbereitung ist sowohl in der Textil- als auch in der Lederindustrie üblicherweise eine biologische Reinigung, in der die BSB- und CSB-Frachten, sowie

viele organische und anorganische Verunreinigungen gut abgebaut werden. In der Lederindustrie werden insbesondere aerobe Verfahren zur biologischen Stickstoffelimination eingesetzt, z.B. eine vor- oder nachgeschaltete intermittierende Denitrifikation. Die Entfernung persistenter (Hilfs-)Stoffe erfolgt im Vollstrom oder in einzelnen Teilströmen durch weitergehende physikalisch-chemische Verfahren wie durch Fällung, Adsorption, Oxidation oder Reduktion ^[158, 159].

Beispiel Entfärbung

Sowohl in der Textil- als auch in der Lederherstellung spielen Färbeprozesse eine wichtige Rolle. Einige dispergierte oder hochmolekulare Farbstoffe werden in der biologischen Reinigungsstufe am Belebtschlamm adsorbiert, ein aerober biologischer Abbau findet hingegen nicht oder nur sehr langsam statt. Dies macht eine gezielte Entfärbung des Abwassers nötig. Zur Entfärbung stehen folgende Ansätze zur Verfügung ^[22, 160]:

Reduktion

Reduktive Spaltung von Azofarbstoffen mit Eisen (II)-Salz im alkalischen Milieu (eingestellt durch Kalkmilch), üblicherweise vor der biologischen Aufbereitung.

Adsorption

Eine Entfärbung um 80 % und mehr kann durch Adsorption an granulierter Aktivkohle in Festbettfiltern erreicht werden. Der Einsatz von Pulveraktivkohle erhöht die Prozessflexibilität.

Fällung

Anionische Farbstoffe oder Hydrolysate lassen sich durch den Einsatz organischer, kationischer Polymere entfernen. Bei leicht alkalischem pH-Wert lässt sich – je nach Farbstoff – eine ca. 90 %ige Entfärbung erreichen.

Membranfiltration

Viele hochmolekulare Farbstoffe lassen sich durch Ultra- oder Nanofiltration gut zurückhalten. Angesichts der hohen Kosten ist dieser Ansatz aber nur bei Nutzung weiterer Synergien, wie z.B. Feststoffrückhalt oder Wasserrecycling, interessant.



Chrom (III)-Entfernung

Werden Chrom (III)-Salze als Gerbstoff in der Lederherstellung eingesetzt, können Chrom-Konzentrationen von bis zu 4 g/l im Prozessabwasser auftreten. Verfahrensseitig lässt sich der Chromaustrag durch die Substitution mit alternativen Gerbstoffen oder eine verbesserte Prozesseffizienz verringern. Abwasserseitig wird Chrom zu einem nennenswerten Anteil in der biologischen Reinigung entfernt. Chrom wird hier durch Adsorption im Schlamm gebunden und schließlich mit dem Klärschlamm zusammen (ggf. als Sonderabfall) entsorgt.

In einigen Fällen kann zusätzlich eine gezielte Vorbehandlung nötig sein, um die Chromfrachten im Abwasser zu reduzieren. Dies geschieht üblicherweise in möglichst konzentrierten Abwasserteilströmen durch die Fällung mit Magnesiumoxid, Kalkhydrat und/oder Aluminiumchlorid. Unter günstigen Umständen kann der Fällschlamm anschließend mit Schwefelsäure wieder gelöst und nach Zugabe nötiger Hilfsstoffe erneut zur Chromgerbung verwendet werden ^[22, 161].

Schwefelwasserstoff

Schwefelwasserstoff ist ein farbloses, korrosives, leicht entzündliches und hochgiftiges Gas, dem in der Behandlung sulfidhaltiger Abwässer eine besondere Beachtung zukommt. Tierische Eiweißverbindungen, wie sie insbesondere in Abwässern der Wasserwerkstatt vorkommen, zersetzen sich rasch zu gelöstem H_2S bzw. in saurem Milieu zu gasförmigem Schwefelwasserstoff.

Der Bildung von Schwefelwasserstoff kann vorgebeugt werden, indem die Sulfideinträge ins Abwasser minimiert werden und eine Vermischung saurer (z.B. aus der Gerbung) und sulfidhaltiger (v.a. aus dem Äscher) Wasserströme in der innerbetrieblichen Kanalisation verhindert wird. Als beste verfügbare Technologie zählt weiterhin die Entfernung von Schwefelverbindungen aus Abwasserteilströmen vor der biologischen Reinigung, z.B. durch die Fällung mit Eisensalzen oder die katalytische Oxidation mit Mangansalzen. In der Biologie wird gelöstes Hydrogensulfid schließlich vollständig zu Sulfat oxidiert oder in elementaren Schwefel überführt. Wichtig sind in jedem Fall eine zuverlässige Kapselung aller möglichen Emissionsquellen und eine zuverlässige Abluftabsaugung und -behandlung ^[157, 162]. □

FALLSTUDIE: Textilindustrie in Indien

Der weltweit größte industrielle Solartrockner

Hintergrund

Der indische Textilverband NTIEM mit ca. 120 Mitgliedsunternehmen und einer jährlichen Stoffproduktion von ca. 2.800 Mio. Metern beschloss die gemeinschaftliche Abwasserbehandlungsanlage mit einer früheren Einleitgenehmigung von 40 m³/Tag auf eine maximale Auslegungskapazität von 450 m³/Tag zu erweitern. Das gesamte Klärschlammaufkommen der Anlage an entwässertem Schlamm betrug 160 t/Tag im Jahr 2017. Neben der Reduktion von Abfallmasse und Entsorgungskosten war die Erzeugung eines CO₂-neutralen Ersatzbrennstoffs zur industriellen Nutzung vorgesehen.

Anfänglich war ein Niedrigtemperatur-Netzbandtrockner für die Trocknung des Primärschlammes und eine Lagerhalle für den Sekundärschlamm (Überschussschlamm) geplant. Hierzu sollte der Schlamm in einer Halle mit 12.000 m² Grundfläche zwischengelagert, das Sickerwasser zur Behandlung in die Anlage zurückgeführt und der Schlamm anschließend auf einer Deponie entsorgt werden.

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Die Stahlbetonbauarbeiten für die Lagerhalle waren bereits abgeschlossen, als die Entscheidung für das solare Trocknungssystem von Zizmann fiel. Die Entwässerungsstrecke befand sich seitlich neben der Halle, die Schlammbeschickung erfolgte durch Radlader und Arbeitskräfte. Der angestrebte Trockensubstanzgehalt von 25 % war mit den Entwässerungsaggregaten nicht konstant erreichbar. Mechanische Einflüsse durch Schaufelvorgänge, Beladen von Transportfahrzeugen durch Radlader und Abkippen an der Trocknung führten zu einer Verschlechterung der Schlammqualität. Es bestand zusätzlich ein erhöhtes Risiko bezüglich Geruchsbelastungen, hervorgerufen durch flüchtige chemische und biologische Verbindungen. Die Beeinträchtigung der Trocknungsleistung

durch die hohe Luftfeuchtigkeit während des Monsuns war ebenfalls ein großes Problem, welches berücksichtigt werden musste.

Für ein solch großes Projekt war eine wirtschaftliche und bewährte Technologie erforderlich. Die Kombination aus solarer Trocknungstechnologie von Zizmann sowie Produktion und Montage durch einen lokalen Partner erfüllte alle Anforderungen des Kunden. Aufgrund früherer Erfahrungen mit der Staubentwicklung während des Trocknungsprozesses bis zu einem Trockensubstanzgehalt von 90 % Trockenrückstand (TR) wurde eine Klärschlamm-trocknungstechnologie gefordert, die auch den Anforderungen des Gesundheitsschutzes gerecht wird.

Lösungsansatz

Aufgrund der mechanischen Flexibilität ließ sich das System leicht an die bestehenden Gegebenheiten anpassen (Abbildung 1). Mit Streifenfundamenten als Laufflächen für die Zizmann-Trocknungsanlage konnte auf die Demontage der bereits vorhandenen Betonkonstruktion verzichtet werden. Die ursprüngliche Gebäudehöhe der Schlamm-lagerhalle verringerte sich um mehr als fünf Meter, was die geplanten Kosten für die Hallenkonstruktion deutlich reduzierte und einen Teil der Kosten für das Trocknungssystem andererseits deckte.

Zizmann-Trockner sind konzipiert als endloser Kettenförderer, im vorliegenden Projekt angetrieben mit einem 4kW starken Siemens Getriebemotor, vgl. Kettenräumer Nachklärbecken. Aufgrund der Tatsache, dass die Trocknung nur an der Oberfläche in Kontakt mit Frischluft erfolgt, ist eine immer wiederkehrende Erzeugung neuer Verdunstungsflächen durch die Wendetechnik unerlässlich. Das bewährte System garantiert Wendintervalle von bis zu 60 Mal pro Stunde für eine staubfreie Schlammbewegung. Der konstante Luftaustausch mit angepassten

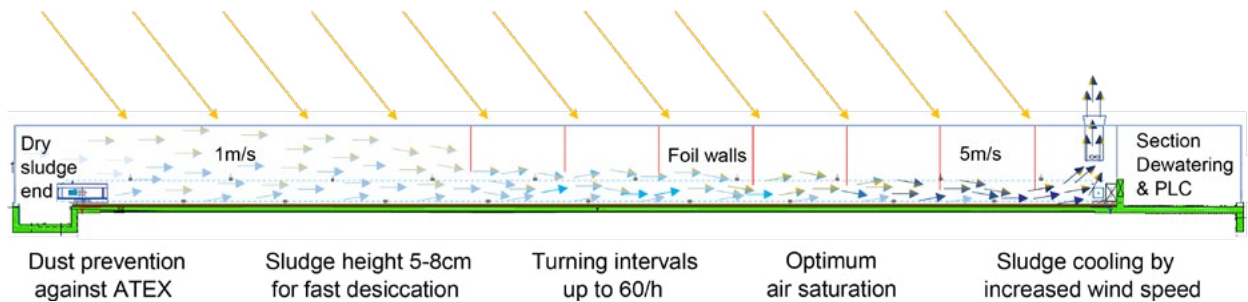


Abbildung 1: Schematische Darstellung der solaren Schlamm-trocknung

Strömungsgeschwindigkeiten gewährleistet eine ATEX-freie Trocknung im Austragsbereich bei 1 m/s, sowie eine schnelle Oberflächentrocknung im feuchten Schlamm-eintragsbereich bei 5 m/s verbunden mit einer Verdunstungskühlung an der Schlammoberfläche, welche das Risiko von Geruchsneubildung im Feuchtschlamm-bereich reduziert (Wind-Chill-Effekt).

Mit dem Ziel durch die Trocknung auf 90 % TR einen hochwertigen CO₂-neutralen Ersatzbrennstoff mit einem Heizwert von Ø 12MJ/kg zu erzeugen, wurden kostengünstigere Verwertungsmöglichkeiten in der Zementindustrie betrachtet, anstatt weiterhin auf Deponien zu entsorgen.

Während der Monsunzeit wird der Schlamm nun zwischengelagert und zeitversetzt der Trocknung zugeführt. Bei den Rohbauarbeiten wurde die Möglichkeit einer späteren Optimierung bereits mitgedacht, sodass nun bei Bedarf eine Zusatzheizung nachgerüstet werden kann. Mit dieser würde das saisonale Schlammhandling hinfällig.

Ergebnisse

Trotz Schwankungen des TR-Gehalts bei der Entwässerung liegt die Schlamm-eintragsmenge statt bei geplanten 30.000 t/Jahr bei 35.000 t/Jahr und damit um +15 % höher als erwartet. Teilweise wurden Trockensubstanzgehalte von bis zu 93,5 % im Sommer erreicht. Die Wasserverdunstung beläuft sich durchschnittlich auf 27.200 t/Jahr, sodass nun lediglich 7.800 t/Jahr Trockenklärschlamm als Ersatzbrennstoff in der Zementindustrie verwertet werden.

Ursprünglich nur für die Behandlung von Sekundärschlamm konzipiert, wird die Trocknungsanlage aufgrund ihrer Betriebsvorteile und stabilen Leistung nun mit einer Mischung aus Primär- und Sekundärschlamm beschickt.

Elf unabhängige Trocknungslinien wurden installiert. Am Ende der Halle sorgt ein automatisches

Austragssystem mit Band- und Steigförderer dafür den Schlamm in ein Silo zu befördern, um ihn dort bis zum Abtransport zu lagern. Bei der Inbetriebnahme der Anlage hat der Kunde Maßnahmen ergriffen, um die Entwässerungsmaschinen auf die Eintragsseite der Halle zu verlagern, um die Arbeitsschritte und somit die mechanischen Einflüsse auf Schlammqualität zu reduzieren, einen 24/7-Betrieb zu ermöglichen und dadurch die Trocknungsleistung zu steigern.

Mit automatischem Eintrags- und Austragssystem liegt der Arbeitsaufwand für Sichtkontrollen und Wartungsarbeiten bei täglich 0,5 Stunden pro Linie. Die Antriebe der Wende- und Lüftungstechnik befinden sich jeweils an den Enden der Trocknungshalle, sodass Wartungen der Technik recht einfach und ohne Durchqueren der gesamten Halle möglich sind.

Durch die Reduzierung der zu entsorgenden Masse auf lediglich ca. 22 % der ursprünglich entwässerten Klärschlamm-menge wurden entsprechend der Fahrzeugverkehr und die damit verbundenen Emissionen sowie der Kraftstoffbedarf minimiert. Eine Kooperation mit einem lokalen Zementwerk trägt ebenfalls dazu bei, die Entsorgungskosten deutlich zu reduzieren, sodass die Kosteneinsparung durch die Verwertung von Trockenschlamm auf ca. 25–30 % beziffert wird.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Dank der Systemflexibilität stellt diese solare Klärschlamm-trocknung vergleichsweise geringe Anforderungen an die räumlichen Gegebenheiten der Trocknungshallen. Die automatische Wendetechnologie ermöglicht einen weitestgehend staub- und geruchsfreien Betrieb mit minimalem Betriebs- und Wartungsaufwand. Dabei wird eine bis zu 15–20 % höhere Trocknungsleistung erreicht, und in diesem Fall ohne die Notwendigkeit einer Behandlung des verdunsteten Wassers bzw. der Luft. □

8

PAPIER- UND

ZELLSTOFFINDUSTRIE



Länderspezifische Informationen

Indien

Die Papierindustrie Indiens spielt mit einer Jahresproduktion von ca. 15 Mio. t und einem Jahresumsatz von 9,62 Mrd. USD global eine eher untergeordnete Rolle. Die etwa 800 Produktionsstandorte im Land erzeugen im Wesentlichen Verpackungsmaterial (51 % der Produktion), Druck- und Schreibpapier (31 %) sowie Zeitungspapier (18 %) (Abbildung 1). Der Pro-Kopf-Papierverbrauch im Land ist im internationalen Vergleich niedrig – einhergehend mit steigendem Einkommensniveau, höherer Alphabetisierungsrate und wachsenden Zeitungsauflagen wird in den nächsten Jahren allerdings ein starker Anstieg erwartet ^[163, 164, 165].

Den wichtigsten Kostenpunkt in der Papierproduktion (etwa 50 % der Produktionskosten) stellt der benötigte Rohstoff dar. Von den 3,3 Mio. km² Landesfläche Indiens sind nur ca. 0,7 Mio. km² bewaldet, und angesichts strenger werdender Rodungsbeschränkungen ist Holz in Indien ein nur sehr

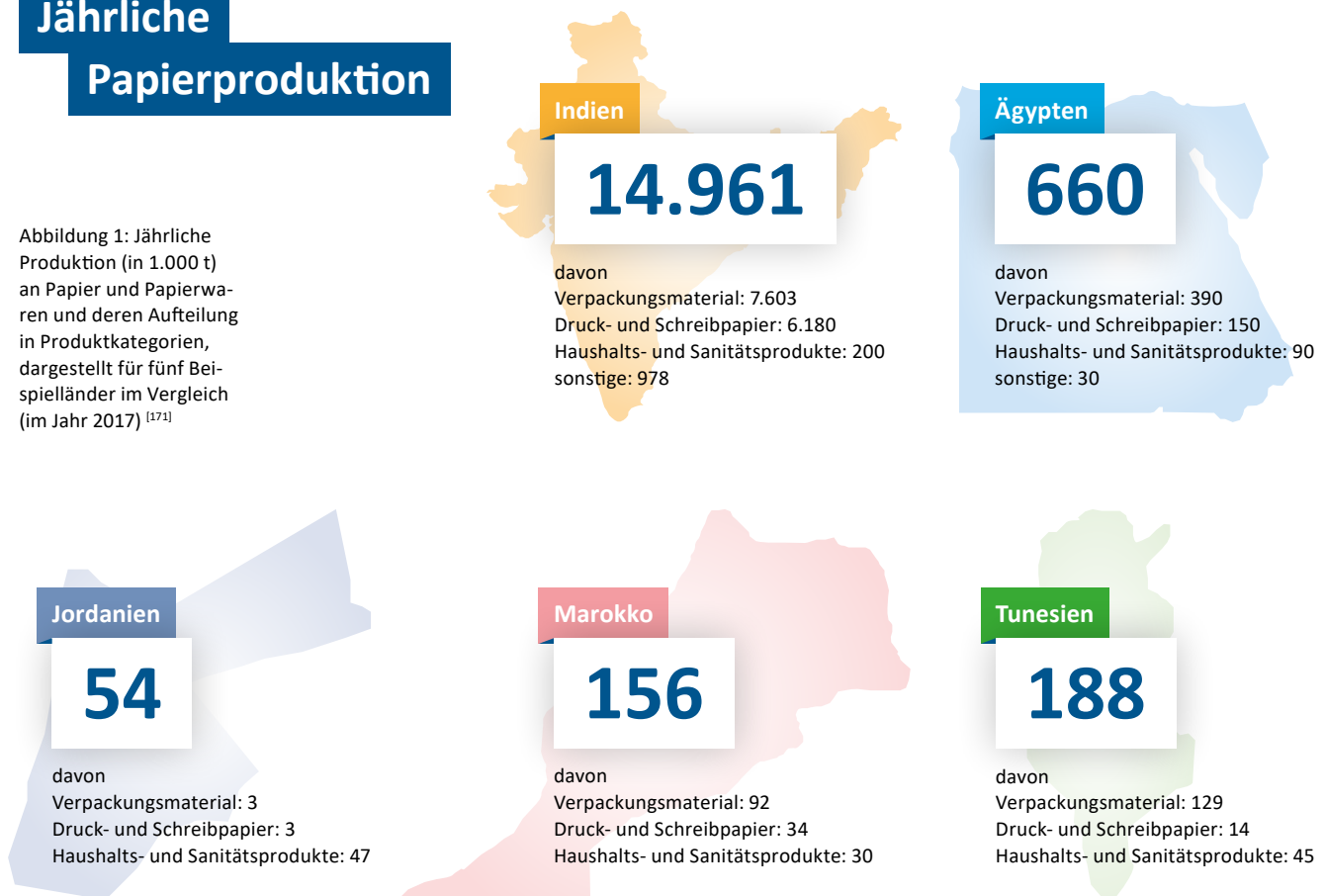
beschränkt verfügbarer Rohstoff. Die mangelnde Verfügbarkeit günstiger, geeigneter Rohstoffe und der Wettbewerb mit Importprodukten sind folglich eine große Herausforderung für die nationale Papierindustrie. Der Schwerpunkt verlagert sich deshalb zunehmend in Richtung alternativer Rohstoffe: 30–40 % des Papiers werden heute noch aus Holzfasern hergestellt, 50–60 % aus recyceltem Altpapier und 15–25 % aus landwirtschaftlichen Rückständen ^[163, 166, 167].

