

Reduktion der Abwasser-Emissionen (Stoffeinträge) durch verbesserte Ressourceneffizienz in Schweizer Industrie und Gewerbe

Schwerpunkt Metallherstellung und -verarbeitung

Abschlussbericht für das Bundesamt für Umwelt (BAFU)

M. Sc. Therese Krahnstöver

B. Sc. Cynthia Müller

Prof. Dr. Christoph Hugi

Prof. Dr. Thomas Wintgens

Institut für Ecopreneurship

Hochschule für Life Sciences

Fachhochschule Nordwestschweiz

Muttenz, 29.06.2018

Inhalt

1. Einleitung	
1.1 Thematik und Fragestellungen	3
1.2 Vorgehensweise im Projekt	4
2. (Ab-)Wasserrelevanz der Schweizer Industrie	
2.1 Relevante Industriezweige	5
2.2 Entsorgung von industriellem Abwasser	7
2.3 Die metallverarbeitende Industrie in der Schweiz	10
3. Wasserflüsse in der metallverarbeitenden Industrie	
3.1 Verwendung von (Frisch-)wasser	11
3.2 Abwasserströme	12
4. Stoffemissionen aus der Metallverarbeitung	
4.1 Eintrag kritischer Stoffe in Abwasserströme	18
4.2 Verfahrensspezifische Betrachtungen	20
5. Ressourceneffizienz in Industrie und Gewerbe	
5.1 Problemverständnis und Lösungsansätze	30
5.2 Verfahrensspezifische Betrachtungen	34
6. Schlussfolgerungen	
6.1 Relevante Stoffeinträge und Massnahmen	40
6.2 Ansätze, Potentiale und Limitierungen	41
7. Literatur	45
8. Anhang A: NOGA-Klassifizierung	50
9. Anhang B: Steckbriefe guter Praxisbeispiele	51

1. Einleitung

1.1 Thematik und Fragestellungen

Um den Eintrag potentiell umweltrelevanter anthropogener Stoffe in natürliche Fließgewässer zu begrenzen, fordert die Schweizer Gewässerschutzverordnung die Minimierung von Abwasserströmen und Stoffeinträgen aus der Industrie. Ziel ist es, mittels quellenorientierter Massnahmen nach dem Verursacher- und Vorsorgeprinzip eine flächendeckende und Umweltmedien-übergreifende Minderung belastender Stoffemissionen zu ermöglichen (Gewässerschutzverordnung, 2016). Betroffen von dieser Regelung sind viele Zweige des produzierenden Gewerbes - einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von Schadstoffen in der Umwelt können daher produktionsintegrierte Massnahmen direkt bei industriellen Verursachern bilden, etwa durch optimierte Herstellungsprozesse und -verfahren, Produktinnovationen oder durch eine verbesserte Abwasserreinigung im Betrieb und der Berücksichtigung der Entsorgungsketten wasserrelevanter Abfallströme (Hillenbrand, et al., 2014).

Vor dem Hintergrund weitergehender Umweltmessungen und Bestrebungen zur Reduktion des Eintrags anthropogener Stoffe auch aus kommunalem Abwasser stellt sich die Frage nach der Aktualität der Anforderungen und des Handlungsbedarfs der abwassereinleitenden Industrien. Zu den neuerlich thematisierten Mikroverunreinigungen zählen neben Arzneimittelwirkstoffen, Pflanzenschutzmitteln und Kosmetikinhaltsstoffen auch einige Industriechemikalien (Abegglen, et al., 2012). Der Bundesrat hat im Sommer 2017 in Erfüllung des Postulats Hêche den Bericht «Massnahmen an der Quelle zur Reduktion von Mikroverunreinigungen in den Gewässern» verabschiedet. Der Bericht zeigt auf, wie Massnahmen an der Quelle gegen Mikroverunreinigungen intensiviert werden können. Zudem sollen das Wissen zu Stoffeinträgen aus Industrie und Gewerbe verbessert und allfällige Massnahmen geprüft werden (BAFU, 2017). Bei den 2016 von den Vereinten Nationen verabschiedeten nachhaltigen Entwicklungszielen («Sustainable Development Goals») sind der sparsame Umgang mit Ressourcen und der Schutz der Gewässer von hoher Priorität. Auch auf nationaler Ebene wurde mit dem Modell «Go for Impact» eine Grundlage für die Entwicklung hin zu einer ressourcenschonenden, nachhaltigen Schweizer Wirtschaft gelegt (Impulsgruppe "Dialog Grüne Wirtschaft", 2016). Ein Wandel im Umgang der Industrie mit Ressourcen und Wasser im Speziellen lässt sich schon seit einigen Jahren unter der Bezeichnung «Resources Efficient and Cleaner Production» (RECP) und «Best Available Techniques» (BAT) beobachten - die "effizientere Nutzung von Ressourcen durch die Anwendung neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse, Technologien und Umsetzung innovativer Ideen" (Zettl, et al., 2014).