Die indische Papierindustrie wird von kleinen und mittelständischen Einheiten dominiert, in denen teilweise erheblicher Modernisierungsbedarf besteht, um den heutigen Maßstäben an Produktivität, Energieeffizienz und Umweltschutz zu genügen. Indiens Central Pollution Control Board hat die Papierherstellung als besonders umweltbelastenden Industriesektor klassifiziert und seit 2015 eine Reihe von Maßnahmen zum verbesserten industriellen Gewässerschutz erlassen. So müssen Papierfabriken etwa einen Umweltmanagementplan erarbeiten und eine sachgemäße Abwasserreinigung nachweisen. Speziell für Schwarzlauge gelten ZLD-Vorschriften zur abwasserfreien Entsorgung ^[164, 165]. Unsicherheiten bestehen allerdings noch in Bezug auf die technische Umsetzung und den Umgang mit anfallenden Konzentraten.



Jährliche Papierproduktion

Abbildung 1: Jährliche Produktion (in 1.000 t) an Papier und Papierwaren und deren Aufteilung in Produktkategorien, dargestellt für fünf Beispielländer im Vergleich (im Jahr 2017) ^[171]



MENA

Die Papierherstellung ist in der MENA-Region ein Nischenmarkt, und nahezu alle Länder sind Netto-Importeure von Fasern und Papierwaren ^[168, 169, 170]. Wichtigster Grund hierfür ist die begrenzte Rohstoffverfügbarkeit: Die Bewaldung liegt – je nach Land und Region – typischerweise im Bereich unter 5 %, sodass Holzfasern zur Papierproduktion importiert werden müssen. Einige Länder haben sich daher auf die Verarbeitung von alternativen Fasern konzentriert, etwa Bagasse und Reisstroh als viel verwendete Faserressource in Ägypten. Wichtigster Rohstoff zur Papierherstellung in der MENA-Region ist nach wie vor recyceltes Altpapier.

Ein Großteil der hergestellten Papierprodukte wird zu Verpackungszwecken eingesetzt, etwa als Kartonage oder Verpackungspapier (Abbildung 1) ^[171]. Die restliche Produktion entfällt je nach Land zu

unterschiedlichen Anteilen auf Schreib- und Druckpapier einerseits und Haushalts- und Sanitätsprodukte andererseits. Eine Ausnahme bildet hier Jordanien, wo die Herstellung von Haushalts- und Sanitätsprodukten in den vergangenen Jahren mit Abstand den größten Anteil an der Papierproduktion hatte.

Die regionale Papierindustrie ist allgemein geprägt von veralteten Produktionsstandorten und geringen Produktionsmengen. Speziell in Ägypten wird die Branche deutlich von staatlichen Unternehmen dominiert, die die vorhandenen Produktionskapazitäten nicht ausschöpfen. Zur Förderung des Industriezweigs wäre mittelfristig eine Verbesserung des Altpapierrecyclings nötig, um die Rohstoffverfügbarkeit vor Ort zu erhöhen. Perspektiven ergeben sich außerdem aus dem Fokus auf wertschöpfungsintensivere Aktivitäten und Investitionen in moderne Produktionstechnologien ^[170, 172].

Branche und Abwasseranfall

Zellstoffe werden aus cellulosehaltigen Materialien hergestellt – üblicherweise aus Holz oder anderen pflanzlichen Rohstoffen, z.B. Bagasse, Stroh oder Baumwollhalmen. Zunehmende Bedeutung in der Papierindustrie erlangt außerdem die Verarbeitung von Altpapier als Ausgangsmaterial. Die Zellstoffproduktion umfasst das mechanische Zerkleinern und den chemischen Aufschluss der Cellulosebegleitstoffe, z.B. Lignin und Hemicellulose. In 95 % der globalen Zellstoffherstellung wird der Aufschluss im Sulfatverfahren durch Kochen mit alkalischer Natriumsulfid-Lösung bei erhöhtem Druck realisiert. Der Zellstoff wird anschließend einer Wäsche und ggf. einer Bleiche unterworfen. Werden Altpapierfasern verwendet, entfällt der chemische Aufschluss. Das Altpapier wird nach Entfernung von papierfremden Bestandteilen in Trommeln desintegriert und anschließend werden die Altpapierfasern sortiert und fraktioniert. Bei der Herstellung grafischer Papiere ist eine Entfernung von Druckfarben durch Flotationsverfahren („Deinking“) oder Waschen (Wasch-„Deinking“) nötig. In Papierfabriken wird

der Faserstoff – ggf. unter Zugabe von Füllstoffen, Leim oder Pigmenten – zu Papier, Karton und Pappe weiterverarbeitet. Die Herstellung von Papierbahnen entsteht durch die Entwässerung des Papierstoffs in Papiermaschinensieben, Pressen und thermischen Trocknern ^[173, 174].

Wasser dient in der Zellstoff- und Papierproduktion als wichtigstes Löse- und Transportmittel, und wird außerdem zum Kühlen, zum Reinigen und zur Dampferzeugung eingesetzt. Stand der Technik ist heute eine weitestgehende Kreislaufführung von Prozesswässern – mit und ohne interne Kreislauffwasserreinigungsanlage – vor der Entsorgung. Der effektive Wasserverbrauch der gesamten Papierherstellung liegt im Bereich 0–100 m³ pro t Papier und wird maßgeblich beeinflusst durch Rohstoffqualität, Produktanforderungen und technische Randbedingungen (z.B. Korrosion, Aufkonzentration und Ausfällungen). Die Abwässer der Papierherstellung sind durch die häufige Kreislaufführung mit CSB-Frachten von >1.000–20.000 mg/l und hohen Mengen abfiltrierbarer Stoffe belastet (Tabelle 1). Besonders problematisch sind die Abwässer der vorgelagerten Zellstoffproduktion, die rund 50 % Reststoffe aus dem Zellstoffaufschluss mit sich führen. Sie unterscheiden sich daher grundsätzlich in Menge und Zusammensetzung von den Abwässern der Papierherstellung.

Prozess	Abwasserintensität [m ³ /t]	CSB [kg/t]	Abfiltrierbare Stoffe (AFS) [kg/t]	Phosphor [g/t]	Stickstoff [g/t]	AOX [kg/t]
Zellstoffherstellung (Sulfatverf.)	20–90	5–30	0,2–5	10–40	50–500	50–200
Zellstoffherstellung (Sulfitverf.)	20–80	20–70	0,5–6	10–200	100–2.000	0–400
Zellstoffherstellung (mechanisch)	10–20	1–15	0,1–1	2–10	40–200	0–5
Papieraufbereitung zum Recycling	1–30	0,5–4	0,1–2	1–20	10–200	0,3–1
Papierherstellung	3–20	0,2–2	0,02–1	0–10	0–100	n.a.
Herstellung von Spezialpapieren	10–50	0,5–7	0,1–2	0–60	0–500	n.a.

Tabelle 1: Typische Konzentrationen von Verunreinigungen im Abwasser der Zellstoff- und Papierindustrie ^[179], weitergehende Informationen in ^[22]

Die Kochlauge des chemischen Aufschlusses ist das am stärksten belastete Prozesswasser und wird normalerweise eingedampft und verbrannt. Außerdem entsteht belastetes Abwasser beim Bleichen und Entfärben der Fasern ^[175, 176, 177].

Abwasserströme und -eigenschaften

Zellstoffherstellung

Kochlauge und -kondensat

Das beim chemischen Aufschluss entstehende Prozesswasser wird als Kochlauge (bei dem weitverbreiteten Sulfatverfahren) oder Kochsäure (bei dem weniger gängigen Sulfitverfahren) bezeichnet. Es wird heute üblicherweise in Rückgewinnungsanlagen eingedickt und verbrannt. Die Eindampfkondensate enthalten sowohl lösliche Pflanzenbestandteile als auch unlösliche Feinstoffe und eingesetzte chemische Hilfsstoffe. Die problematischste Verunreinigung sind die biologisch schlecht abbaubaren Ligninverbindungen, sowie andere organische Verbindungen, z.B. Saccharide, Fettsäuren und Harzsäuren ^[22, 174].

Bleicherei-Abwasser

Das Bleichen von Zellstoffen erfolgt traditionell durch den Einsatz von elementarem Chlor oder Chlorverbindungen. Die dabei entstehenden Oxidations-

produkte, z.B. chlorierte Säuren und Phenole, sind hochtoxisch und persistent, weshalb heute auf den Einsatz von elementarem Chlor weitestgehend verzichtet wird. Die Hauptproblematik der Bleicherei-Abwässer – nämlich die Toxizität und geringe biologische Abbaubarkeit der Inhaltsstoffe – verbessert sich beim Einsatz elementarchlorfreier und -totalchlorfreier Verfahren erheblich. Gemäß Stand der Technik werden als Bleichmittel heute bevorzugt Chlordioxid, Hydrosulfit, Ozon und Wasserstoffperoxid verwendet. Beim reduzierenden Verfahren mit Hydrosulfit gehen keine Stoffe in die Lösung über, sodass dieses als abwasserfrei gilt. Bei der Oxidationsbleiche mit Wasserstoffperoxid können hingegen lösliche Oxidationsprodukte entstehen, die sich im Abwasser wiederfinden ^[173, 174].

Papierherstellung

Die Abwässer der Papierherstellung sind üblicherweise wenig konzentriert und nicht toxisch. Die geringe Verschmutzung ist darauf zurückzuführen, dass die verwendeten Rohstoffe wasserunlöslich sind und nur in geringem Umfang wasserlösliche Hilfsstoffe eingesetzt werden. Die wichtigsten Verunreinigungen stellen Rückstände aus Zellstoff, Holzstoff oder Altpapier dar, die im Papiermaschinensieb nicht zurückgehalten werden, z.B. abfiltrierbare Stoffe und (teils schwer abbaubarer) CSB. Die Organik im Abwasser besteht zu 30–60 % aus Kohlenhydraten, sowie aus Ligninverbindungen und -abbauprodukten. Das Verhältnis BSB₅ : CSB liegt im unbehandelten Papier-

fabrikabwasser typischerweise bei 0,3–0,6 mit 0,5 als typischem Wert. Problematisch ist unter Umständen das Vorkommen oberflächenaktiver Produktionshilfsstoffe (z.B. Entschäumer, Stoffentlüfter), die die Abwasserreinigung beeinflussen oder stören können ^[22].



Aufbereitungsverfahren

Verfahrenswahl und -stufen

In der Abwasserreinigung der Zellstoff- und Papierindustrie geht es primär darum, Feststoffe und Organikfrachten zu entfernen. Die typische Aufbereitung besteht aus einer mechanischen Vorbehandlung – vorwiegend zur Feststoffabtrennung – und einer biologischen Stufe. Physikalisch-chemische Verfahren kommen dann zum Einsatz, wenn das Abwasser Stoffe enthält, die nur schlecht biologisch abbaubar sind, wenn eine bessere CSB-Reduktion oder ein weitergehender Feststoffrückhalt gewährleistet werden muss.

Vorreinigung

Fallen Abwasserströme in unregelmäßigen Intervallen an, werden der Abwasseraufbereitung ausreichend dimensionierte Ausgleichsbehälter vorgeschaltet. Die mechanische Vorreinigung dient in erster Linie der Abtrennung von Feststoffen, v.a. Zellulosefasern, aus Prozess- und Abwasserströmen. Dabei kommen üblicherweise folgende Verfahren zum Einsatz, häufig unter Zugabe von Flockungsmitteln:

- Sedimentation
- Flotation, üblicherweise Druckentspannungsflotation
- Filtration, üblicherweise Scheibenfilter

Da es sich bei den suspendierten Stoffen um vergleichsweise kleine und leichte Partikel handelt, wird für die Oberflächenbeschickung der Sedimentation meist eine Obergrenze von $1\text{--}1,5 \text{ m}^3/\text{m}^3/\text{h}$ angesetzt. Daraus folgen lange Verweilzeiten und in Verbindung mit den hohen Temperaturen das Risiko einer anaeroben Zersetzung im Sedimentationsbecken ^[22, 179]. Bei einzelnen Stoffströmen, z.B. bei Brüdenkondensaten aus dem Sulfitverfahren, ist eine zusätzliche Teilstrombehandlung nötig, bevor sie in die Abwasserbehandlung eingeleitet werden.

Biologische Reinigung

Sowohl Zellstoff- als auch Papierfabriksabwässer weisen oft eine einseitige Nährstoffzusammensetzung auf – bei den abbaubaren Verbindungen handelt es sich vorwiegend um Kohlenhydrate, während die Stickstoff (N)- und Phosphorkonzentrationen (P)

niedrig sind. Aus diesem Grund ist es oft nötig, Nährstoffe entsprechend zu dosieren, um ein Verhältnis $\text{BSB}_5 : \text{N} : \text{P}$ von ungefähr $100 : 5 : 1$ zu erreichen. Neben dem Nährstoffmangel kann ein Hauptproblem der biologischen Aufbereitung der unzureichende mikrobiologische Abbau einzelner Abwasserbestandteile sein – Lignin bildet beispielsweise ca. 50 % der Cellulose-Begleitstoffe im Holz und wird durch Mikroorganismen nur sehr langsam verstoffwechselt.

Zur Aufbereitung kommen generell aerobe und anaerobe Verfahren in Frage. Das am häufigsten eingesetzte Aerobverfahren ist das ein- oder mehrstufige Belebtschlammverfahren, das zum verbesserten Feststoffrückhalt teilweise auch als Membranbioreaktor ausgeführt wird. Es kommen aber auch Biofilmsysteme zum Einsatz, z.B. getauchte Biofilter oder Tropfkörperanlagen. Zur Abwasserreinigung aus der Papierherstellung auf Altpapierbasis werden auf Grund der hohen spezifischen CSB-Belastungen zunehmend Anaerobreaktoren eingesetzt. Eine anaerobe Reinigung wird meist in UASB- (Upflow anaerobic sludge blanket) oder EGSB- (Expanded granular sludge blanket) Reaktoren mit hohen CSB-Raumbelastungen realisiert ^[173, 180]. Das gewonnene Biogas kann zur Erzeugung von Strom verwendet werden.

Produktionsintegrierte Maßnahmen

Sowohl in der Zellstoff- als auch in der Papierherstellung bieten sich innerbetriebliche Maßnahmen an, um die Abwassermenge und Emissionsfracht deutlich zu verringern. Sie können als Voraussetzung für nachfolgende Maßnahmen zur weitgehenden Beseitigung der Restabwasserverschmutzung betrachtet werden. Durch produktionsintegrierte Maßnahmen kann der Wasserverbrauch in der Papierherstellung deutlich reduziert werden, etwa von 100 m^3 auf $<10 \text{ m}^3$ pro t Papier. Gerade in altpapierverarbeitenden Fabriken mit sehr hohen CSB-Belastungen im Prozesswasser lassen sich die Wasserkreisläufe auf diese Weise sinnvoll bis hin zum abwasserfreien Betrieb (ZLD) eingengen. Die Konzentration der Verschmutzungsstoffe steigt mit zunehmender Wasserwiederverwendung zwar deutlich an, die Schmutzfracht insgesamt lässt sich dadurch aber minimieren ^[22]. In der Zellstoff- und der Papierherstellung gelten heute eine Vielzahl von produktionsintegrierten Optimierungen als Stand der Technik ^[22], die immer vor der Behandlung des gesamten Abwassers geprüft werden sollten. □

9

DEPONIEREN



Länderspezifische Informationen

Indien

Das hohe Bevölkerungswachstum und die rapide Urbanisierung haben die indische Abfallwirtschaft in den vergangenen Jahrzehnten vor große Herausforderungen gestellt. 377 Mio. der 1.334 Mrd. Landes-einwohner*innen leben in urbanen Gebieten und generieren jährlich 62 Mio. t Siedlungsabfälle ^[181]. Das Abfallaufkommen steigt jährlich um ca. 5 %. Besonders viele Siedlungsabfälle fallen in den dicht besiedelten Regionen Indiens an, wie etwa in Maharashtra, Uttar Pradesh, Tamil Nadu und West Bengal. Schätzungen zufolge bestehen die Abfälle zu ca. 40 % aus biologisch verwertbaren Stoffen und zu 20 % aus recyclingfähigem Material ^[182]. Organische Abfälle stammen zumeist aus Privathaushalten, wobei auch hier der Konsum verpackter Güter zunimmt und damit der Anteil an Kunststoff-, Papier-, Glas- und Metallabfällen ansteigt. Eine wichtige Rolle spielen auch die ca. 5 Mio. t Elektroschrott, die jährlich in Indien entsorgt werden, sowie Bauschutt, der je nach Schätzung bis zu 30 % des gesamten Abfallaufkommens ausmacht ^[181, 182, 183].

Die Organisation der Abfallwirtschaft liegt in Indien in der Hand der Kommunalbehörden. Für sie gelten dabei die vom Umweltministerium herausgegebenen und zuletzt im Jahr 2016 überarbeiteten Entsorgungs- und Handhabungsregeln für Abfälle. Viele Kommunen haben jedoch finanzielle

Schwierigkeiten, eine funktionierende Abfallwirtschaft zu unterhalten. 90 % der Kosten fallen für die Sammlung und den Transport von Abfällen an, sodass kaum Budget für eine sachgemäße Aufbereitung oder Deponierung verbleibt. In der Praxis werden heute 70 % der gesamten Siedlungsabfälle gesammelt und der größte Teil davon in Deponien oder Halden entsorgt (wiederum über 70 %). 28 % des gesammelten Abfalls wird einer Aufbereitung unterzogen, während die Verbrennung oder Kompostierung von Abfällen kaum verbreitet ist (Abbildung 1) ^[182, 184]. Vermehrt wollen sich auch internationale private Konzerne der Abfallwirtschaft wie Veolia und SUEZ in Indien am Betrieb von Deponien und Recyclinganlagen beteiligen ^[185, 186].

Die Deponierung von Abfällen erfolgt meist auf einfachen Halden, d.h. ohne Abdichtung, Abluftanlagen oder Abwasserbehandlung. Große Abfallhalden liegen beispielsweise in Chennai, Coimbatore und Surat, wobei die dafür benötigten Flächen landesweit sehr schnell wachsen (um ca. 1.240 ha jährlich). Um die Menge deponierter Abfälle zu begrenzen, sollen seit 2016 sowohl recyclingfähige Verpackungsmaterialien als auch biologisch verwertbare Haushaltsabfälle separat erfasst und behandelt werden. Der Import von Kunststoffabfällen geht durch Verbote seit 2017 zurück, um die nationalen Recyclingkapazitäten nicht zu überschreiten ^[187]. Aus Umweltschutzgründen und weil viele existierende Halden bereits an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen, gewinnt momentan der Aufbau geordneter Abfalldeponien an Bedeutung. Seit 2013 wurden in Indien über 400 neue, geordnete Deponien errichtet ^[182].



MENA

Das Abfallaufkommen liegt in den meisten MENA-Ländern bei ca. 200–300 kg pro Einwohner jährlich, mit teils deutlichen Unterschieden zwischen den dicht besiedelten Metropolregionen (viel Abfall) und ländlicheren Regionen (weniger Abfall). Auch die Zusammensetzung der Siedlungsabfälle zeigt ein recht einheitliches Bild: Den größten Anteil machen organische Küchen- und Landwirtschaftsabfälle aus (ca. 50–70 %), gefolgt von Kunststoff und Papier. Im Vergleich fallen in Tunesien und Marokko etwas mehr biologisch verwertbare Abfälle und weniger Verpackungsmaterialien an als in Ägypten und Jordanien. Länderspezifisch können weitere industriell geprägte Abfallströme hinzukommen. In Ägypten werden jährlich 6,5 Mio. t Industrieabfall entsorgt, in Tunesien 5,3 Mio. t, wobei es sich größtenteils um Phosphorgips handelt. In Jordanien und anderen Ländern der Region spielt außerdem die Entsorgung von Altreifen (2,5 Mio. t jährlich in Jordanien) eine wichtige Rolle ^[188, 189, 190, 191].

Die Abfallwirtschaft wird in verschiedenen Ländern der Region politisch und finanziell unterschiedlich stark priorisiert. Als Vorreiter kann Marokko angesehen werden, wo durch die Umsetzung einer Reihe von Umweltschutz- und Abfallmanagement-Programmen der Anteil eingesammelter Abfälle seit 2008 von 44 % auf über 85 % gestiegen ist ^[189]. Hingegen werden in Tunesien nur 10–80 % und in Ägypten nur 30–65 % der Abfälle eingesammelt, mit starken Unterschieden zwischen ländlichen Regionen (geringe Quote) und Städten (höherer Anteil eingesammelter Abfälle) ^[188, 190]. Der Großteil der eingesammelten Abfälle wird deponiert, entweder auf einfachen Müllhalden oder auf geordneten Deponien mit entsprechenden Umweltschutzmaßnahmen (Abbildung 1). Kompostierung oder Recycling sind mangels Abfalltrennung kaum verbreitet.

In Tunesien erfolgt die Entsorgung durch Privatunternehmen, die Abfälle in vertraglicher Abstimmung mit den zuständigen Umweltbehörden deponieren. Hier werden immerhin 70 % der erfassten Abfälle auf geordneten Deponien mit einer Jahreskapazität von ca. 2 Mio. t entsorgt ^[192]. Jordanische Abfälle werden von regionalen Betriebsunternehmen auf ca. 25 Deponien im Land entsorgt, von denen die

meisten einfache Müllhalden sind. 50 % der Abfälle werden der geordneten Deponie Algbawi im Großraum Amman zugeführt, die mit Abstand die größte und modernste des Landes ist ^[193]. Bis 2025 sollen politische Maßnahmen die Menge deponierter Abfälle und insbesondere den Anteil biologisch verwertbarer Stoffe drastisch reduzieren ^[194]. In Marokko wurden 2014 noch über 50 % der eingesammelten Abfälle auf einfachen Müllhalden entsorgt. Es ist aber davon auszugehen, dass sich diese Quote durch den Neubau von über 60 geordneten Deponien, die größtenteils unter BOT*-Verträgen betrieben werden, seitdem verringert hat. Die größte Deponie des Landes in Oum Azza wird von Teodem, einem lokalen Tochterunternehmen der französischen Pizzorno Environment betrieben. Im frankophonen Marokko und Tunesien sind außerdem die Großunternehmen Veolia und SUEZ, teils durch Tochterfirmen, tätig. Ägypten hat nur wenige geordnete Deponien in Betrieb und über 80 % der eingesammelten Abfälle werden auf einfachen Müllhalden entsorgt ^[188, 189, 190, 191].

Branche und Abwasseranfall

Mit dem Grad der Industrialisierung nimmt weltweit auch das Abfallaufkommen rapide zu – im Jahr 2015 wurden Schätzungen zufolge insgesamt 7–10 Mrd. t Abfall generiert ^[195]. Dazu zählen neben Haushaltsabfällen auch Abfallströme aus Industrie, Landwirtschaft und Krankenhäusern. Haushaltsabfälle setzen sich regionsabhängig zu unterschiedlichen Anteilen v.a. aus biologisch verwertbaren Stoffen (Küchen- und Gartenabfälle), Verpackungsmaterialien (Papier, Glas, Kunststoff), Elektronikschrott und Sperrmüll zusammen. Bei industriellen Abfällen handelt es sich beispielsweise um Produktionsabfälle, Bauschutt oder Schlachtabfälle. Sowohl Haushalts- als auch Industrieabfälle können teilweise Schadstoffe enthalten, z.B. asbest-, teer- oder bitumenhaltige Materialien, biotoxisch wirksame Chemikalien oder

*Build-Operate-Transfer, d.h. eigentumsrechtliche Übertragung der Anlage an den Kunden vor Ablauf der Konzessionsperiode

Jährliches Abfallaufkommen

Alle Werte in %
 ■ Anteil eingesamelter Abfälle
 ■ davon entsorgt auf einfachen Müllhalden
 ■ davon entsorgt auf geordneten Deponien
 ■ davon behandelt und recycelt
 ■ davon kompostiert
 ■ davon verbrannt
 ↗ Jährliche Abfallproduktion

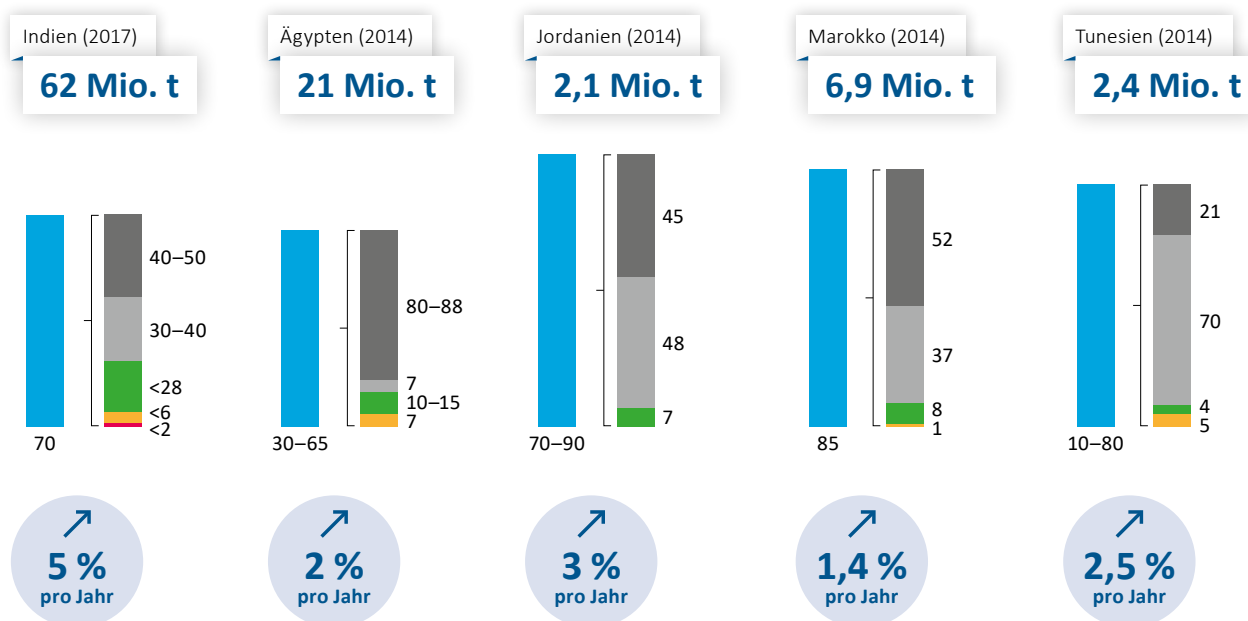


Abbildung 1: Jährliches Abfallaufkommen und typische Entsorgungswege der eingesammelten Abfälle, dargestellt für fünf Beispielländer im Vergleich ^[181, 184, 188, 189, 190, 191]

pathogene Verunreinigungen. In vielen industrialisierten Ländern ist heute die Rückgewinnung recyclingfähiger Materialien (z.B. Papier, Glas, Kunststoffe, Metalle) und die Kompostierung biologisch verwertbarer Abfälle weit verbreitet. Global ist allerdings die Deponierung nach wie vor der mit Abstand wichtigste Entsorgungspfad für Abfälle. Eine unsachgemäße Abfallentsorgung kann durch unkontrollierte biologische und chemisch-physikalische Zersetzungs Vorgänge zu Umweltverschmutzungen führen – problematisch sind v.a. die Bildung von Deponiegasen (v.a. CO₂ und Methan) sowie die Entstehung von Deponiesickerwasser. Umweltauswirkungen können durch die Anlage geordneter Deponien minimiert werden, in denen der Kontakt zwischen Abfällen und Umweltmedien so weit wie möglich reduziert wird. Hierbei wird beispielsweise darauf geachtet, einen Standort mit geologisch undurchlässigem Untergrund

zu wählen und zusätzlich durch technische Barrieren das Austreten von Sickerwasser zu vermeiden. Zum Abdichten der Deponie werden Membranen oder Dichtstoffe eingesetzt, und entstehendes Sickerwasser wird am Grund der Deponie erfasst, ausgeleitet und behandelt ^[196].

Abwasserströme und -eigenschaften

Deponiesickerwasser

Behandlungsbedürftiges Abwasser fällt auf geordneten Deponien in Form von Deponiesickerwasser an. Dabei handelt es sich zum größten Teil um Regenwasser, das in die Deponie eintritt, hindurchsickert und

sich im Kontakt mit Abfällen mit Verunreinigungen anreichert. In der Deponie entsteht Wasser aber auch als Reaktionsprodukt, wenn sich kohlenstoffhaltige Materialien zu Methan, CO_2 und organischen Nebenprodukten zersetzen. Das Sickerwasser selbst kann dann auch mit solchen Stoffen eine chemische Reaktion eingehen, die ansonsten nicht abgebaut würden, z.B. Aschen und zement- oder gipshaltige Materialien.

Deponiesickerwasser enthält neben Feststoffen typischerweise eine Bandbreite organischer und anorganischer gelöster Verunreinigungen (Tabelle 1). Bei den vorhandenen organischen Stoffen handelt es sich v.a. um Alkohole, Säuren, Aldehyde, Zucker und Huminstoffe. Hinzu kommen anorganische Verbindungen (z.B. Sulfate, Chloride, Ammonium, Eisen-, Aluminium-, Zinkverbindungen) und Schwermetalle (z.B. Blei, Nickel, Kupfer, Quecksilber). Darüber hinaus werden aus vielen Abfällen biozide Stoffe herausgelöst, etwa aromatische und halogenierte Kohlenwasserstoffe, Phenole, Phthalate, aromatische Sulfonate oder Phosphonate [197, 198].

Die konkrete Zusammensetzung des Sickerwassers hängt nicht nur von der Art der deponierten Abfälle, sondern auch vom Alter der Deponie ab. Die Zersetzungsvorgänge in der Deponie durchlaufen von Beginn der Deponierung bis zur Stabilisierung

Parameter	Konzentration	Einheit
pH	4,5–9	-
Leitfähigkeit	2.500–35.000	$\mu\text{S}/\text{cm}$
Feststoffe	2.000–60.000	mg/l
BSB ₅	20–57.000	mg/l
CSB	140–152.000	mg/l
Gesamtstickstoff	14–2.500	mg/l
Ammonium-Stickstoff	50–2.200	mg/l
Phosphor	0,1–23	mg/l
Chlorid	150–4.500	mg/l

Tabelle 1: Typische Konzentrationen von Deponiesickerwasser [200]

mehrere zeitliche Phasen, die folgendermaßen zusammengefasst werden [196, 199]:

- Oxidation: Kurze Phase unmittelbar nach der Ablagerung, in der Organik mit dem verfügbaren Sauerstoff abgebaut wird, einhergehend mit CO_2 -Bildung und leichtem Anstieg der Deponietemperatur.
- Saure Gärung: Sind die Sauerstoffreserven aufgebraucht, setzt die anaerobe Fermentation mit Säurebildung und weiterer Erhöhung der Deponietemperatur ein.
- Methangärung: Methanbildung aus organischen Säuren, die zum Wiederanstieg des pH-Wertes führt, bis hin zur Stabilisierung der Deponie.

Sickerwasser der sauren Gärung

Die saure Gärung dauert mehrere Monate an und ist geprägt von Fermentationsvorgängen unter Sauerstoffabschluss. Dabei werden v.a. flüchtige Fettsäuren gebildet, die bis zu 95 % der gelösten Organik darstellen können. Im Vergleich dazu enthält das Sickerwasser nur geringe Mengen hochmolekularer Verbindungen. In dieser Phase weist das Abwasser insgesamt sehr hohe Organikfrachten auf, d.h. hohe BSB₅- und CSB-Werte, die üblicherweise im Verhältnis $\text{BSB}_5 : \text{CSB} > 0,5$ stehen. Durch die Säurebildung sinkt der pH-Wert des Sickerwassers auf 5,5 bis 6,1 ab. Unter diesen chemischen Bedingungen gehen auch vermehrt Metallionen in Lösung und können das Abwasser zusätzlich kontaminieren [198, 201].

Sickerwasser der Methangärung

Nach spätestens einem Jahr setzt die anaerobe Methangärung ein, die über 20 Jahre anhalten kann. Diese Phase ist gekennzeichnet von einer vermehrten Aktivität methanogener Bakterien, die aus organischen Säuren Methan und CO_2 bilden. Durch den Säureabbau steigt der pH-Wert des Sickerwassers auf 8,0–8,5, und entsprechend verringert sich die Konzentration gelöster Metalle im Wasser. Das Sickerwasser ist weniger stark mit gut abbaubaren organischen Bestandteilen belastet, z.B. Alkoholen, flüchtigen Säuren oder Aminen. Zugleich steigt der Anteil hochmolekularer und schwer abbaubarer Fraktionen, z.B. Humin- oder Fulvinsäuren. Dies äußert sich auch in typischen Verhältnissen $\text{BSB}_5 : \text{CSB} < 0,1$, die eine biologische Abwasserbehandlung erschweren [199, 201].

Aufbereitungsverfahren

Verfahrenswahl und -stufen

Das Konzept einer systematischen Abwasseraufbereitung in der Abfallwirtschaft ist im Vergleich zu anderen Industriezweigen noch jung und steckt in vielen Regionen der Welt noch in den Anfängen. Eine Herausforderung liegt in der heterogenen, veränderlichen und häufig unbekannten Zusammensetzung anfallender Sickerwässer, je nach deponierter Abfallart und stattfindender Zersetzungsprozesse. Da Deponien mindestens über 30–50 Jahre zu bewirtschaften sind, muss hier außerdem der zuverlässige und robuste Betrieb der Abwasserreinigung über vergleichsweise lange Zeiträume gewährleistet sein. Vor der Einleitung des Abwassers in die öffentliche Kanalisation oder in nahegelegene Oberflächenwasser sollten folgende Trennaufgaben zumindest teilweise erfüllt sein:

- Rückhalt von Feststoffen
- Neutralisierung, falls nötig
- Entfernung von gelösten Salzen, Nährstoffen und Metallen
- Abtrennung biozider Stoffe, teils im niedrigen Konzentrationsbereich

Deponiesickerwasser der sauren Gärung ist aufgrund seines hohen BSB_5 : CSB -Verhältnisses normalerweise gut biologisch abbaubar. Es lässt sich daher in konventionellen Belebtschlamm- oder Festbettverfahren weitgehend aufreinigen. Während der Methangärung nimmt die biologische Abbaubarkeit des Sickerwassers allerdings deutlich ab. Außerdem kann das Abwasser auch schon vorher persistente oder toxische Stoffe enthalten, die unmittelbar aus den deponierten Abfällen ausgetragen werden. In beiden Fällen genügt eine biologische Aufreinigung nicht, und es müssen (ergänzend) physikalisch-chemische Verfahren eingesetzt werden. Die häufigsten Ansätze hierfür sind folgende ^[197, 201]:

- Fällung
- Koagulation und Flockung
- Adsorption
- Oxidationsverfahren
- Membranfiltration

Weitergehende Kombinationsverfahren

Um der teils komplexen Zusammensetzung des Wassers gerecht zu werden und ein zuverlässiges Multi-Barrieren-System zu gewährleisten, werden zur Sickerwasserbehandlung oft bekannte physikalisch-chemische Aufbereitungsverfahren miteinander kombiniert. Adsorptionsverfahren an Aktivkohle etwa sind robust im Betrieb und lassen sich erfahrungsgemäß gut mit biologischen Reinigungsverfahren koppeln. So kann etwa Pulveraktivkohle direkt in die Biologie dosiert, der Ablauf der Biologie mittels granulierter Kohle aufgereinigt oder granuliert Kohle selbst als Trägermaterial für eine biologische Reinigung eingesetzt werden ^[202, 203].

Auch Membranverfahren eignen sich gut als Nachbehandlungsstufe nach der biologischen Reinigung. Klassischerweise werden Ultrafiltrationsmembranen in Membranbioreaktoren (MBR) zum Feststoffrückhalt eingesetzt. Der Ablauf von Biologie oder MBR kann aber auch z.B. mittels Umkehrosmose weiter aufgereinigt werden, wenn persistente Stoffe entfernt werden sollen ^[204, 205]. Allerdings ist zu beachten, dass der Konzentratstrom aufbereitet und nicht direkt in den Deponiekörper zurückgeleitet wird. Interessant kann auch die Kombination von Koagulations- und Nanofiltrationsverfahren sein, um eine hohe Ablaufqualität zu erreichen und zugleich Probleme mit Fouling in der Membranstufe zu verringern ^[206, 207].

Neben der konventionellen Ozonung von Abwasser setzen sich in einigen Anwendungen auch weitergehende Oxidationsverfahren und Kombinationen daraus durch. Die durch Oxidation häufig verbesserte biologische Abbaubarkeit von Abwasserbestandteilen kann ausgenutzt werden, indem Oxidationsverfahren einer biologischen Reinigungsstufe vorangeschaltet werden. Häufig ist allerdings auch ein umgekehrter Ansatz zu beobachten, nämlich die Nachbehandlung biologisch gereinigten Abwassers z.B. mittels Ozonung oder Fenton-Verfahren zum Abbau persistenter Stoffe ^[208, 209]. Vor allem bei niedrigen pH-Werten können durch die Kopplung von Koagulations- und Oxidationsverfahren (häufig Fenton) gute Synergien im Hinblick auf die Reinigungsleistung erzielt werden ^[210, 211]. □

FALLSTUDIE: Mülldeponie in Marokko

Biologische Sickerwasserbehandlung – Abfallverwertungszentrum Oum Azza

Hintergrund

Im marokkanischen Oum Azza betreibt TEODEM, eine Tochtergesellschaft der Groupe Pizzorno Environnement, das größte Abfallverwertungszentrum in Nordafrika. Die Anlage nimmt etwa 850.000 t Abfälle pro Jahr aus dreizehn Gemeinden der Region Rabat-Salé-Skhirat auf.