Somit werden sowohl die Ressourceneffizienz als auch der restriktivere Umgang mit Stoffemissionen weiterhin konkrete Herausforderungen für die Schweizer Industrie darstellen. Eine relevante Fragestellung ist daher, welche Synergien und Wechselwirkungen sich im Handlungsfeld zwischen Ressourceneffizienz und Emissionsminderung ergeben können. Das von BAFU in Auftrag gegebene und vom VSA begleitete Projekt "Reduktion der Abwasser-Emissionen (Stoffeinträge) durch verbesserte Ressourceneffizienz in Schweizer Industrie und Gewerbe" soll in diesem Zusammenhang die folgenden Fragestellungen diskutieren (Abbildung 1):

- Welche Branchen und Produktionsverfahren sind besonders relevant für die Stoffemissionen in Schweizer Gewässer?
- Welche Informationen sind verfügbar über den Stand der Technik bezüglich Ressourceneffizienz in Industrie und Gewerbe?

- Welche Möglichkeiten zur Reduktion von Stoffeinträgen sind in Industrie und Gewerbe umsetzbar?
- Welche Synergien lassen sich nutzen zwischen Massnahmen zur verbesserten Ressourceneffizienz und solchen zur Reduktion von Stoffeinträgen?

1.2 Vorgehensweise im Projekt

Die erwähnten Fragen wurden im Projekt sowohl anhand einer Literaturrecherche, als auch durch Befragungen wichtiger Akteure untersucht. Nach einem allgemeinen Überblick wurde der Fokus auf den wasserrelevanten Industriezweig "**Metallherstellung und -bearbeitung**" gelegt. Bei der vertieften Literaturrecherche zum Stand der Technik lag ein besonderer Schwerpunkt auf den verfügbaren «Best Available Techniques Reference» (BREF) -Dokumenten sowie auf den vorliegenden branchenspezifischen Merkblättern der Schweizer Kantone. In den Interviews wurden unterschiedliche Sichtweisen zu den Themen Ressourceneffizienz und Stoffeinträge zusammengetragen, um auf dieser Basis Synergien und mögliche Hindernisse in der Umsetzung beider Bestrebungen aufzuzeigen. Zu den befragten Akteuren zählten:

- Metallverarbeitende Unternehmen
- Relevante Zulieferer und Dienstleistungsunternehmen
- Schweizer Branchenverbände
- Vertreter von BAFU und Kantonen

Insgesamt wurden 14 verschiedene Akteure aus allen vier Bereichen interviewt und technische, umweltspezifische und gesellschaftlich-politische Aspekte der Antworten zusammengetragen. Die Informationen aus der Akteursbefragung fliessen jeweils mit entsprechender Referenz auf den einzelnen Akteur, z.B. [4], in den vorliegenden Bericht ein. Drei Firmen mit besonders guter Praxis im Bereich Ressourceneffizienz und Umweltschutz werden in Kapitel 8 Anhang B in Form von Steckbriefen ausführlicher vorgestellt.