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Durch die Einführung eines modernen Abfallwirtschaftskonzepts sind in dieser Region wichtige Schritte zum Schutz von Mensch und Umwelt erfolgt. Abfälle werden erfasst und gezielt der stofflichen und energetischen Verwertung zugeführt. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Behandlung von Depo- niesickerwasser zu, das bei der Lagerung der Abfälle vor allem durch das Einsickern von Regenwasser und

durch die Eigenfeuchte des Abfalls entsteht. Gelangt Sickerwasser unbehandelt in Gewässer, stellt es eine Gefahr für die Umwelt dar.

In Oum Azza fallen täglich ca. 280 bis 300 m³ Sickerwässer an, die zuverlässig gereinigt werden müssen. Die Sickerwasserbehandlungsanlage in Oum Azza besteht aus einem Rechen, einem belüfteten Teich, einem anoxischen Absetzteich und einer nachgeschalteten Umkehrosmose.

Lösungsansatz

Die biologische Sickerwasserbehandlung kann eine effiziente und robuste Technologieentfernung darstellen, wenn der zuverlässige Anlagenbetrieb durch kontinuierliche Überwachung der Zu- und Ablaufqualität sichergestellt wird. Zur Belüftung des Teichs in Oum Azza wurden ursprünglich Oberflächen-



Abbildung 1: Umrüstung auf OxyStar-Belüfter in der Sickerwasserbehandlungsanlage Oum Azza, Marokko

belüfter (drei Belüfter je 75,0 kW) eingesetzt, die sich aufgrund ihrer unzureichenden Belüftungs- und Durchmischungsleistung und ihres hohen Wartungsaufwands und Energieverbrauchs nicht bewährt haben. Mit diesem Belüftungssystem wurde ein Abbau von ca. 40 % der täglichen BSB₅-Fracht von ca. 3.000 kg BSB₅ erreicht. Durch die starke Aerosolbildung der Oberflächenbelüfter kam es zusätzlich zu einer starken Geruchsbelästigung. Diese Betriebsprobleme veranlassten den Betreiber, das vorhandene Belüftungssystem durch FUCHS OxyStar-Belüfter zu ersetzen. Installiert wurden vier schwimmende OxyStar-Belüfter mit einer Nennleistung von je 22,0 kW (Abbildung 1).

Ergebnisse

Die vier Belüfter mit einer Gesamtleistung von nur 88,0 kW reichen aus, den gesamten erforderlichen Sauerstoff ohne Aerosolbildung einzutragen und das Teichvolumen wirkungsvoll zu durchmischen. Die Belüfter wurden auf robusten Schwimmern installiert, um sich dem schwankenden Wasserspiegel anzupassen (Abbildung 2). Bereits kurz nach der Inbetriebnahme wurde durch den Anlagenbetreiber ein Abbau der BSB₅-Fracht von ca. 70 % bestätigt. Der Stromverbrauch konnte deutlich reduziert werden (Tabelle 1).

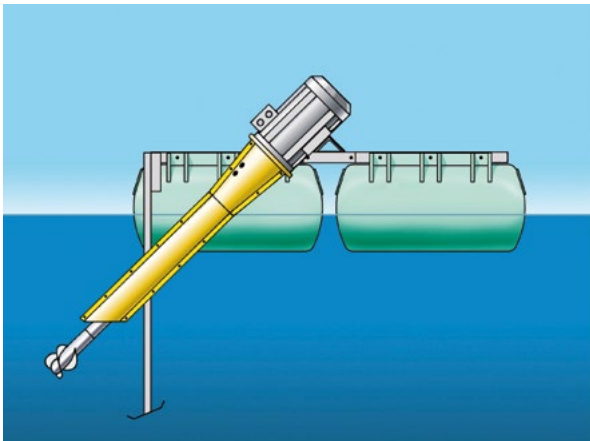


Abbildung 2: Schematische Darstellung des OxyStar-Belüfters

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Die gelieferte Belüftungseinrichtung ermöglicht im Vergleich zur vorherigen Lösung eine sehr energieeffiziente Durchmischung des Behandlungsteiches, wodurch die Reinigungsleistung verbessert werden konnte (Tabelle 1). Durch das Funktionsprinzip der selbstansaugenden Belüfter kommt es außerdem zu keiner Aerosolbildung. Die Umrüstung konnte ohne Betriebsunterbrechung erfolgen, eine Beckenentleerung war nicht erforderlich. □



Aufbau der Anlage	- Rechen
	- Belüfteter Teich
	- Absetzteich
	- Umkehrosmose
Abwasserzufluss	280–300 m³/Tag
Schmutzfracht BSB5	3.000 kg/Tag
Volumen belüfteter Teich	ca. 7.000 m³
Resultierende Raumbelastung	430 g BSB5/m³/Tag
Installierte Belüftungseinrichtung	4 OxyStar-Belüfter auf Schwimmern
Nennleistung	je 22,0 kW
Gesamte installierte Leistung	88,0 kW
Leistungsdichte	ca. 12,5 W/m³
BSB5-Abbaugrad	ca. 70 %
Stromersparnis zum vorherigen Konzept	ca. 60 %

Tabelle 1: Zusammenfassung der Sickerwasserbehandlung in Oum Azza, Marokko

10

INDUSTRIEPARKS



Länderspezifische Informationen

Indien

In Indien werden seit den 2000er Jahren zunehmend Industrieparks auf- und ausgebaut, um den steigenden Produktionskapazitäten des Landes gerecht zu werden. Ausschlaggebend hierfür ist v.a. ein hoher Anteil kleiner und mittelständischer Unternehmen in der Chemie-, Textil-, Automobil-, IT- und Elektronikindustrie. Die Anzahl und die Verteilung aller Industrieparks werden auf nationaler Ebene nicht zentral erfasst, aktuellen Schätzungen zufolge werden aber in den Bundesstaaten Maharashtra, Karnataka, Rajasthan und Gujarat die meisten Parks betrieben (Abbildung 1) ^[212]

Es wird geschätzt, dass etwa 10–15 % der indischen Industrieparks über eine gemeinsame Abwasserbehandlungsanlage, typischerweise als Common Effluent Treatment Plant (CETP) bezeichnet, ^[213] verfügen. In Zentren der Gerberei-, Textil-, Chemie- und Galvanikindustrie ist die Deckung mit solchen Anlagen im Vergleich am höchsten. Die typischen Anlagenkapazitäten reichen von weniger als 1.000 m³/Tag bis zu 30.000 m³/Tag ^[3]. Der zunehmende Auf- und Ausbau von Industrieparks in den kommenden Jahren wird auch die Anzahl an Industriekläranlagen erhöhen.

Es handelt sich dabei um einen Markt, der bisher traditionell auf indische Unternehmen beschränkt war und sich nun auch für internationale Technologieanbieter öffnet. Die indische Regierung stellt bis zu 50 % und die jeweilige Regierung des Bundesstaates zusätzlich bis zu 25 % der Investitionsmittel für solche Anlagen zur Verfügung. Der Finanzierungsplan der Regierung war ursprünglich auf 5 Jahre angelegt und wurde 2018 abgeschlossen. Es gibt jedoch neue Pläne, um die Finanzierung aufrechtzuerhalten. Für die Einrichtung und den Betrieb von gemeinsamen Abwasserbehandlungsanlagen ist eine Zustimmung der jeweiligen regionalen Regulierungsbehörden erforderlich. Ein guter Überblick zum Einsatz von

CETPs, den gesetzlichen Hintergründen und eingesetzten Technologien findet sich im Bericht der Indo-German Environment Partnership ^[214]. Weiterhin soll durch die Einführung spezieller Gerichte (Green Tribunal Courts) der Vollzug umweltrelevanter Regulationen stärker verfolgt werden ^[215]. Durch Änderungen in der indischen Gesetzgebung und Haftpflicht haben sich die Anforderungen an den technischen Umweltschutz auf Industriekläranlagen verschärft. Die Verträge für die Wartung der Standorte haben sich außerdem von einem Jahr nach Inbetriebnahme auf 15 Jahre erhöht, was zu einem gesteigerten Interesse insbesondere an langlebigen Technologien führt.

MENA

In allen Ländern der MENA-Region wird derzeit der Auf- und Ausbau von Industrieparks gezielt gefördert, um die nationale wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit zu erhöhen, Arbeitsplätze zu schaffen und die Effizienz von Produktion und Umweltschutz zu verbessern. Dies wird durch gezielte politische Programme – etwa dem „Industrial Acceleration Plan“ in Marokko – umgesetzt, die eine nationale Planung und finanzielle Unterstützung bei der Errichtung von Industrieparks vorsehen. In Ägypten befinden sich beispielsweise 13 neue Industrieparks im Bau, in Marokko wurden Anfang 2020 drei weitere Industrieparks zur Planung und Realisierung ausgeschrieben. Die meisten Projekte werden heutzutage in „Public Private Partnership“-Verträgen vergeben ^[216].

In Ägypten und Marokko werden vermehrt „Eco-Industrial Parks“ geplant, die durch gezielte Synergienutzung nicht nur einen wirtschaftlichen, sondern auch einen ökologischen Mehrwert bieten sollen. In diesen Parks wird die Bereitstellung von Energie und Wasser, sowie die Entsorgung von Abfällen und Abwasser zentral organisiert und dadurch optimiert. Auch bestehende Industrieparks werden mit der entsprechenden Infrastruktur nachgerüstet, um strengeren Umweltschutzaufgaben zu genügen ^[217, 218]. In Tunesien erscheint die Notwendigkeit zur Nachrüstung mit Abwasserreinigungsanlagen besonders dringend – 2014 waren dort nur ca. 25 % der Industrieparks an eine Kanalisation angeschlossen ^[219].

Infrastruktur und Abwassermanagement

Als Industrieparks werden abgegrenzte Industrieländer bezeichnet, auf denen mehrere unabhängige produzierende Unternehmen tätig sind. Während das Konzept in der chemischen Industrie schon seit vielen Jahrzehnten genutzt wird, sind heute auch oft Unternehmen verschiedener Industriezweige in Industrieparks organisiert. Der Vorteil von Industrieparks liegt darin, dass die angesiedelten Unternehmen untereinander durch gemeinsame Wertschöpfungsketten verbunden sein können und auf eine gemeinsame Standortinfrastruktur zugreifen. Diese wird meist durch ein Betriebsunternehmen erbracht, das oft zugleich auch Eigentümer des Industrieparks ist. Die Dienstleistungen des Betriebsunternehmens umfassen normalerweise folgende Aspekte:

- Mobilität und Infrastruktur
- Straßen- und Schienenanschluss und/oder Gewerbehafen, sowie Mobilität auf dem Gelände
- Energie und Medien
- Primärenergie (z.B. Erdgas), aber auch andere Medien wie technische Gase, Wasser verschiedener Qualitätsstufen, Dampf oder Kältemittel
- Abfallentsorgung
- Sachgemäße Entsorgung von Gewerbemüll und giftigen Industrieabfällen, sowie Abwasserentsorgung und -behandlung
- Verwaltung zentraler Einrichtungen
- Informations- und Telekommunikationstechnik, sowie je nach Größe des Industrieparks auch Werkfeuerwehr und Werkschutz
- Logistik
- Management von Gefahrguttransporten, Lagerhaltung für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Fertigerzeugnisse usw.

Die zentrale Abwasseraufbereitung aller gesammelten Abwässer des Industrieparks in einer Gemeinschaftskläranlage kann die Effizienz der Reinigung erhöhen und die Kapital- und Betriebskosten für die Einzelunternehmen deutlich senken. Zugleich

ergeben sich unter günstigen Bedingungen Möglichkeiten zur Wieder- oder Weiterverwendung von Wasser oder zur Rückgewinnung und Nutzung von Ressourcen (z.B. Nährstoffen, Wertstoffen) vor Ort. Für die zuständigen Regulierungsbehörden erhöht die zentralisierte Einleitung von Industrieabwasser die Transparenz und vereinfacht die Durchführung von Qualitätskontrollen.

Besondere Herausforderungen

Heterogene Abwasserströme

Die in den jeweiligen Einzelunternehmen anfallenden Abwasserströme können sich deutlich unterscheiden, und die Komplexität der Abwasserzusammensetzung steigt mit der Heterogenität der angesiedelten Industriezweige und Einsatzzwecke. Während einige Branchen vorrangig organisch belastete Abwässer generieren, steht in anderen Fällen die Belastung mit Anorganik im Vordergrund. Von besonderer Bedeutung ist die biologische Abbaubarkeit bzw. Verträglichkeit der eingeleiteten Schadstofffracht, um den Betrieb einer zentralen biologischen Reinigungsstufe nicht zu gefährden. Abwasser mit potenziell toxischer Wirkung auf die Biologie muss zurückgehalten und dezentral vorbehandelt werden.

Um einen dauerhaft stabilen Betrieb der Kläranlage zu gewährleisten, müssen die eingeleiteten Abwasserströme bestimmte, zumeist vertraglich vereinbarte, Bedingungen erfüllen. Das Abwasser jedes einzelnen Einleiters sollte daher entsprechend in Echtzeit überwacht werden, bevor es sich im zentralen Abwassernetz vermischt. Zu den zu erfassenden Messwerten gehören neben dem Durchfluss meist auch Qualitätsparameter wie der pH-Wert, CSB, DOC (dissolved organic carbon) oder die Leitfähigkeit sowie weitere spezifische Parameter (z.B. Schwermetalle, chlororganische Verbindungen, Phenole, andere toxische Stoffe). Werden kurzfristig Abweichungen von der zulässigen Abwasserqualität festgestellt, kann die Einleitung des Abwassers rechtzeitig gestoppt und das problematische Abwasser in Ausgleichsbehältern zwischengespeichert werden,

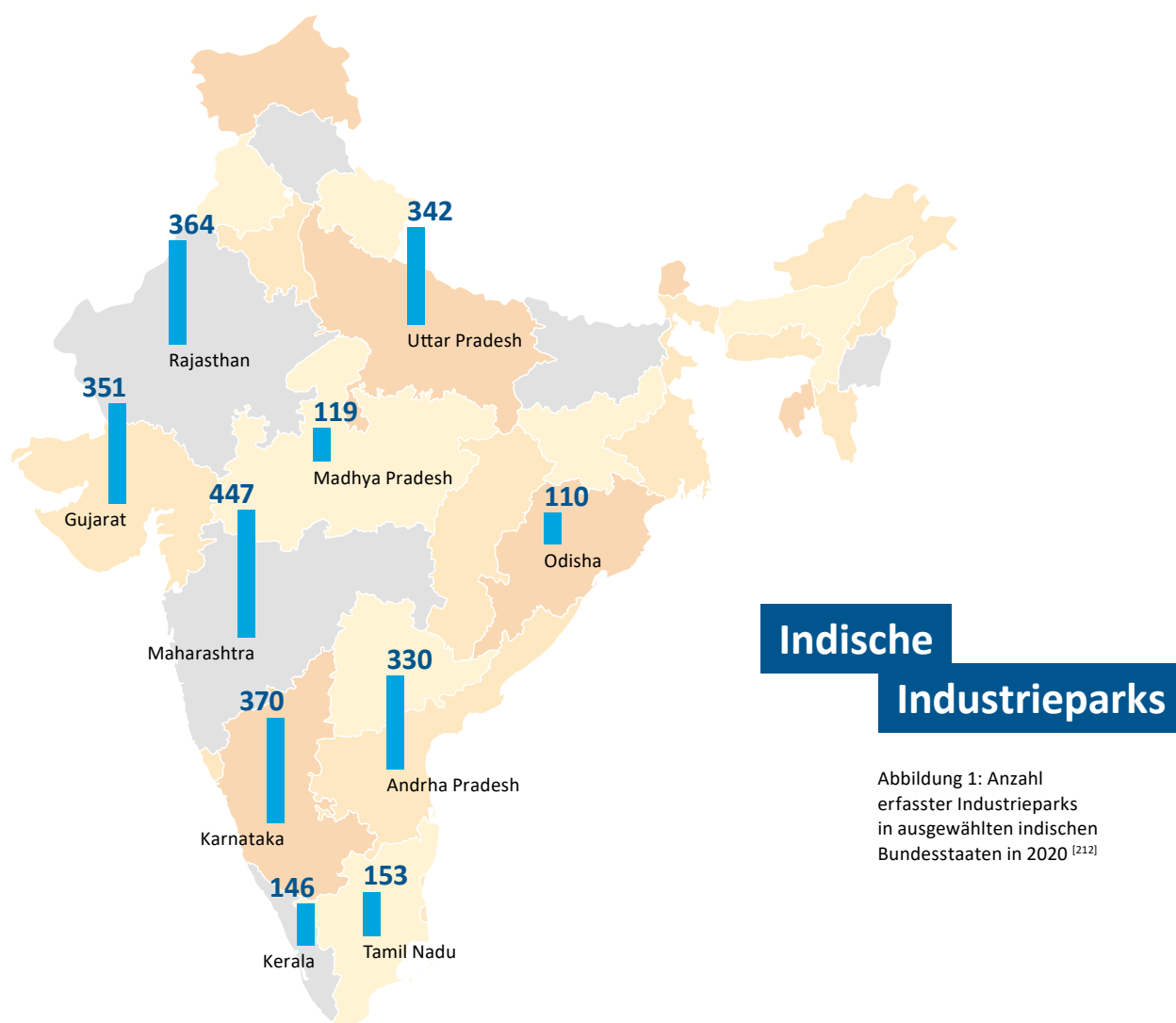


Abbildung 1: Anzahl erfasster Industrieparks in ausgewählten indischen Bundesstaaten in 2020 ^[212]

um dieses getrennt behandeln zu können. Auf diese Weise kann z.B. die zentrale biologische Reinigungsstufe vor toxischen Schocks geschützt werden.

Gemeinsame oder getrennte Behandlung

Grundsätzlich ist eine getrennte Behandlung von Abwasserströmen zu bevorzugen, da dabei einzelne Verunreinigungen gezielt behandelt werden können und eine Vermischung und Verdünnung vermieden wird. In der Praxis werden allerdings unterschiedliche Abwasserströme teilweise gemischt, um unter Anderem schlecht abbaubare Abwässer durch die Mischung mit organisch gut verfügbaren Frachten ohne weitere Vorbehandlung der Biologie zuzufüh-

ren. Abwässer mit gegensätzlichen Eigenschaften können sich bei einer Vermischung auch gegenseitig kompensieren, wie etwa im Falle unterschiedlicher pH-Werte oder Temperaturniveaus.

Auf der anderen Seite ist es sinnvoll, schwachbelastete Abwasserströme separat abzuleiten und ggf. zu behandeln. Dies gilt u.a. für sehr schwach belastetes Wasser wie Niederschlagswasser oder Kühlwasser, das im Normalfall ohne komplexe Aufbereitung abgeleitet oder genutzt werden kann. Sanitärabwasser aus dem Industriepark sollten stets separat vom Industrieabwasser erfasst und behandelt werden. Auch die Einleitung kommunaler Abwässer in Kläranlagen auf Industrieparks kann bei entsprechender

räumlicher Nähe Sinn machen. Sind einzelne Wasserströme übermäßig stark belastet, gilt es als Stand der Technik, diese vor einer Vermischung separat vorzubehandeln. Die ohnehin nötige Aufbereitung kann dadurch im Vergleich zu einer zentralen Ausführung in ihrer Kapazität deutlich reduziert werden und erfolgt zugleich mit höherer Effizienz. Dies gilt insbesondere in folgenden Fällen ^[221]:

- Das Abwasser enthält Verunreinigungen, die die nachfolgende Aufbereitung negativ beeinflussen, z.B. Stoffe, die in der Biologie toxisch oder inhibierend wirken
- Das Abwasser enthält Stoffe, die sich in der nachfolgenden Aufbereitung schlecht entfernen lassen, z.B. biologisch nicht abbaubare Bestandteile oder Schwermetalle
- Das Abwasser hat eine so hohe Qualität, dass es sich durch wenig aufwändige Aufbereitung wiederverwenden lässt, z.B. zu Kühlzwecken, zur Grünflächenbewässerung oder als Löschwasser
- Das Abwasser enthält Bestandteile, die gezielt zurückgewonnen werden sollen, um sie wieder- oder weiterzuverwenden, z.B. Nährstoffe, Wertstoffe oder eine hohe Fracht gut abbaubarer Stoffe, um Biogas zu produzieren.
- Für die Einleitung in eine zentrale Industriekläranlage müssen geeignete Einleitungsparameter festgelegt und überwacht werden. Das gemeinsame Behandeln von jeweils schwer behandelbaren Abwasserströmen – z.B. Abwässer der chemischen Industrie mit Abwässern der Papierindustrie – ist ohne geeignete Vorbehandlung nicht sinnvoll.

Aufbereitungsverfahren

Verfahrenswahl und -stufen

Die zentrale Kläranlage eines Industrieparks sieht in den meisten Fällen großzügige Ausgleichsbehälter vor, um Konzentrations- und Mengenschwankungen im Anlagenzulauf abzupuffern. Vor Einleitung der industriellen Abwässer in die Kläranlage sollten relevante Parameter regelmäßig überwacht werden. Dazu zählen z.B. folgende ^[22]:

- Allgemeine Parameter, z.B. Temperatur, pH-Wert und Feststoffe
- Anorganische Stoffe, z.B. Stickstoff, Phosphor und Sulfat
- Metalle, z.B. Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Kupfer und Quecksilber
- Organische Stoffkenngrößen, z.B. schwerflüchtige lipophile Stoffe oder Kohlenwasserstoffindex
- AOX, als Maß für organische Halogenverbindungen
- Effektive Toxizität, z.B. gegenüber Fischeiern

Die gemeinschaftliche Industriekläranlage sieht einen Aufbereitungsprozess vor, der mindestens aus einer biologischen Stufe, zumeist aber aus mehreren Stufen besteht ^[22]:

- Mechanische Abwasservorbehandlung
- Abtrennung von nicht mischbaren Feststoffen und Ölen durch Phasentrennung, z.B. in Form einer Grobfiltration, Sedimentation oder Flotation

Verwendungszweck	Feststoffe	Gelöststoffe	Trübung	pH	BSB5	Chlor
Bewässerung	5–35 mg/l	500–1.000 mg/l		6–9	5–45 mg/l	0,5–5 mg/l
Straßenreinigung		1.500 mg/l	30 NTU	6–9	15	0,2 mg/l
Kühlwasser	30 mg/l				30 mg/l	1 mg/l
Toilettenspülung		1.500 mg/l	30 NTU	6–9	10	0,2 mg/l
Kesselspeisewasser	10–500 mg/l	1.000 mg/l				

Tabelle 1: Richtwerte der erforderlichen Wasserqualitäten für bestimmte Wiederverwendungszwecke ^[222, 223]

- Chemische Reinigung
- Entfernung gelöster Stoffe, z.B. von Salzen oder Metallen, durch Fällungs- und Flockungsverfahren, ggf. einhergehend mit einer Neutralisation des Abwassers
- Biologische Reinigung
- Abbau von Nährstoffen und organischen Verunreinigungen durch anaerobe und/oder aerobe biologische Verfahren
- Weitergehende Aufbereitung
- Entfernung schwer entfernbarer, gelöster Verunreinigungen durch weitergehende Verfahren, z.B. Oxidation, Adsorption, Ionentausch oder Membranfiltration

Die konkrete Auswahl der weitergehenden Aufbereitungsverfahren hängt stark von den einleitenden Betrieben und der sich daraus ergebenden Abwasserqualität ab. Relevant ist außerdem die angestrebte Ablaufqualität – je nach Einleitbedingungen in Oberflächengewässer oder beabsichtigter Weiterverwendung des gereinigten Abwassers.

Wieder- und Weiterverwendung

Grundlage für die effiziente Wieder- oder Weiterverwendung aufbereiteten Abwassers ist die zielgerichtete Erfassung und getrennte Behandlung verschiedener Wasserströme sowie Kenntnisse über deren Zusammensetzung. Dies kann ein entsprechend durchdachtes Abwasser- und Wassernetz auf dem Gelände des Industrieparks erforderlich machen, was bei Neuerrichtungen deutlich leichter umzusetzen ist als bei Um- oder Ausbauten bestehender Parks. Die zielgerichtete Aufbereitung separater Ströme betrifft nicht nur die Abwasserherkunft, sondern auch den beabsichtigten Einsatzzweck des aufbereiteten Wassers.

Häufig wird behandeltes Abwasser für infrastrukturelle Anwendungen genutzt, wie etwa zur Bewässerung, Straßenreinigung oder Toilettenspülung. Produktionsnähere Möglichkeiten sind der Einsatz als Kühl- oder Kesselspeisewasser oder als Prozesswasser. Die beabsichtigte Wasserverwendung und die damit einhergehenden Qualitätsanforderungen wirken sich unmittelbar auf das benötigte Aufbereitungsschema aus (Tabelle 1). Abwasser, das Einleitungen aus Gesundheitseinrichtungen enthält sowie

Industrieabwasser mit hoher Schadstoffbelastung (z.B. aus der Galvanik oder Textilverarbeitung) ist ohne zielgerichtete Aufbereitung nicht für die Wiederverwendung geeignet.

Standortspezifische Qualitätsanforderungen sollten auf einem vorsorgenden, risikobasierten Ansatz aufbauen, der mögliche Gefahren in dem geplanten Wasserwiederverwendungsvorhaben analysiert und effiziente Maßnahmen von der Quelle bis zur Exposition identifiziert. Wichtig ist eine Risikobewertung, die neben den abwasserbürtigen Schadstoffen alle relevanten Expositionspfade berücksichtigt, um zu identifizieren, welche Personengruppen und welche Schutzgüter (Boden, Grundwasser, Pflanzen) potenziell mit dem aufbereiteten Wasser in Kontakt kommen.

Ein systematischer Ansatz kann sich an der Herangehensweise der Water Safety-Pläne bzw. Sanitation Safety-Pläne der Weltgesundheitsorganisation (WHO) orientieren. Anhand dieser Methodik können potenzielle Gefahren in dem System analysiert, deren Risiko eingeschätzt, Maßnahmen für deren Beherrschung identifiziert und Monitoringkriterien abgeleitet werden, um somit auch den Erfolg der Risikominierungsmaßnahmen regelmäßig zu überprüfen. Für die effiziente und zuverlässige Risikoreduktion sind multiple Barrieren an verschiedenen Ansatzpunkten im Gesamtsystem nötig, einschließlich dem Einzugsgebiet, der Wasseraufbereitung, der Wasserspeicherung und -verteilung und der Anwendungspraxis. Es muss also an vielen Stellen eine regionale Einzelfallbewertung der Emissions- und der Immissionsseite vorgenommen werden. Erst wenn gewährleistet ist, dass kein Schaden für Mensch, Tier und Umwelt zu erwarten ist, kommt eine Wiederverwendung aufbereiteten Abwassers in Frage.

Sofern keine nationalen/regionalen Regelungen für Wasserwiederverwendung vorliegen, können die internationalen Standards der International Organization for Standardization (ISO) zur Orientierung dienen. Im Rahmen von ISO/TC 282 wurden Standards für die Wasserwiederverwendung für landwirtschaftliche Bewässerung, urbane Anwendungen sowie für Industrieabwasser erarbeitet. In dem von der DWA 2019 aktualisierten Themenband „Non-potable Water Reuse“ finden sich detaillierte Empfehlungen für Aufbereitungsprozesse und deren Kombination ^[8]. □

FALLSTUDIE: Textilindustrie in Indien

Kapazitätssteigerung der auf Sequentieller Biologischer Reinigung (SBR) basierenden Behandlung auf einer zentralen Abwasserreinigungsanlage

Hintergrund

Aktuell werden in der zentralen Abwasserreinigungsanlage (Common Effluent Treatment Plant – CETP) in Surat (Indien) 100.000 m³/Tag Abwasser behandelt. Da die Mitgliedsindustrien ihre Produktionskapazitäten erweitern, steigt sowohl der Wasserbedarf als auch die Abwassermenge. Die Abwasserreinigungsanlage wird daher in zwei Phasen erweitert, um einen Wasserbedarf von 200.000 m³/Tag abdecken zu können. Um die natürlichen Wasserressourcen zu schonen, haben sich die Mitgliedsunternehmen darauf geeinigt 100.000 m³/Tag aus der Abwasserreinigungsanlage wiederzuverwenden. Hier wird die Erweiterung der SBR-Anlage von 50.000 m³/Tag auf 80.000 m³/Tag vorgestellt, geplant und umgesetzt von der Firma Jäger Umwelt Technik GmbH.

Besondere Herausforderung/Problemstellung

Die vorhandene SBR-Anlage basiert auf dem C-Tech-Prozess (Cyclic Activated Sludge, entwickelt von SFC Umwelttechnik), welcher einen biologischen Selektor in jedem der sechs Becken hat. Der Prozess wurde zur BSB₅-Reduktion, Nitrifikation, Denitrifikation sowie zur biologischen Phosphoreliminierung konzipiert. Für die Modernisierung der Anlage sollten die bestehenden Becken modifiziert und Neubauten vermieden werden.

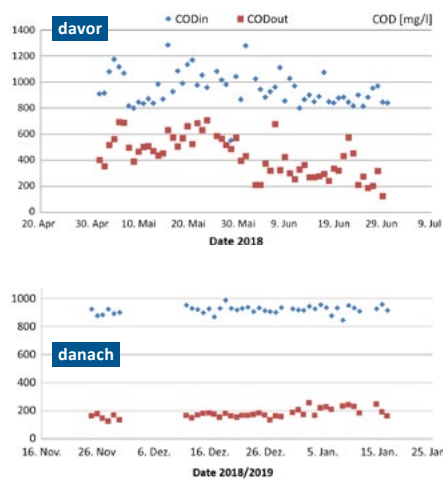


Abbildung 2: Zu- und Ablaufdaten des Beckens vor und nach der Inbetriebnahme der SBR-Anlage mit dem Biocurlz-Trägermaterial

Lösungsansatz

Ein Konzept zur Erweiterung der Anlage ohne Änderung ihrer Grundfläche besteht im Befüllen der vorhandenen Becken mit Trägermaterial, um die Biomassedichte durch die erweiterte spezifische Oberfläche zu erhöhen. Bei geeigneten Zulaufbedingungen und zuverlässiger Überwachung des stabilen Anlagenbetriebs stellt ein solches Biofilmverfahren eine platzsparende und robuste Option zur biologischen Abwasserreinigung

dar. Die zusätzlich benötigte Schlammmasse, genannt sessile Biomasse, wird durch Biofilmwachstum auf einem textilen Trägermaterial bereitgestellt. Diese zusätzliche Biomasse stellt die Leistungsstabilität der Anlage sicher. Die Anzahl der spezialisierten Bakterien steigt außerdem durch das hohe Schlammalter der sessilen Biomasse. Dies ermöglicht die Eliminierung der für Industrieabwässer typischen schwer abbaubaren Substanzen. Standardmäßig werden Sauerstoffkonzentration und pH-Wert in der Anlage überwacht, wie auch das Schlammvolumen täglich gemessen.

Das textile Trägermedium Cleartec Biocurlz, welches aus Polyvinylidenchlorid (PVDC) besteht, wurde hierfür ausgewählt und in Edelstahlkäfigen fest verbaut. Dieses hat sich auf vielen Anlagen weltweit als abwasserbeständig und wartungsfrei bewährt.



Abbildung 1: Eines von sechs SBR-Becken mit Biocurlz-Käfigen und feinblasigen Rohrbelüftern

Ergebnisse

Da die Abwasserzusammensetzung weder organischen Stickstoff noch Phosphor enthält, ist der biologische Selektor des C-Tech-Beckens überflüssig. Die Selektorzone, die etwa ein Fünftel jedes Beckens einnahm, wurde stattdessen als Teil des konventionellen SBR-Prozesses verwendet und steigerte das Gesamtvolumen der Anlage.

Schließlich wurden 360 Edelstahlkäfige mit einer Gesamtlänge von über zwei Mio. m Biocurlz auf sechs Becken verteilt. 8.640 feinblasige JetFlex®-Rohrbelüfter wurden installiert, um eine effiziente Belüftung zu gewährleisten (Abb. 1).

Der Schlammvolumenindex (SVI) dieses Prozesses von <120 ml/g kennzeichnet eine hervorragende Absetzbarkeit des Schlammes, wovon die nachgeschaltete Ultrafiltrationsanlage profitiert. Insgesamt besteht die Nachbehandlung aus einer Flotation, Scheibenfiltration, Ultrafiltration und Umkehrosmose.

Abb. 2a) zeigt Messdaten zwischen Mai und Juli 2018, kurz bevor die Erweiterungsmaßnahmen begonnen wurden. Im Durchschnitt beträgt die CSB-Konzentration im SBR-Zufluss 950 mg/l, im Abfluss 430 mg/l. Dies entspricht einer Abbaurrate von etwa 55 %. Abb. 2b) zeigt Messdaten zwischen November 2018 und Januar 2019, nachdem die Erweiterungsmaßnahmen abgeschlossen waren. Neben der SBR-Anlage verbesserte sich auch die Vorbehandlung des Abwassers, sodass die CSB-Schwankungen im

Zufluss der SBR-Anlage signifikant verringert wurden. Im Durchschnitt beträgt die CSB-Konzentration im Zufluss der SBR-Anlage 920 mg/l, während die kombinierte Cleartec-SBR-Behandlung eine CSB-Reduktion im Schnitt auf 180 mg/l erreicht (Tab. 1). Das entspricht einer Abbaurrate von über 80 %.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Die modernisierte Anlage erreicht einen sehr guten und stabilen Abbau der Abwasserorganik bei minimalem Platzbedarf. Durch den Einbau von Trägermaterial wurde die Anzahl spezialisierter Bakterien erhöht. Diese entfernen ansonsten schwer abbaubare Stoffe und führen zu einer deutlichen Senkung der Ablaufkonzentrationen. Nachgelagerte Reinigungsstufen profitieren zusätzlich von der verbesserten Absetzbarkeit des biologischen Schlammes. □

Parameter	Zulauf	Ablauf
pH	6,5–8,5	7,5–7,8
CSB [mg/l]	950–1.400	140–230
BSB5 [mg/l]	300–500	-
Feststoffe [mg/l]	300	40–60

Tabelle 1: Übersicht über Zu- und Ablaufwerte der Abwasserbehandlung

FALLSTUDIE: Abwasserbehandlung in Industriegebieten in Marokko

Schlüsselfertiger Bau der Kläranlage „Industriegebiet Nouaceur“ in Casablanca

Hintergrund

Die Regierung des Königreichs Marokko hat entschieden, die marokkanischen Industriegebiete hinsichtlich der Abwasseraufbereitung zu modernisieren, um die neuen Einleitungsvorschriften zu erfüllen. Hierbei wird der nationale und regionale Trend, eigenständige Industrieabwasserbehandlungsanlagen zu errichten, um das aufbereitete Abwasser der Wiederverwendung und/oder einer umweltgerechten Einleitung in einen Vorfluter zuzuführen, berücksichtigt. Die von der Regierung verfolgte Politik zielt darauf ab, bestehende Industriegebiete mit spezifischen, an den jeweiligen Industriepark angepassten, Kläranlagen auszustatten, die zur umweltgerechten Abwasserbehandlung und gleichzeitig zur Entlastung der kommunalen Entwässerungsinfrastruktur beitragen.

Parameter	Einheit	Anlagen-Zulauf	Anlagen-Ablauf
Mittlerer Zufluss	m³/Tag	2.000	-
Max. Zufluss Vorbehandlung	m³/h	400	-
Max. Zufluss biologische Behandlung	m³/h	200	-
BSB5	mg/l	400	≤ 25
CSB	mg/l	1.200	≤ 120
TS	mg/l	600	≤ 20
N gesamt	mg/l	200	≤ 15
N-Kjeldahl	mg/l	150	≤ 8
P gesamt	mg/l	30	≤ 2

Tabelle 1: Bemessungsparameter und die zu erreichenden Ablaufwerte des gereinigten Abwassers der Kläranlage „Industriegebiet Nouaceur“, Marokko

Der Standort des Projektes Kläranlage „Industriegebiet Nouaceur“ befindet sich in der Region Casablanca, im 285 ha großen Industriepark SAPINO. Hier sind mehr als 400 Unternehmen der unterschiedlichsten Branchen angesiedelt, u.a. Herstellung von glasfaserverstärkten Kunststoffrohren, Verpackungsherstellung, Lebensmittelindustrie, Herstellung von Aluminiumdosen, Batterieherstellung, Großwäschereien, Metallverarbeitung, Waschmittelherstellung sowie Dienstleister und Handelsbetriebe.

Der Projektträger ist das marokkanische Ministerium für Industrie, Handel und grüne und digitale Wirtschaft (MICEVN). Dieses hat das Projekt dem Unternehmen LYDEC, zuständig für die Trinkwasserversorgung, Kanalisation, Stromverteilung und öffentliche Beleuchtung in der Region Casablanca, anvertraut. Auftragnehmer ist ein von der PWT Wasser- und Abwassertechnik GmbH geführtes Konsortium.