Abbildung 1: Aspekte des Projektthemas und deren Wechselwirkungen im Wirkungsfeld zwischen Ressourceneffizienz und Stoffemissionen

2. (Ab-)Wasserrelevanz der Schweizer Industrie

2.1 Relevante Industriezweige

Am Wirtschaftsstandort Schweiz ist eine Vielzahl von Unternehmen angesiedelt, die zur Produktion von Gütern und Waren auf industrielle Verfahren angewiesen sind. Grundlage für dieses produzierende Gewerbe ist der Einsatz von Ressourcen wie Energie, Rohstoffen und Hilfsstoffen. Dies betrifft eine Vielzahl von Branchen, wobei das ökonomische und ökologische Optimierungspotential in einigen Bereichen als besonders relevant eingeschätzt wird, da ressourcenintensive Prozesse und teilweise bedenkliche Betriebsstoffe zum Einsatz kommen, z.B. in der Pharma- oder Metallindustrie. Entsprechend der NOGA¹-Klassifizierung sind in der Schweiz von Seiten der Unternehmenszahlen vor allem die Bereiche Kunststoffwaren (NOGA 22) und Metallerzeugnisse (NOGA 25) relevant (Braun, et al., 2014) (Abbildung 2).

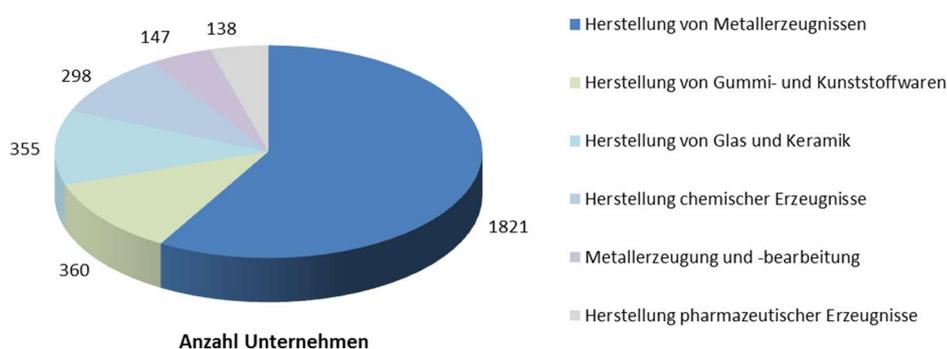


Abbildung 2: Anzahl der in der Schweiz ansässigen Unternehmen, geordnet nach Branchen (ohne Kokerei und Mineralölverarbeitung) (Braun, et al., 2014)

Branchenübergreifend ist festzustellen, dass Investitionen in die Behandlung oder Vermeidung von Umweltverschmutzungen den kleineren Teil der Ausgaben ausmachen, während ein Grossteil der Ausgaben in laufende Aufwendungen zum Umweltschutz - wie etwa Abfallentsorgungskosten und Abwassergebühren – fliesst (Abbildung 3). Es ist daher zu erwarten, dass Massnahmen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz oder zur Reduktion von Stoffemissionen, die eine Verringerung der laufenden Umweltschutzausgaben ermöglichen, für Unternehmen von besonderem Interesse sind.

Eine Gegenüberstellung der Umweltausgaben in den Jahren 2003 und 2013 zeigt erfolgte Einsparungen auf (Abbildung 4). Hier wird die Notwendigkeit zur Reduktion laufender Kosten in den Unternehmen deutlich, die auch von Ressourceneffizienzmassnahmen entsprechend adressiert werden sollte. Ebenso ist ersichtlich, dass die Ausgaben zur Abwasserreinigung nur etwa ein Drittel der gesamten Umweltschutzausgaben ausmachen - dass diese Ausgaben aber im Verhältnis zu den Gesamtausgaben von 2003 bis 2013 weniger stark gesunken sind. Im Branchenvergleich kann ein relativ grosses Potential zur Verbesserung des industriellen Umweltschutzes und dessen Kosten im Bereich der Metallbranche vermutet werden. Eine Vielzahl von Ressourceneffizienz-Massnahmen hat sich in der Vergangenheit bereits auf den effizienteren Einsatz und die Rückgewinnung metallischer Stoffe in der metallverarbeitenden Industrie fokussiert (Emec, et al., 2013). Es haben sich z.B. die