Besondere Herausforderung

Industrien sind verpflichtet Abwasser lokal vorzubehandeln, dies kann eine mechanische wie auch eine chemische Vorbehandlung sein. Der Auftraggeber LYDEC führte zunächst eine Messkampagne durch. Die untersuchten Parameter waren die in der Tabelle 1 angegebenen Parameter zuzüglich der elektrischen Leitfähigkeit. Die Festlegung der Auslegungsparameter für die Behandlungsanlage erfolgte unter Berücksichtigung einer eventuellen Erweiterung und /oder Veränderung der Besiedlung des Gebietes. Des Weiteren wurde berücksichtigt, dass anfallende Spitzenzuflüsse gehandhabt werden können. Das von der PWT erarbeitete und umgesetzte Konzept enthält ein zur Vergleichmäßigung von Spitzenzuflüssen und zur Zwischenspeicherung von kontaminiertem Abwasser notwendiges Pufferbecken und sieht Möglichkeiten für zukünftige Erweiterungen vor.

Lösungsansatz

Bei der Kläranlage Nouaceur handelt es sich um eine Belebtschlammanlage mit aerober und simultaner Schlammstabilisierung in Umlaufbecken. Die Abwasserbehandlung besteht aus einer mechanischen Vorbehandlung (Grobrechen vor dem Hebewerk, Feinrechen und belüfteter Sand- und Fettfang), einem Pufferbecken zur Aufnahme von Spitzenzuflüssen oder kontaminiertem Abwasser, einer biologischen Behandlung mit simultaner Denitrifikation und Nachklärung, einer chemischen Phosphor-Elimination, sowie einer Desinfektion mit Natriumhypochlorit vor der Einleitung in den Oued Merikane. Die Erweiterung der Anlage um eine weitere Reinigungsstufe mit Sandfiltration und UV-Desinfektion zur Wiederverwendung für die Bewässerung von Grünflächen, wird derzeit geprüft.

Die Schlammbehandlung umfasst die mechanische Entwässerung des Schlammes mit Zentrifugen und die Konditionierung und Hygienisierung durch Kalkzugabe vor der Entsorgung in die städtische Abfalldeponie. Aufgrund des Standortes der Kläranlage in einem dicht besiedelten Gebiet sind die entsprechenden Gewerke mit moderner Ausrüstung zur Geruchsbehandlung und Lärminderung ausgestattet. In Tab. 1 sind die Bemessungsparameter und die zu erreichenden Ablaufwerte des gereinigten Abwassers aufgeführt.

Abbildung 1: Belebungsbecken der Industriekläranlage in Nouaceur, Marokko, im Bau



Technische Maßnahmen zum Umgang mit unvorhersehbaren Schwankungen

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen:

- Das gewählte Behandlungsverfahren mit einem Pufferbecken für Spitzenzuflüsse bzw. für kontaminierte Abwässer bietet ein gewisses Maß an Flexibilität in Fällen, in denen die Menge /die Qualität der Abwässer schwer vorhersehbar ist.
- Die Lösung sieht den Einbau korrosionsbeständiger Werkstoffe vor, da aufgrund der Nähe des Projektstandorts zum Meer höhere Salzgehalte im Abwasser auftreten können.
- Im Zulaufbereich der Kläranlage sind eine Kohlenwasserstoffmessung sowie pH- und Leitfähigkeitsmessungen installiert, so dass ungewöhnliche Abwässer identifiziert und in den Puffertank geleitet werden können. Abhängig vom Ergebnis der Untersuchung des gespeicherten Wassers kann es dann der Behandlung zugeführt oder gemäß den Umweltvorschriften entsorgt werden.

Ergebnisse

Die Bauarbeiten der Kläranlage im Industriegebiet Nouaceur sind derzeit im Gange. Abb. 1 zeigt die errichteten Belebungsbecken.

Beitrag der bereitgestellten Technologie

Die hier bereitgestellte Anlage umfasst die vollständige mechanische, biologische und chemische Abwasserbehandlung. Besondere Beachtung fanden dabei die speziellen Anforderungen einer Industriekläranlage verschiedenster Einleiter, z.B. hohe Anlagenflexibilität und -sicherheit, sowie die entsprechende messtechnische Überwachung des Anlagenbetriebs. □

11

AUSBLICK

AUF INTERNATIONALE TRENDS IN DER BEHANDLUNG VON INDUSTRIEABWASSER





Die zunehmende Ressourcenknappheit und wachsende Relevanz des Umweltschutzes stellen die industrielle Abwasseraufbereitung im 21. Jahrhundert vor besondere Herausforderungen. Trotz regional unterschiedlicher politischer, geografischer und sozioökonomischer Rahmenbedingungen lassen sich in der Behandlung von Industrieabwässern übergreifende Entwicklungen identifizieren. Beste verfügbare Technik (BVT)-Merkblätter, die für alle relevanten Industriebranchen den Stand der Technik zum umweltfreundlichen und ressourcenschonenden Anlagenbetrieb dokumentieren, können außerdem als Grundlage zur Formulierung richtungsweisender Empfehlungen dienen ^[224].

Industrielle Abwasserreinigung

In Abhängigkeit der Rahmenbedingungen und der enthaltenen Verunreinigungen können industrielle Abwasserströme ohne Vorbehandlung in Oberflächengewässer abgeleitet, in das kommunale Abwassernetz eingespeist oder auf industriellen Kläranlagen (vor-)behandelt werden. Durch die gemeinsame Behandlung von industriellem und kommunalem Abwasser können unter bestimmten Voraussetzungen Synergien genutzt werden (z.B. Verfügbarkeit von Nährstoffen). In den meisten Fällen ist dem jedoch eine getrennte Abwasseraufbereitung vorzuziehen, v.a. wenn (branchenbezogene) Mindestanforderungen an die Abwasserqualität eingehalten werden sollen. In Industriebetrieben fallen oft zeitlich variierende Abwasserströme veränderlicher Qualität an, die ggf. persistente oder umweltgefährliche Stoffe enthalten – den damit einhergehenden Herausforderungen kann nur eine standortspezifische, gezielt ausgelegte industrielle Abwasserreinigung gerecht werden ^[22].

Vermehrt ist der Bau von CETPs zu beobachten, die eine effiziente und robuste Abwasseraufbereitung bei zugleich minimalem Aufwand für die einzelnen einleitenden Industriebetriebe ermöglichen. Solche Anlagen sehen sich oft mit einer komplexen und variablen Mischung unterschiedlicher Abwasserströme konfrontiert, sodass neben einem flexiblen Anlagenbetrieb auch eine enge Zusammenarbeit mit den industriellen Einleitern unerlässlich ist. In den meisten Fällen ist es zweckdienlich und notwendig, einzelne Abwasserströme vor der Einleitung in die

zentrale Industriekläranlage unter Berücksichtigung der jeweiligen Zusammensetzung gezielt vorzubehandeln und diese Behandlung vom Anlagenbetreiber zu überwachen ^[221].

Wassereffizienz auf Betriebsebene

Besonders in Regionen mit Wasserknappheit – aber zunehmend auch darüber hinaus – ist für viele Produktionsstandorte die Erhöhung ihrer Wassereffizienz von Priorität. Wichtiger Treiber hierfür ist neben der Kostensenkung für Frischwasser, Energie und Abwasserentsorgung oft auch eine gesellschaftlich-ökologische Motivation. Auch die Definition des „Stand der Technik“ berücksichtigt den sparsamen Umgang mit Wasser in der Industrie.

Wichtigste Grundlage zur Verbesserung der Wassereffizienz ist die Wieder- und Weiterverwendung der anfallenden Prozess(ab-)wässer. Je nach verfügbarer und erforderlicher Wasserqualität können Wasserströme prozessintern, mit oder ohne interne Vorbehandlung rezykliert, produktionsnah wiederverwendet oder in anderen Anwendungen weiterverwendet werden (z.B. Grünflächenbewässerung oder als Löschwasser). Die Wasserrückgewinnung geht üblicherweise mit einer vergleichsweise aufwändigen Aufbereitung einher und ist besonders unter folgenden Bedingungen eine sinnvolle Option ^[22]:

- wenn dadurch der Bedarf an Frischwasser oder Energie gesenkt werden kann
- wenn sich abgetrennte Stoffe ökologisch, ökonomisch und technisch lohnend wieder- oder weiterverwenden lassen
- wenn der verringerte Abwasseranfall die nachgelagerte Abwasserreinigung oder unmittelbar die aquatische Umwelt entlastet

Ein vollständig abwasserfreier Betrieb („Zero Liquid Discharge“) kann durch die Kombination von abwasserfreien Produktionsverfahren (z.B. Trockenlackierung) und einer optimierten innerbetrieblichen Wasserrückgewinnung erreicht werden. Abwasserlose Verfahren arbeiten typischerweise nach dem Prinzip der weitestgehenden Aufkonzentrierung (z.B. Umkehrosmose, Eindampfen oder Kristallisation). Es handelt sich hierbei um anspruchsvolle Technologien, die in der Regel mit einem erhöhten Energieverbrauch und entsprechend hohen Behand-



lungskosten einhergehen ^[225]. Diese Aufwendungen reduzieren sich entsprechend, wenn das Abwasser bereits vorher umfassend behandelt worden ist.

Eine hohe Wassereffizienz lässt sich allerdings nicht allein mit nachgelagerten Maßnahmen zur Abwasserreinigung und -rückgewinnung erreichen – stattdessen gewinnen heute prozessintegrierte Ansätze unter Berücksichtigung verschiedener Ressourcenströme (z.B. Frischwasser, Abwasser, Rohstoffe und Energie) und medienübergreifender Aspekte an Bedeutung. Als Stand der Technik gelten heute etwa optimierte Reinigungsprozesse (ortsgebundene Reinigung bzw. *cleaning in place*, sog. CIP-Anlagen) zur Minimierung von Produktverlusten, Frischwasserbedarf und Chemikalieneinsatz, sowie eine sinnvolle Trennung von Abwasserströmen und Verunreinigungsgrade. Auf organisatorischer Ebene können die optimierte Planung von Produkt- und Reinigungsreihenfolgen, eine quantitative Prozessbilanzierung und -kontrolle und regelmäßige Mitarbeiterschulungen zur verringerten Abwasserbelastung beitragen ^[226, 227].

Wassermanagement der Zukunft

Neben einem Qualitäts- und Energiemanagementsystem haben die meisten Unternehmen heute ebenfalls ein Umweltmanagementsystem eingerichtet, um die systematische Umsetzung von Umweltschutzmaßnahmen zu unterstützen. Neben dem Aufbau und Betrieb der erforderlichen Abwasseraufbereitungsanlagen deckt das betriebliche Umweltmanagement auch die entsprechende Qualitätskontrolle, wie etwa die Einhaltung der

Einleitgrenzwerte, und die Risikobeurteilung, beispielsweise im Falle unfallbedingter Emissionen, ab. Eine grundlegende Voraussetzung für effizientes (Ab-)Wassermanagement ist die Erfassung der Volumenströme und Parameter aller relevanten Wasserflüsse am Standort (z.B. pH-Wert, Temperatur, CSB). Dies erfolgt heute üblicherweise über Online-Sensoren, die bereits eine gewisse Prozessautomatisierung ermöglichen ^[224, 228].

Die Fortschritte im Bereich der Sensorik, IT-Schnittstellen und Datenverarbeitung werden zukünftig eine weitere Vernetzung und Verbesserung der Prozesseffizienz ermöglichen. Die Digitalisierung wird mittelfristig u.a. durch folgende Aspekte zur Optimierung industrieller Abwassersysteme beitragen:

- Verfügbarkeit hoch aufgelöster Prozessdaten dank Online-Sensorik
- Intelligente Netzsteuerung und Automatisierung von Leitstellen
- Ausbau von Analysefähigkeiten durch Big Data bzw. Smart Data
- Kopplung mit Umweltdaten wie Klima, Wasserverfügbarkeit, Wärmelasten
- Prädiktive Strategien zum Anlagenbetrieb und zur Zustandsüberwachung
- Automatisierung von Frühwarn- und Entscheidungsprozessen

Die flächendeckende Umsetzung digitaler Ansätze wird davon abhängen, wie die hohen Anforderungen an IT-Sicherheit und Datenschutz erfüllt werden können und welche standardisierten Schnittstellen sich zur Datenübertragung durchsetzen ^[229, 230]. □

Bibliografie

- [1] United Nations, „Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development,“ 2016 Januar 01. [Online].
Available: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. [Accessed 2020 November 02].
- [2] World Bank, „World Bank Data,“ 2020. [Online].
Available: <https://data.worldbank.org/country/india>. [Accessed 1 Oktober 2020].
- [3] Global Water Intelligence, „GWI Water Data,“ 26 August 2020. [Online].
Available: <https://www.gwiwaterdata.com/>.
- [4] T. Desai, Interviewee, Founder and Chairman, Geostone group of companies – Industrial Water Treatment in India. [Interview]. 20 Juni 2020.
- [5] World Bank, „The World Bank Data,“ 2020. [Online].
Available: <https://data.worldbank.org>. [Accessed 01 Oktober 2020].
- [6] M. Ayaserah, Interviewee, Director of Energy and Environmental Sustainability, Jordanian Chamber of Industries – Environmental Technologies for Industrial Wastewater Treatment in the MENA region. [Interview]. 01 September 2020.
- [7] M. Khashashneh, Interviewee, Secretary General, Ministry of Environment Jordan – Industrial Wastewater Treatment in Jordan. [Interview]. 01 September 2020.
- [8] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, „DWA Topics – Non-potable Water Reuse,“ DWA, 2019.
- [9] India Brand Equity Foundation, „Indian Oil and Gas Industry Report,“ 2019.
- [10] India Brand Equity Foundation, „IBEF,“ IBEF, 01 März 2020. [Online].
Available: <https://www.ibef.org/industry/oil-gas-india/showcase>. [Accessed 22 September 2020].
- [11] U.S. Energy Information Administration, „Analysis India,“ [Online].
Available: <https://www.eia.gov/international/overview/country/IND>. [Accessed 04 Mai 2020].
- [12] U.S. Energy Information Administration, „Analysis Egypt,“ [Online].
Available: <https://www.eia.gov/international/overview/country/EGY>. [Accessed 04 Mai 2020].
- [13] Universal Solutions, „Gulf Oil and Gas,“ [Online].
Available: <https://www.gulfoilandgas.com/webpro1/prod1/suplista.asp?id=327&yx1=EG>. [Accessed 22 September 2020].
- [14] Mbendi, „Tunisia: Oil and gas industry,“ [Online].
Available: <https://mbendi.co.za/cytuoi.htm>. [Accessed 04 Mai 2020].
- [15] U.S. Energy Information Administration, „Analysis Tunisia,“ [Online].
Available: <https://www.eia.gov/international/overview/country/TUN>. [Accessed 04 Mai 2020].
- [16] Office National Des Hydrocarbon et des Mines, [Online].
Available: <http://www.onhym.com/en/partnership-and-cooperation/list-of-partners.html>. [Accessed 22 September 2020].
- [17] Y. Abul-Failat, „The oil and gas sector in Jordan – an overview,“ vol. 11, no. 3, 2013.

- [18] U.S. Energy Information Administration, „Analysis Morocco,“ [Online]. Available: <https://www.eia.gov/international/overview/country/MAR>. [Accessed 04 Mai 2020].
- [19] U.S. Energy Information Administration, „International Energy Statistics,“ [Online]. Available: <https://www.eia.gov/international/data/world>. [Accessed 04 Mai 2020].
- [20] Central Intelligence Agency, „Library – The World Factbook – Africa: Morocco,“ 2018 Januar 01. [Online]. Available: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/mo.html>. [Accessed 02 November 2020].
- [21] Central Intelligence Agency, „Library – The World Factbook – Middle East: Jordan,“ Central Intelligence Agency, 2018 Januar 01. [Online]. Available: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/jo.html>. [Accessed 02 November 2020].
- [22] K.-H. Rosenwinkel, U. Austermann-Haun, S. Köster and M. Beier, Taschenbuch der Industrieabwasserreinigung, Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2020.
- [23] IPIECA, „Identifying and assessing water sources,“ IPIECA, 2014.
- [24] A. Fakhru’l-Razi, A. Pendashtesh, A. Luqman Chuah, D. Radiah, S. Siavash Madaeni and Z. Zainal Abidin, „Review of technologies for oil and gas produced water treatment,“ Journal of hazardous materials, vol. 170, no. 2–3, 2009.
- [25] European Commission, „Best Available Techniques Guidance Document on upstream hydrocarbon exploration and production,“ European Commission, Luxembourg, 2019.
- [26] J. Pichtel, „Oil and gas production wastewater: Soil contamination and pollution prevention,“ Applied and Environmental Soil Science, no. 8, 2016.
- [27] IFC, World Bank, „Environmental, Health, and Safety Guidelines for Onshore Oil and Gas Development, Draft Revised Version,“ World Bank Group, 2017.
- [28] IFC, World Bank, „Environmental, Health, and Safety Guidelines for Onshore Oil and Gas, April 2007,“ World Bank Group, 2007.
- [29] European Commission, „Best Available Techniques Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas,“ European Commission, Luxembourg, 2015.
- [30] B. Alireza, „Wastewater treatment in the unconventional oil and gas industries,“ in Waste Management in the Chemical and Petroleum Industries, John Wiley & Sons Ltd, 2019.
- [31] X. Wei, S. Zhang, Y. Han and F. A. Wolfe, „Treatment of petrochemical wastewater and produced water from oil and gas,“ Water Environment Research, vol. 91, no. 10, 2019.
- [32] M. Nasiri, I. Jafari and B. Parniankhoy, „Oil and gas produced water management: A review of treatment technologies, challenges, and opportunities,“ Chemical Engineering Communications, vol. 204, no. 8, 2017.
- [33] IPIECA, „Efficiency in water use. Guidance document for the upstream onshore oil and gas industry,“ IPIECA, London, 2014.
- [34] T. Dadhanian, „Indian Chemical Industry: Accelerating Growth,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.maiervidorno.com/indian-chemical-industry-accelerating-growth>. [Accessed 21 April 2020].