¹ NOGA (Nomenclature générale des activités économiques): Mithilfe der NOGA-Codierung werden Arbeitsstätten und Unternehmen anhand ihrer wirtschaftlichen Tätigkeit klassifiziert und gruppiert (Bundesamt für Statistik, 2016)

Wärmerückgewinnung mittels Wärmetauscher sowie die Kreislaufführung von Prozessmedien zur Reduktion des Energie- und Materialeinsatzes etabliert. Im Hinblick auf Wasserverbrauch und Verluste anderweitiger Betriebsstoffe in Abwasserströmen wurden hingegen noch weniger Anstrengungen unternommen – so gibt es etwa Wissenslücken, was die stoffliche Zusammensetzung der Abwasserströme betrifft. Aufgrund dieser Ausgangslage und der grossen Anzahl an mittleren und kleinen Betrieben in der Schweiz bietet sich die Metallbranche als Prototyp zur Betrachtung des Projektthemas an. Die Diskussion des Projektthemas erfolgt deshalb zunächst am Beispiel der Schweizer metallverarbeitenden Industrie und soll als Grundlage für die Betrachtung weiterer Branchen dienen.

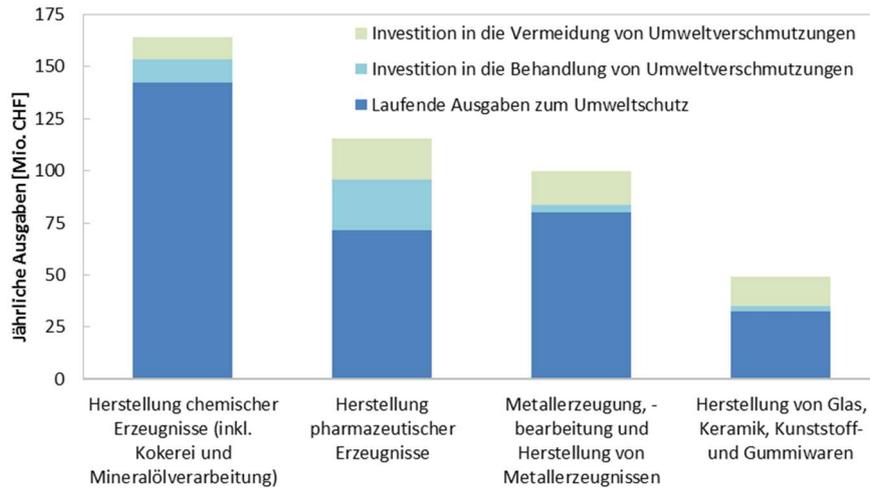


Abbildung 3: Umweltschutzausgaben Schweizer Unternehmen im Jahr 2013, geordnet nach Branchen (Bundesamt für Statistik, 2013)

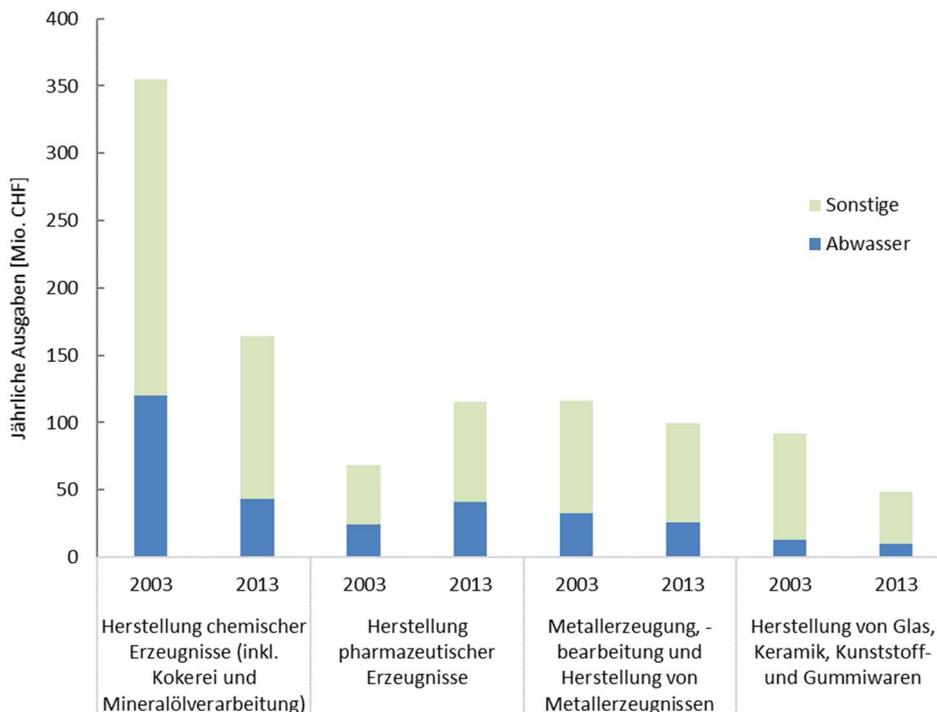


Abbildung 4: Umweltschutzausgaben Schweizer Unternehmen in den Jahren 2003 und 2013 im Vergleich, geordnet nach Branchen (Bundesamt für Statistik, 2013; Bundesamt für Statistik, 2003)

2.2 Entsorgung von industriellem Abwasser

Produzierende und verarbeitende Unternehmen stellen wesentliche Nutzer von Frischwasser dar – etwa 50% des Schweizer Frischwasserbedarfs entfallen auf Industrie und Gewerbe (Freiburghaus, 2009). Innerhalb der Betriebe kann es durch Verdunstung sowie durch den Wassergehalt von Produkten und Abfallschlämmen zu Verlusten kommen - der Rest wird in der Regel als Abwasser entsorgt (Hillenbrand, et al., 2008).

2.2.1 Gesetzeslage in der Schweiz

Verschmutztes Abwasser aus industriellen Betrieben muss zunächst behandelt werden, bevor es in Gewässer eingeleitet werden darf - dabei wird zwischen Direkteinleitern und Indirekteinleitern unterschieden. Während Direkteinleiter ihr Abwasser - üblicherweise nach einer betriebsinternen Reinigung - unmittelbar in ein Gewässer einleiten, wird das Abwasser von Indirekteinleitern - ob betriebsintern vorbehandelt oder nicht - zunächst über das Kanalnetz in eine Abwasserreinigungsanlage (ARA) geführt und nach der dortigen Reinigung in die Umwelt eingeleitet. Entscheidend für die Direkt- oder Indirekteinleitung sind im Einzelfall nicht nur eine Kostenabwägung, sondern auch gesetzliche Vorgaben wie etwa Grenzwerte für bestimmte Schadstoffe (Statistisches Bundesamt, 2014). Die Anforderungen an eine Abwassereinleitung sind in der Schweizer Gewässerschutzverordnung festgelegt (Gewässerschutzverordnung, 2016), in deren Anhang 3.2 die Einleitung von Industrieabwasser in Gewässer und Kanalisation geregelt wird. Industrieabwasser umfasst laut Definition Abwasser, das aus gewerblichen und industriellen Betrieben stammt sowie solches, das damit vergleichbar ist, z.B. Abwasser aus Laboratorien und Spitälern (Gewässerschutzverordnung, 2016). Die Gewässerschutzverordnung fordert nicht nur die **Minimierung von Abwasserströmen und Schadstofffrachten**, sondern auch die Trennung von nicht verschmutztem und verschmutztem Abwasser, und sie verbietet das Verdünnen belasteten Abwassers zur Einhaltung der Grenzwerte. Die allgemeinen Anforderungen der Gewässerschutzverordnung an das direkt und indirekt eingeleitete Abwasser umfassen unter anderem Grenzwerte für pH-Wert, Temperatur, Feststoffe und verschiedene Schwermetalle (Tabelle 1) (Gewässerschutzverordnung, 2016).