- [35] Statista, „Chemical industry in India – Statistics & Facts,“ [Online]. Available: <https://www.statista.com/topics/5601/chemical-industry-in-india/>. [Accessed 22 September 2020].
- [36] global markets international, [Online]. Available: <https://www.globalmarketsinternational.com/latestmarketpost/egypt-chemical-industry-companies-projects-petrochemical-agrochemical-pharmaceutical/>. [Accessed 22 September 2020].
- [37] D. Farid, „Egypt’s chemicals sector to boom on more projects underway,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.egypttoday.com/Article/3/34268/Egypt-s-chemicals-sector-to-boom-on-more-projects-underway>. [Accessed 05 Mai 2020].
- [38] OECD, „OECD Economic Survey Tunisia,“ OECD, 2018.
- [39] K. El Mokri, „Morocco’s 2014–2020 industrial strategy and its potential implications for the structural transformation process,“ 2016.
- [40] S. El Ouahabi and A. Bousselhami, „The productivity of the Moroccan industrial sector analysis. Econometric modeling,“ International Journal of Scientific Research and Innovative Technology, vol. 4, no. 1, 2017.
- [41] World Bank, „Manufacturing, value added (% of GDP),“ 2018. [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.ZS?view=map>. [Accessed 06 Mai 2020].
- [42] World Bank, „Chemicals (% of value added in manufacturing),“ 2018. [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/NV.MNF.CHEM.ZS.UN>. [Accessed 06 Mai 2020].
- [43] TechnoFunc, „Sectors of Chemical Industry,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.technofunc.com/index.php/domain-knowledge/item/sectors-of-chemical-industry>. [Accessed 06 Mai 2020].
- [44] I. Muralikrishna and V. Manickam, „Industrial wastewater treatment technologies, recycling and reuse,“ in Environmental Management, Elsevier Inc., 2017.
- [45] European Commission, „Best Available Techniques Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas,“ European Commission, Luxembourg, 2015.
- [46] European Commission, „Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers,“ European Commission, Luxembourg, 2007.
- [47] Y. Mikhak, M. M. Torabi and A. Fouladitajar, „Refinery and petrochemical wastewater treatment,“ in Sustainable Water and Wastewater Processing, Elsevier Inc., 2019.
- [48] European Commission, „Best Available Techniques Reference Document for the production of large volume organic chemicals,“ European Commission, Luxembourg, 2017.
- [49] M. Gouider, M. Feki and S. Sayadi, „Treatment of wastewaters from phosphate fertilizer industry,“ Environmental Progress & Sustainable Energy, vol. 33, no. 2, 2013.
- [50] European Commission, „Reference Document on Best Available Techniques for the manufacture of large volume inorganic chemicals – Ammonia, acids and fertilisers,“ European Commission, Luxembourg, 2007.
- [51] H. A. Aziz, M. F. Ghazali and M. S. Yusoff, „Waste treatment and management in chlor-alkali industries,“ in Waste treatment in the service and utility industries, CRC Press, 2017.

- [52] European Commission, „Best Available Techniques Reference Document for the production of chlor-alkali,“ European Commission, Luxembourg, 2014.
- [53] European Commission, „Reference Document on Best Available Techniques for the manufacture of large volume inorganic chemicals – Solids and others industry,“ European Commission, Luxembourg, 2007.
- [54] European Commission, „Best Available Techniques Reference Document for common waste water and waste gas treatment/management systems in the chemical sector,“ European Commission, Luxembourg, 2016.
- [55] M. Awaleh and Y. Soubaneh, „Wastewater treatment in chemical industries: The concept and current technologies,“ *Hydrology Current Research*, vol. 5, no. 1, 2014.
- [56] India Brand Equity Foundation, „Indian Pharmaceuticals Industry Analysis,“ [Online]. Available: www.ibef.org/industry/pharmaceutical-india.aspx. [Accessed 25 Mai 2020].
- [57] e-Eighteen.com, „money control,“ [Online]. Available: <https://www.moneycontrol.com/stocks/marketinfo/marketcap/bse/pharmaceuticals-drugs.html>. [Accessed 22 September 2020].
- [58] R. Raghavan and J. Joshi, „India’s Expanding Chemical Industry,“ [Online]. Available: www.aiche.org/resources/publications/cep/2018/december/indias-expanding-chemical-industry. [Accessed 25 Mai 2020].
- [59] V. Rees, „Limiting antibiotic manufacturing discharge in Indian wastewater,“ 12 März 2020. [Online]. Available: www.europeanpharmaceuticalreview.com/article/115074/limiting-antibiotic-manufacturing-discharge-in-indian-wastewater. [Accessed 25 Mai 2020].
- [60] CHEManager International, „MENA Pharmaceutical Market,“ 03 Dezember 2018. [Online]. Available: www.chemanager-online.com/en/topics/economy-business/mena-pharmaceutical-market. [Accessed 25 Mai 2020].
- [61] D. Moneim, „Egypt’s pharmaceutical industry suffering, multinational companies have lion’s share: SHUAA Securities report,“ 08 Januar 2020. [Online]. Available: <http://english.ahram.org.eg/News/359141.aspx>. [Accessed 25 Mai 2020].
- [62] The Middle East Observer, „The Pharmaceutical industry: A challenge worth the investment,“ 28 November 2017. [Online]. Available: www.meobserver.org/?p=14679. [Accessed 25 Mai 2020].
- [63] PharmaBoardroom, „Pharma Boardroom,“ [Online]. Available: <https://pharmaboardroom.com/facts/top-10-pharma-companies-in-morocco-ranking/>. [Accessed 22 September 2020].
- [64] G. Miglierini, „Morocco: The opportunities for the pharmaceutical industry,“ 20 April 2018. [Online]. Available: www.pharmaworldmagazine.com/from-morocco-the-opportunities-for-the-pharmaceutical-industry. [Accessed 25 Mai 2020].
- [65] Oxford Business Group, „Tunisian pharmaceutical industry is looking to export more,“ [Online]. Available: <https://oxfordbusinessgroup.com/analysis/good-shape-local-pharmaceutical-industry-looking-export-more>. [Accessed 25 Mai 2020].
- [66] M. Alomari and N. Saqfalhait, „Analyzing the structure of Jordanian pharmaceutical industry,“ *European Journal of Social Sciences*, vol. 49, no. 1, 2015.

- [67] C. Gadipelly, A. Pérez-González, G. Yadav, I. Ortiz, R. Ibáñez, V. Rathod and K. Marathe, „Pharmaceutical industry wastewater: Review of the technologies for water treatment and reuse,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 29, 2014.
- [68] Environmental Protection Agency Ireland, „BAT Guidance Note on best available techniques for pharmaceutical and other specialty organic chemicals,” Wexford, 2008.
- [69] P. Pal, „Treatment and disposal of pharmaceutical wastewater: Toward the sustainable strategy,” *Separation & Purification Reviews*, vol. 47, no. 3, 2018.
- [70] K. Ikehata, N. Naghashkar and M. El-Din, „Degradation of aqueous pharmaceuticals by ozonation and advanced oxidation processes: A review,” *The Journal of the International Ozone Association*, vol. 28, no. 6, 2006.
- [71] R. Rana, P. Singh, V. Kandari, R. Singh, R. Dobhal and S. Gupta, „A review on characterization and bioremediation of pharmaceutical industries’ wastewater: An Indian perspective,” *Applied Water Science*, vol. 7, no. 1-12, 2017.
- [72] A. Deegan, S. Basha, K. Nolan and K. Urell, „Treatment options for wastewater effluents from pharmaceutical companies,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 8, no. 3, 2011.
- [73] India Brand Equity Foundation, „Indian Metals and Mining Industry Analysis,” 21 Oktober 2020. [Online]. Available: <https://www.ibef.org/industry/metals-and-mining-presentation>. [Accessed 02 November 2020].
- [74] M. Jaganmohan, „Volume of chromite production in India from 2010 to 2019,” Statista, 10 Oktober 2020. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/667460/india-chromite-production-volume/>. [Accessed 29 Oktober 2020].
- [75] Feedback Business Consulting Services, „Overview of the mining industry in India,” Virginia Economic Development Partnership, 2014.
- [76] Indian Bureau of Mines, „Guidelines for preparation of Mine Closure Plan,” 2020. [Online]. Available: <https://ibm.gov.in/index.php?c=pages&m=index&id=214>. [Accessed 11 Mai 2020].
- [77] MBendi, „Morocco: Mining industry,” [Online]. Available: <https://mbendi.co.za/indy/ming/af/mo/p0005.htm>. [Accessed 07 Mai 2020].
- [78] K. Tarawneh, „A comprehensive outlook of mining industry in Jordan, opportunities and threats,” *Open Journal of Geology*, vol. 6, 2016.
- [79] S. El Wardany, „Egypt Eyes Gold Rush With Fresh Exploration Tender by March,” 17 Februar 2020. [Online]. Available: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-02-17/egypt-to-hold-new-gold-exploration-tender-after-terms-eased>. [Accessed 11 Mai 2020].
- [80] European Commission, „Best Available Techniques Reference Document for the management of waste from extractive industries,” European Commission, Luxembourg, 2018.
- [81] D. Mohapatra and D. Kirpalani, „Process effluents and mine tailings: Sources, effects and management and role of nanotechnology,” *Nanotechnology for Environmental Engineering*, vol. 2, 2017.
- [82] G. Reta, X. Dong, Z. Li, B. Su, X. Hu, H. Bo, D. Yu, H. Wan, J. Liu, Y. Li, G. Xu, K. Wang and S. Xu, „Environmental impact of phosphate mining and beneficiation: review,” *International Journal of Hydrology*, vol. 2, no. 4, 2018.

- [83] H. Dharmappa and M. Sivakumar, „Wastewater characteristics, management and reuse in mining & mineral processing industries,” in *Wastewater recycle, reuse, and reclamation*, Encyclopedia of Life Support Systems, 2002.
- [84] M. Acheampong, „Sustainable gold mining wastewater treatment by sorption using low-cost materials,” Wageningen, 2013.
- [85] Careerizma, „Food and Beverage Industry in India & Abroad,” [Online]. Available: www.careerizma.com/industries/food-and-beverage. [Accessed 22 Juni 2020].
- [86] IBEF, „Indian Food Processing,” November 2019. [Online]. Available: www.ibef.org/industry/indian-food-industry/showcase. [Accessed 22 Juni 2020].
- [87] Grant Thornton, „Indian Food & Beverage Sector,” 2014.
- [88] A. Krishnamurthy, „Country Profile India,” März 2019. [Online]. Available: www.gwiwaterdata.com/markets/countries/india#card-138738. [Accessed 22 Juni 2020].
- [89] Index Mundi, „India Wheat Production by Year,” [Online]. Available: www.indexmundi.com/agriculture/?country=in&commodity=wheat&graph=production. [Accessed 22 Juni 2020].
- [90] Goldstein Research, „India Rice Industry Analysis,” 2020.
- [91] FAO, „National Aquaculture Sector Overview India,” [Online]. Available: www.fao.org/fishery/countrysector/naso_india/en. [Accessed 22 Juni 2020].
- [92] H. Ritchie and M. Roser, „Meat and Dairy Production,” November 2019. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/meat-production>. [Accessed 22 Juni 2020].
- [93] Ministry of Agriculture and Farmers Welfare, Government of India, „Agricultural Statistics at a Glance 2019,” Directorate of Economics & Statistics, Government of India, India, 2020.
- [94] Statista, „Rice – India,” 2020. [Online]. Available: <https://www.statista.com/outlook/40060200/119/rice/india>. [Accessed 03 November 2020].
- [95] Ministry of Agriculture & Farmers’ Welfare, Government of India, „Horticultural Statistics at a Glance 2018,” Government of India, New Delhi, 2018.
- [96] Statista, „Meat – India,” Statista, 2020. [Online]. Available: <https://www.statista.com/outlook/40140000/119/meat/india>. [Accessed 03 November 2020].
- [97] Statista, „Rice – India,” Statista, 2020. [Online]. Available: <https://www.statista.com/outlook/40060200/119/rice/india>. [Accessed 03 November 2020].
- [98] Sandhya Keelery, „Value of wheat exported from India between financial year 2015 and 2020,” statista, 16 10 2020. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/652172/export-value-of-wheat-india/>. [Accessed 01 11 2020].
- [99] A. Abdallah, V. Donnaløj, C. Gregg, C. Hofmann and B. Tumurchudur Klok, „Skills for trade and economic diversification in Egypt – Food processing sector,” International Labour Organization, Genf, 2015.
- [100] L. Hundaileh and F. Fayad, „Jordan’s food processing sector analysis and strategy for sectoral improvement,” Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, 2019.
- [101] T. Fileccia, V. Hovhera, I. Punda and S. Manzo, „Jordan Water along the food chain,” Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom, 2015.

- [102] M. Samir, „Egypt’s food industry achieved \$22.5bn revenues in 2017: USDA,“ 15 Januar 2018. [Online]. Available: www.dailynewssegypt.com/2018/01/15/egypts-food-industry-achieved-22-5bn-revenues-2017-usda/. [Accessed 23 Juli 2020].
- [103] Ecomnews, „The importance of Morocco’s food industry,“ 27 März 2020. [Online]. Available: <http://ecomnewsmed.com/article/5347/the-importance-of-moroccos-food-industry---->. [Accessed 23 Juli 2020].
- [104] International Trade Administration, „Tunsia – Agricultural Sector,“ 14 7 2019. [Online]. Available: <https://www.export.gov/apex/article?id=Tunisia-Agricultural-Sector>. [Accessed 09 03 2021].
- [105] R. McIlvaine, „Water & Wastewater treatment in the food industry,“ 07 Juli 2015. [Online]. Available: www.wwdmag.com/industrial-water-wastes-digest/water-wastewater-treatment-food-industry. [Accessed 25 Juni 2020].
- [106] Water Technology, „Wastewater treatment challenges in food processing and agriculture,“ 31 August 2018. [Online]. Available: www.watertechonline.com/wastewater/article/15550688/wastewater-treatment-challenges-in-food-processing-and-agriculture. [Accessed 25 Juni 2020].
- [107] A. u. A. e. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, „Merkblatt DWA-M 708 Abwasser aus der Milchverarbeitung,“ DWA, Hennef, 2011.
- [108] A. Slavov, „General characteristics and treatment possibilities of dairy wastewater – A review,“ Food Technology and Biotechnology, vol. 55, no. 1, 2017.
- [109] B. Sarkar, P. Chakrabarti, A. Vijaykumar and V. Kale, „Wastewater treatment in dairy industries – possibility of reuse,“ Desalination, vol. 195, no. 1–3, 2006.
- [110] J.-H. Tay, K.-Y. Show and Y.-T. Hung, „Seafood processing wastewater treatment,“ in Waste treatment in the food processing industry, Taylor & Francis Group, 2006.
- [111] C. Bustillo-Lecompte and M. Mehrvar, „Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances,“ Journal of Environmental Management, no. 161, 2015.
- [112] A. u. A. e. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, „Merkblatt DWA-M 767 Abwasser aus Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben,“ DWA, Hennef, 2020.
- [113] A. Awad, H. Salman and Y.-T. Hung, „Olive oil waste treatment,“ in Waste treatment in the food processing industry, Taylor & Francis Group, 2006.
- [114] N. Gholamzadeh, M. Peyravi and M. Jahanshahi, „Study on olive oil wastewater treatment: Nanotechnology impact,“ Journal of Water and Environmental Nanotechnology, vol. 1, no. 2, 2016.
- [115] R. Rajagopal, N. Saady, M. Torrijos, J. Thanikal and Y.-T. Hung, „Sustainable agro-food industrial wastewater treatment using high rate anaerobic process,“ Water, no. 5, 2013.
- [116] P. K. Biswas, P. Banerjee, R. Kumari, A. Choudhury and P. Kukreja, „Industry Structure and the Pattern of Innovation: Basic Metal Industry of India,“ National Institute of Science Technology and Development Studies, New Delhi, 2014.
- [117] P. Nidheesh and M. S. Kumar, „An overview of environmental sustainability in cement and steel production,“ Journal of Cleaner Production, pp. 856–871, 2019.
- [118] T. Brown, N. Idoine, E. Raycraft, R. Shaw, S. Hobbs, P. Everett, E. Deady and T. Bide, „World Mineral Production 2014-18,“ British Geological Survey, Nottingham, 2020.

- [119] Worldsteel Association, „Steel Statistical Yearbook 2019 – Concise version,“ Worldsteel Association, 2020.
- [120] Maghreb Steel, „Some key insights on the Moroccan steel market,“ ASM, Dubai, 2017.
- [121] Stahlinstitut VDEh, „Stahlerzeugung,“ 2020. [Online].
Available: www.vdeh.de/stahltechnologie/stahlerzeugung/. [Accessed 29 Juli 2020].
- [122] S. Dutta and Y. Chokshi, Basic cocepts of iron and steel making, Springer, 2020.
- [123] W. Weißbach, M. Dahms and C. Jaroschek, Werkstoffe und ihre Anwendungen, Wiesbaden: Springer, 2018.
- [124] H. Berns and W. Theisen, Eisenwerkstoffe – Stahl und Gusseisen, Springer, 2008.
- [125] R. Yin, Metallurgical Process Engineering, Springer, 2011.
- [126] D. Gabe, Principles of metal surface treatment and protection, Elsevier, 2014.
- [127] Umwelt-Bundesamt, „Galvanische Oberflächenbeschichtung,“ 29 Januar 2013. [Online].
Available: www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriearbeiten/herstellung-verarbeitung-von-metallen/galvanische-oberflaechenbeschichtung#was-ist-galvanische-oberflaechenbeschichtung. [Accessed 29 Juli 2020].
- [128] European Commission, „Best Available Techniques Reference Document for iron and steel production,“ European Commission, Luxembourg, 2013.
- [129] European Commission, „Best Available Techniques Reference Document for the non-ferrous metals industries,“ European Commission, Luxembourg, 2017.
- [130] European Commission, „Best Available Techniques Reference Document for the ferrous metals processing industry,“ European Commission, Luxembourg, 2019.
- [131] European Commission, „Reference document on Best Available Techniques for the surface treatment of metals and plastics,“ European Commission, Luxembourg, 2006.
- [132] V. Kuklik and J. Kudlacek, Hot-dip galvanizing of steel structures, Butterworth-Heinemann, 2016.
- [133] Suez, „Metal Industries,“ [Online].
Available: <https://www.suezwaterhandbook.com/water-and-generalities/what-water-should-we-treat-and-why/industrial-effluent/metal-industries>. [Accessed 30 Juli 2020].
- [134] E. Alcamisi, I. Matino, G. Porzio and V. Colla, Wastewater treatment in iron and steel industry: Process integration for water re-use, Lulea, 2014.
- [135] P. Das, G. Mondal, S. Singh, A. Singh, B. Prasad and K. Singh, „Effluent treatment technologies in the iron and steel industry – A state of the art review,“ Water environment research, vol. 90, no. 5, 2018.
- [136] N. Makish and M. Yunchina, Methods and solutions for galvanic waste water treatment, 2017.
- [137] D. Cutler, J. Dean and D. Howett, „Alternative Water Treatment Technologies for Cooling Tower Applications,“ National Renewable Energy Laboratory, 2019.
- [138] India Brand Equity Foundation, „Textile Industry & Market Growth in India,“ 03 2020. [Online].
Available: www.ibef.org/industry/textiles.aspx. [Accessed 07 Juli 2020].
- [139] M. Dhanabhakym, „Indian textile industry – An overview,“ August 2007. [Online].
Available: www.fibre2fashion.com/industry-article/2363/indian-textile-industry-an-overview. [Accessed 07 Juli 2020].