Je nach Branche sind nach der Gewässerschutzverordnung zusätzlich bestimmte Anforderungen zu erfüllen, die sich einerseits auf die angestrebte Abwasserqualität und andererseits auf die erforderlichen Abwasserbehandlungsmassnahmen beziehen können (Gewässerschutzverordnung, 2016). In der Stahlindustrie werden zum Beispiel im Wesentlichen eine Rezirkulation des Prozesswassers sowie Grenzwerte für ungelöste Stoffe und Kohlenwasserstoffe vorgeschrieben. In der Galvanik- und chemischen Industrie werden erhöhte Anforderungen an bestimmte Schwermetallkonzentrationen im Abwasser gestellt (Tabelle 2). Wenn für bestimmte Stoffe, die Gewässer verunreinigen können, keine Anforderungen genannt sind, so legt die Behörde in der Bewilligung auf Grund des Stands der Technik die konkreten Anforderungen fest. Dabei berücksichtigt die Behörde internationale oder nationale Normen, vom BAFU veröffentlichte Richtlinien oder von der betroffenen Branche in Zusammenarbeit mit dem BAFU erarbeitete Normen (Gewässerschutzverordnung, 2016). Richt- oder Grenzwerte für organische Einzelstoffe im industriellen Abwasser sind derzeit in der Schweiz nicht gesetzlich festgelegt.

Tabelle 1: Allgemeine Anforderung für die Einleitung von Industrieabwasser in Gewässer (Direkteinleitung) und in die öffentliche Kanalisation (Indirekteinleitung) (Gewässerschutzverordnung, 2016)

Parameter	Anforderungen bei Direkteinleitung	Anforderungen bei Indirekteinleitung
pH-Wert	6.5 bis 9.0	6.5 bis 9.0, Abweichungen z.T. zulässig
Temperatur	Höchstens 30 °C, kurzzeitige, geringe Überschreitungen z.T. zulässig	Höchstens 60 °C, in der Kanalisation nach Vermischung höchstens 40 °C
Durchsichtigkeit	30 cm	-
Gesamte ungelöste Stoffe	20 mg/l	-
Arsen (As)	0.1 mg/l As	0.1 mg/l As
Blei (Pb)	0.5 mg/l Pb	0.5 mg/l Pb
Cadmium (Cd)	0.1 mg/l Cd	0.1 mg/l Cd
Chrom (Cr)	2 mg/l Cr, davon 0.1 mg/l Cr(VI)	2 mg/l Cr
Kobalt (Co)	0.5 mg/l Co	0.5 mg/l Co
Kupfer (Cu)	0.5 mg/l Cu	1 mg/l Cu
Molybdän (Mo)	-	1 mg/l Mo
Nickel (Ni)	2 mg/l Ni	2 mg/l Ni
Zink (Zn)	2 mg/l Zn	2 mg/l Zn
Cyanide (CN-)	0.1 mg/l CN-	0.5 mg/l CN-
Gesamte Kohlenwasserstoffe	10 mg/l	20 mg/l
Leichtflüchtige chlorierte (FOCl) oder halogenierte (VOX) Kohlenwasserstoffe	0.1 mg/l FOCl oder 0.1 mg/l VOX	0.1 mg/l FOCl oder 0.1 mg/l VOX

2.2.2 Definition des «Stand der Technik»

Im Allgemeinen und branchenübergreifend verlangt die Gewässerschutzverordnung ein betriebsinternes Wasser- und Abwassermanagement, das dem "Stand der Technik" entspricht (Gewässerschutzverordnung, 2016). Darunter wird das technologische Niveau von Verfahren verstanden, deren praktische Anwendung und wirtschaftliche Durchführbarkeit sich bewährt haben. Dieser Begriff bietet allerdings Interpretationsspielraum und bedarf im Einzelfall zumeist einer näheren Klärung, auf die sich konkrete Anforderungen stützen können (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 2001). Auf EU-Ebene wird der Stand der Technik in branchenbezogenen Dokumenten formuliert - den sogenannten "Best Available Techniques Reference Documents" (BREFs). Auch in der Schweiz sind der VSA und die Kantone bemüht, den Stand der Technik in Bezug auf die industrielle Abwasserreinigung zu konkretisieren, um sowohl Vollzugsbehörden als auch Industriebetrieben die Beurteilung von Abwässern und ihrer Behandlung zu erleichtern (Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute) [14]. Es ist dabei von besonderem Interesse, die Reinigungsleistung des jeweiligen Stands der Technik in Bezug auf bestimmte Stoffemissionen einschätzen und entsprechende Anforderungen und Schlussfolgerungen für die Belastung ableiten zu können. Derzeit ist zwar die zur Einleitung erforderliche Abwasserqualität reglementiert, der Gesetzgeber schreibt aber nicht vor, mit welcher Technologie diese erreicht werden muss oder kann.

Tabelle 2: Besondere Anforderungen für die Einleitung von Stoffen aus der Oberflächenbehandlung und Galvanik (Gewässerschutzverordnung, 2016)

Verfahren	Parameter	Anforderungen an die Direkt- und Indirektleitung
Entfetten von Metallen	1,2-Dichlorethan	0.1 mg/l im Monatsmittel, 0.2 mg/l im Tagesmittel
	Trichlorethen	0.1 mg/l im Monatsmittel, 0.2 mg/l im Tagesmittel
	Tetrachlorethen	0.1 mg/l im Monatsmittel, 0.2 mg/l im Tagesmittel
Oberflächenbehandlung	Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (VOX)	0.1 mg/l VOX im Tagesmittel
	Cyanid (CN-)	0.2 mg/l CN- (leicht freisetzbare) im Tagesmittel
	Quecksilber (Hg)	0.05 mg/l Hg im Tagesmittel oder 0.03 kg/t verwendetes Hg im Tagesmittel
	Cadmium (Cd)	0.2 mg/l Cd im Tagesmittel oder 0.3 kg/t verwendetes Cd im Tagesmittel
	Chrom (Cr)	0.1 mg/l Cr-VI im Tagesmittel, 0.5 mg/l Cr (gesamt) im Tagesmittel ¹
	Blei (Pb)	0.5 mg/l Pb im Tagesmittel ¹
	Kupfer (Cu)	0.5 mg/l Cu im Tagesmittel ¹
	Nickel (Ni)	0.5 mg/l Ni im Tagesmittel ¹
	Zink (Zn)	0.5 mg/l Zn im Tagesmittel; z.T. bis zu 2 mg/l Zn im Tagesmittel zulässig
	Silber (Ag)	0.1 mg/l Ag im Tagesmittel
Zinn (Sn)	2 mg/l Sn im Tagesmittel	

¹ Für Betriebe der Oberflächenbehandlung, die kleine Metallfrachten ableiten (weniger als 200 g der Summe Gesamtchrom, Blei, Kupfer, Nickel und Zink pro Tag), kann die Behörde höchstens 2 mg/l im Monatsmittel zulassen.