- [140] A. Krishnamurthy, „Textiles and Leather tannery,“ März 2019. [Online].
Available: www.gwiwaterdata.com/markets/countries/india#card-140287. [Accessed 07 Juli 2020].
- [141] India Brand Equity Foundation, „Leather Industry and Exports,“ März 2020. [Online].
Available: www.ibef.org/exports/leather-industry-india.aspx. [Accessed 07 Juli 2020].
- [142] D. Moneim, „Egypt aims to be textile industry hub by 2025,“ 19 September 2019. [Online].
Available: <http://english.ahram.org.eg/NewsContent/3/12/351172/Business/Economy/Egypt-aims-to-be-textile-industry-hub-by-.aspx>. [Accessed 08 Juli 2020].
- [143] Invest in Morocco, „Investment opportunities Textile and leather,“ [Online].
Available: www.invest.gov.ma/?Id=23&lang=en&RefCat=1&Ref=143. [Accessed 08 Juli 2020].
- [144] Fibre2Fashion, „Egyptian textile industry comes under the global radar,“ März 2011. [Online].
Available: www.fibre2fashion.com/industry-article/5465/egyptian-textile-industry-comes-under-the-global-radar. [Accessed 08 Juli 2020].
- [145] Oxford Business Group, „Textiles sector growing in Morocco,“ 2015. [Online].
Available: <https://oxfordbusinessgroup.com/analysis/textiles-sector-growing-morocco>. [Accessed 08 Juli 2020].
- [146] Oxford Business Group, „Tunisia textiles pursuing innovation to compete,“ 2017. [Online].
Available: <https://oxfordbusinessgroup.com/analysis/spirit-competition-textiles-industry-looking-innovate-while-capitalising-domestic-strengths>. [Accessed 08 Juli 2020].
- [147] Kohan Textile Journal, „Jordan’s textile & apparel industry,“ Juni 2020. [Online].
Available: <https://kohantextilejournal.com/jordans-textile-apparel-industry/>. [Accessed 08 Juli 2020].
- [148] M. El-Khair, „Promoting international and intra-african,“ International Trade Center, 2010.
- [149] F. Khaled, „Egypt’s leather industry: Is Robeki a solution for an industry threatened with collapse?,“ 02 Juni 2019. [Online].
Available: <http://businessforwardauc.com/2019/06/02/egypts-leather-industry-is-robeki-a-solution-for-an-industry-threatened-with-collapse/>. [Accessed 08 Juli 2020].
- [150] INNOLEA, „D.1-2: Leather industry status in Jordan. Focus group discussions report,“ Erasmus+ Programme, 2017.
- [151] T. Gries, D. Veit and B. Wulfhorst, Textile Fertigungsverfahren, 2020.
- [152] NIIR Board of Consultant Engineers, Leather processing & tanning technology, 2011.
- [153] European Commission, „Reference document on Best Available Techniques for the textiles industry,“ European Commission, 2003.
- [154] A. u. A. e. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, „Merkblatt DWA M 774 Abwasser aus lederherstellenden Betrieben,“ DWA, Hennef, 2019.
- [155] University of Sheffield, „Case study – Textile wastewater,“ [Online].
Available: <https://sites.google.com/site/textileindustryeffluent/introduction-to-wastewater/case-study---textile-wastewater>. [Accessed 09 03 2021].
- [156] M. Chowdhury, M. Mostafa, T. Biswas, A. Mandal and A. Saha, „Characterization of the effluent from leather processing industries,“ Environmental Processes, no. 2, 2015.
- [157] European Commission, „Best Available Techniques Reference Document for the tanning of hides and skins,“ European Commission, Luxembourg, 2013.

- [158] R. Singh, P. Singh, R. Gupta and R. Singh, „Treatment and recycling of wastewater from textile industry,“ in *Advances in biological treatment of industrial wastewater and their recycling for a sustainable future*, Springer, 2019.
- [159] C. Swartz, R. Rowsell, C. Jackson-Moss, A. Mpofu and P. Welz, „Water and wastewater management in the tanning and leather finishing industry,“ Water Research Commission, 2017.
- [160] P. Kumar and A. Saravanan, „Sustainable wastewater treatments in textile sector,“ in *Sustainable Fibres and Textiles*, Woodhead Publishing, 2017.
- [161] B. Mella, A. Glanert and M. Gutterres, „Removal of chromium from tanning wastewater and its reuse,“ *Process Safety and Environmental Protection*, no. 95, 2015.
- [162] O. Habeeb, R. Kanthasamy, G. Ali, S. Sethupathi and R. Yunus, „Hydrogen sulfide emission sources, regulations, and removal techniques: a review,“ *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 34, no. 6, 2017.
- [163] Indian Paper Manufacturers Association, „Paper industry overview,“ 2018. [Online]. Available: <http://ipma.co.in/overview/>. [Accessed 16 Juli 2020].
- [164] A. Krishnamurthy, „India Pulp and Paper,“ Juni 2020. [Online]. Available: <https://www.gwiwaterdata.com/markets/countries/india>. [Accessed 16 Juli 2020].
- [165] „Indian Paper & Pulp Market – industrial analysis and forecast,“ April 2019. [Online]. Available: <http://www.maximizemarketresearch.com/market-report/indian-paper-pulp-market/29044/#details>. [Accessed 16 Juli 2020].
- [166] Pulp & Paper technology, „Growth factors confronting Indian paper industries,“ [Online]. Available: <https://www.pulpandpaper-technology.com/articles/indianpulp>. [Accessed 16 Juli 2020].
- [167] Care Ratings, „Indian paper industry – moving out of the woods,“ 2018.
- [168] Chambre Francaise de commerce et d’industrie du Maroc, „L’industrie du papier et du carton au Maroc: un secteur en cours de structuration,“ 23 November 2014. [Online]. Available: <https://www.cfcim.org/magazine/21561>. [Accessed 17 Juli 2020].
- [169] Crowe Horwath, „Paper,“ [Online]. Available: <https://www.crowe.com/eg/industries/paper>. [Accessed 17 Juli 2020].
- [170] A.-S. Martin, „L’industrie du papier: L’activité bridée par la faiblesse des investissements,“ [Online]. Available: https://www.entreprendre.ma/Industrie-du-papier-l-activite-bridgee-par-la-faiblesse-des-investissements_a6078.html. [Accessed 17 Juli 2020].
- [171] Food and Agriculture Organisation of the United Nations, „Forest Products,“ FAO, Rom, 2017.
- [172] Agence de promotion de l’industrie et de l’innovation, „Les industries diverses en Tunisie,“ Agence de promotion de l’industrie et de l’innovation, 2014.
- [173] European Commission, „Best Available Techniques Reference Document for the production of pulp, paper and board,“ European Commission, Luxembourg, 2015.
- [174] M. Hubbe, J. Metts, D. Hermosilla, M. Blanco, L. Yerushalmi, F. Haghighat, P. Lindholm-Lehto, Z. Khodaparast, M. Kamali and A. Elliott, „Wastewater treatment and reclamation: A review of pulp and paper industry practices and opportunities,“ *BioResources*, vol. 11, no. 3, 2016.
- [175] Umweltbundesamt, „Zellstoff- und Papierindustrie,“ 24 Februar 2014. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriearbeiten/holz-zellstoff-papierindustrie/zellstoff-papierindustrie>. [Accessed 20 Juli 2020].

- [176] P. Bajpai, „Basic overview of pulp and paper manufacturing process,“ in *Green chemistry and sustainability in pulp and paper Industry*, Cham, Springer, 2015, pp. 11–39.
- [177] A. u. A. e. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, „Merkblatt DWA-M 731 Abwasser und Abfälle aus der Papierherstellung,“ DWA, Hennef, 2011.
- [178] P. Pal, „Industry-specific water treatment: Case studies,“ in *Technology*, Elsevier, 2017, pp. 243–511.
- [179] M. Kamali and Z. Khodaparast, „Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment,“ *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 114, pp. 326–342, 2015.
- [180] M. Cabrera, „Pulp mill wastewater: Characteristics and treatment,“ in *Biological wastewater treatment and resource recovery*, IntechOpen, 2017.
- [181] S. Lahiry, „India’s challenges in waste management,“ 08 Mai 2019. [Online].
Available: www.downtoearth.org.in/blog/waste/india-s-challenges-in-waste-management-56753.
[Accessed 02 Juni 2020].
- [182] S. Kumar, S. Smith, G. Fowler, C. Velis, J. Kumar, S. Arya, R. Kumar and C. Cheeseman, „Challenges and opportunities associated with waste management in India,“ *Royal Society Open Science*, vol. 4, no. 3, 2017.
- [183] S. Das and B. Bhattacharyya, *Classification and energy recovery from municipal solid waste, generated by greater metropolitan regions of Kolkata, India*, Bombay, 2013.
- [184] S. Wanwari, I. Thakur, V. Vijay and P. Ghosh, „Scenario of landfilling in India: Problems, challenges, and recommendations,“ in *Handbook of Environmental Materials Management*, Springer, 2018.
- [185] Veolia India, „Landfilling,“ [Online].
Available: <https://www.veolia.in/our-services/landfilling>. [Accessed 23 September 2020].
- [186] SUEZ India, „Ambition in India,“ [Online].
Available: <https://www.suez.in/en-in/who-we-are/suez-in-india/our-ambition-in-india>.
[Accessed 23 September 2020].
- [187] The Wire, „India imposes complete ban on solid plastic waste imports,“ 07 März 2019. [Online].
Available: <https://thewire.in/environment/india-solid-plastic-import-banned>. [Accessed 02 Juni 2020].
- [188] SWEEP-Net, „Country report on the solid waste management in Egypt,“ Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, 2014.
- [189] SWEEP-Net, „Report on the solid waste management in Morocco,“ Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, 2014.
- [190] SWEEP-Net, „Report on the solid waste management in Tunisia,“ Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, 2014.
- [191] SWEEP-Net, „Country report on the solid waste management in Jordan,“ Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, 2014.
- [192] A. Abdulrahman, „Solid waste management in Tunisia,“ 02 Juni 2018. [Online].
Available: www.ecomena.org/solid-waste-management-tunisia/. [Accessed 02 Juni 2020].
- [193] M. Aljaradin, „Solid waste management in Jordan,“ *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, vol. 4, no. 11, 2014.
- [194] Global Recycling, „Morocco: „Huge potential for investment“,“ [Online].
Available: <https://global-recycling.info/archives/2574>. [Accessed 02 Juni 2020].

- [195] D. Wilson, „Global waste management outlook,“ United Nations Environment Programme, 2015.
- [196] W. Dachroth, „Deponietechnik,“ in *Handbuch der Baugeologie und Geotechnik*, Springer, 2017.
- [197] J. Wiszniowski, D. Robert, J. Sumacz-Górska and K. Miksch, „Landfill leachate treatment methods: A review,“ *Environmental Chemistry Letters*, vol. 4, no. 1, 2006.
- [198] P. Kjeldsen, M. Barlaz, A. Rooker, A. Baun, A. Ledin and T. Christensen, „Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review,“ *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 32, no. 4, 2002.
- [199] G. Rettenberger, „Deponie,“ in *Einführung in die Kreislaufwirtschaft*, Springer, 2017.
- [200] P. Kjeldsen, M. Barlaz, A. Rooker, A. Baun, A. Ledin and T. Christensen, „Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review,“ *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, no. 32 (4), 2002.
- [201] M. Kamaruddin, M. Yusoff, H. Aziz and Y.-T. Hung, „Sustainable treatment of landfill leachate,“ *Applied Water Science*, vol. 5, 2015.
- [202] S. Aziz, H. Aziz, M. Yusoff and M. Bashir, „Landfill leachate treatment using powdered activated carbon augmented sequencing batch reactor process: Optimization by response surface methodology,“ *Journal of Hazardous Materials*, vol. 189, no. 1–2, 2011.
- [203] A. Imai, K. Onuma, Y. Inamori and R. Sudo, „Biodegradation and adsorption in refractory leachate treatment by the biological activated carbon fluidized bed process,“ *Water Research*, vol. 29, no. 2, 1995.
- [204] J. Bohdziewicz and A. Kwarciak, „The application of hybrid system UASB reactor-RO in landfill leachate treatment,“ *Desalination*, vol. 222, no. 1–3, 2008.
- [205] W.-Y. Ahn, M.-S. Kang, S.-K. Yim and K.-H. Choi, „Advanced landfill leachate treatment using an integrated membrane process,“ *Desalination*, vol. 159, no. 1–3, 2002.
- [206] D. Trebouet, J. Schlumpf, P. Jaouen and F. Quemeneur, „Stabilized landfill leachate treatment by combined physicochemical-nanofiltration processes,“ *Water Research*, vol. 35, no. 12, 2001.
- [207] T. Mariam and L. Nghiem, „Landfill leachate treatment using hybrid coagulation-nanofiltration processes,“ *Desalination*, vol. 250, no. 2, 2010.
- [208] M. Zolfaghari, K. Jardak, P. Drogui, S. Brar, G. Buelna and R. Dubé, „Landfill leachate treatment by sequential membrane bioreactor and electro-oxidation processes,“ *Journal of Environmental Management*, vol. 184, no. 2, 2016.
- [209] C. Di Iaconi, R. Ramadori and A. Lopez, „Combined biological and chemical degradation for treating a mature municipal landfill leachate,“ *Biochemical Engineering Journal*, vol. 31, no. 2, 2006.
- [210] Z.-p. Wang, Z. Zhang, Y.-j. Lin, N.-s. Deng, T. Tao and K. Zhuo, „Landfill leachate treatment by a coagulation-photooxidation process,“ *Journal of Hazardous Materials*, vol. 95, no. 1–2, 2002.
- [211] H.-C. Yoo, S.-H. Cho and S.-O. Ko, „Modification of coagulation and fenton oxidation processes for cost-effective leachate treatment,“ *Journal of Environmental Science and Health*, vol. 36, no. 1, 2001.
- [212] P. Goyal, „Press Information Bureau,“ 05 Februar 2020. [Online]. Available: <https://pib.gov.in/PressReleaseDetail.aspx?PRID=1602006>.
- [213] Centre for Science and Environment, „India Environmental Portal,“ 25 August 2020. [Online]. Available: <http://www.indiaenvironmentportal.org.in>.

- [214] IGEP, „Common Effluent Treatment Plants: Overview, Technologies and Case Examples,“ GIZ, New Delhi, 2015.
- [215] Government of India, „National Green Tribunal,“ 2019. [Online]. Available: <https://greentribunal.gov.in/>.
- [216] R. Arezki and F. Belhaj, „Developing Public-Private Partnership Initiatives in the Middle East and North Africa,“ World Bank Group, Washington D.C., 2019.
- [217] UNIDO, „Industrial Development Report 2018,“ United Nations, Vienna, 2017.
- [218] S. ElMassah, „Industrial symbiosis within eco-industrial parks: Sustainable development for Borg El-Arab in Egypt,“ *Business strategy and the environment*, pp. 884–892, 2018.
- [219] M. Ben Hamida, „Global Recycling,“ 25 August 2020. [Online]. Available: <https://global-recycling.info/archives/1465>.
- [220] T. Zheng, J. Wang, Q. Wang, C. Nie, N. Smale, Z. Shi and W. Xiaona, „A bibliometric analysis of industrial wastewater research: current trends and future prospects,“ *Scientometrics*, pp. 863–882, 2015.
- [221] European Commission, „Best Available Techniques Reference Document for common wastewater and waste gas treatment/management systems in the chemical sector,“ European Commission, Luxembourg, 2016.
- [222] S. Sa’ad, R. Zailan, S. Wan Alwi, J. Lim and Z. Manan, „Towards water integration in eco-industrial park: An overview of water recovery from industries,“ *Materials Science and Engineering*, no. 702, 2019.
- [223] S. Bauer, A. Dell, J. Behnisch, H. Chen, X. Bi, C. Nguyen, H. Linke and M. Wagner, „Water-reuse concepts for industrial parks in water-stressed regions in South East Asia,“ *Water Supply*, vol. 20, no. 1, 2020.
- [224] European Commission, „Reference Documents,“ [Online]. Available: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>. [Accessed 03 August 2020].
- [225] T. Tong and M. Elimelech, „The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: Drivers, technologies, and future directions,“ *Environmental Science & Technology*, vol. 50, no. 13, 2016.
- [226] M. Weber, „Leitfaden Ressourceneffizienz,“ VDI Zentrum für Ressourceneffizienz, 2019.
- [227] A. Ante, J. Behrendt, H. Bennemann, C. Blöcher, P. Bolduan, S.-U. Geißen, H. Horn, R. Krull, P. Kunz, J. Marzinkowski, S. Neumann, V. Oles, W. Rösler, E. Rother, K.-W. Schramm, M. Sievers, U. Szewzyk, T. Track, I. Voigt and H. Wienands, „Trends and Perspectives in Industrial Water Treatment,“ DECHEMA e. V., Frankfurt am Main, 2017.
- [228] M. Onischka, M. Ritthoff and C. Liedtke, „Instrumentenwegweiser zur Steigerung der Ressourceneffizienz,“ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2008.
- [229] German Water Partnership, „Wasser 4.0 – Made in Germany,“ German Water Partnership e. V., Berlin, 2019.
- [230] A. Ante, H. Bennemann, C. Blöcher, M. Engelhart, B. Fitzke, S.-U. Geißen, M. Hauswirth, M. Kozariszczuk, J. Leonhäuser, E. Rother, G. Sagawe, U. Schließmann, T. Track, A. Willner and C. Ziemer, „Positionspapier Industrierwasser 4.0,“ Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V., Frankfurt am Main, 2018.

Impressum

Herausgeber und Redaktion

German Water Partnership e. V.
Reinhardtstraße 32
10117 Berlin, Deutschland
+49 (0)30 300199-1220
info@germanwaterpartnership.de
www.germanwaterpartnership.de

Autor*innen

Lena Heinrich, Dr. Bastian Piltz und Dr. Thérèse Krahnstöver
Isle Utilities GmbH für German Water Partnership e. V.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor*innen.

Gestaltung

www.corporate-new.de

Stand

November 2021

Bildquellen

ANDRITZ: S. 46, 47 · A.T.E. HUBER Envirotech Private Limited: S. 38, 39, 60, 61
BMU/photothek/Thomas Trutschel: S. 4 · CERAFILTEC Germany GmbH: S. 63
enviplan Ingenieurgesellschaft mbH: S. 56, 57 · EnviroChemie GmbH: S. 45, 58, 59
FUCHS Enprotec GmbH: S. 96, 97 · German Water Partnership e. V.: S. 5, 9, 10, 12, 13
i+M GmbH & Co.KG: S. 83 · Jäger Umwelt-Technik GmbH: S. 104, 105
JUMO GmbH & Co. KG: S. 72, 73 · Lanxess Deutschland GmbH: S. 30, 31
MANN+HUMMEL: S. 21 · PWT Wasser- und Abwassertechnik GmbH: S. 55, 107
REMONDIS Aqua Industrie GmbH & Co. KG: S. 29 · shutterstock: S. 1
Siemens AG: S. 108 · stock.adobe.com: S. 12, 14, 16, 18, 22, 24, 25, 32, 34, 37, 40, 42,
43, 48, 50, 52, 64, 66, 69, 71, 74, 77, 81, 84, 86, 88, 90, 98, 101, 111

In Kooperation mit

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Globalvorhaben „Unterstützung der Exportinitiative Umwelttechnologien“ (BMU)
Köthener Str. 2
10963 Berlin, Deutschland
+49 (0)30 338 424 646
markus.luecke@giz.de
www.giz.de
<https://www.giz.de/de/weltweit/78869.html>

Das Globalvorhaben ist Teil der
BMU Exportinitiative Umwelttechnologien.
www.exportinitiative-umweltschutz.de



Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