Die Befragung von Akteuren im Projekt hat gezeigt, dass der Begriff «Stand der Technik» auch innerhalb der Metallbranche zum Teil sehr unterschiedlich wahrgenommen wird. Insgesamt scheint es, dass die Unsicherheiten mit der Begrifflichkeit weniger werden, je besser vernetzt die Akteure sind. So gaben z.B. Branchenverbände und grössere Unternehmen an, dass der Stand der Technik im jeweiligen Technologiefeld bekannt sei und umgesetzt werde [7, 9, 12]. Vor allem in kleinen Betrieben wird es dagegen als unsicher und intransparent empfunden, welche Technologien als Stand der Technik gelten und welche Kriterien dafür erfüllt sein müssen [1, 2]. Den besten Überblick über die verfügbaren Technologien und deren Umsetzung haben offensichtlich branchennahe Dienstleister, wie z.B. Ingenieurbüros und Anlagenbauer. In diesen Unternehmen herrscht gute Einigkeit darüber, welche Technologien als Stand der Technik etabliert und welche laufenden Entwicklungen als zukunftsfähig einzuschätzen sind [8, 9, 11]. Mit ihren Entwicklungs-, Verkaufs- und Beratungstätigkeiten nehmen sie eine wichtige Schlüsselposition bei der Definition des «Standes der Technik» ein. Ein wichtiger Ansprechpartner sind sie besonders für kleine Unternehmen, die sich mangels eigener Kenntnisse bei ihrer Technologiewahl üblicherweise daran orientieren, was auf dem Markt verfügbar ist und von den jeweiligen Anbietern empfohlen wird [4, 7]. Die von der EU erstellten BREF-Dokumente sind den meisten metallverarbeitenden Firmen entweder überhaupt nicht bekannt [1, 12], oder werden nicht als Informationsquelle genutzt [7]. Bedeutung haben insbesondere Normen, Merkblätter und Richtlinien, die konkrete Massnahmen und Technologien beschreiben [4, 7, 12]. Herausgegeben werden solche

Dokumente beispielsweise von Branchenverbänden (Verein Deutscher Ingenieure, 1980; Euro Inox, 2005), Referenzunternehmen (Baumann Mineralölvertrieb, 2009; Metallbeschichtung Gerstungen GmbH, 2011) oder staatlichen Institutionen (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, 2016; Umweltbundesamt, 2010).

2.3 Die metallverarbeitende Industrie in der Schweiz

Zur metallverarbeitenden Industrie zählen prinzipiell alle Unternehmen der NOGA-Klassifizierungen 24 und 25 (Anhang A)), wobei in der Schweiz nur eine begrenzte Anzahl von Unterbranchen eine Rolle spielt. Mit 636 Firmen und einem Anteil von fast 80% ist die deutliche Mehrzahl der Schweizer metallverarbeitenden Unternehmen in der Oberflächenveredelung und Wärmebehandlung tätig. Zusätzlich zu den explizit metallverarbeitenden Branchen der NOGA-Codes 24 und 25 spielen einzelne Unterbranchen eine Rolle, die ähnliche Rohstoffe und Verfahren anwenden, z.B. die Herstellung elektronischer Bauelemente (NOGA 261100).

Im Kontext des Projekts wird von Seiten der Kantone und Branchenverbände nahegelegt, zur Orientierung und Auswahl von Unternehmen nicht allgemein NOGA-Klassifizierungen, sondern die einzelnen zur Anwendung kommenden Fertigungsverfahren zugrunde zu legen [12, 13, 14]. Dies, weil sie die konkreten Verfahren zur Beurteilung der Abwasserrelevanz als geeigneter einstufen als nur die generellen NOGA-Codes, da Unternehmen innerhalb derselben Branche häufig diverse Verfahren verwenden, welche sich unterschiedlich auf die abwasserrelevanten Stoffe auswirken können. Orientierung bietet dabei die Norm DIN 8580, in der Fertigungsverfahren systematisch kategorisiert werden (Abbildung 5) (Deutsches Institut für Normung, 2003). Die anhand der Literaturrecherche als abwasserrelevant identifizierten Fertigungsverfahren sind in Abbildung 5 grün hervorgehoben. Die im Projekt besuchten und befragten Unternehmen wenden hauptsächlich spanende Trenn- und Beschichtungsverfahren an (Tabelle 3).

Die metallverarbeitende Industrie in der Schweiz ist geprägt von Mikrounternehmen mit Mitarbeiterzahlen unter 10 Vollzeitäquivalenten (VZÄ), wozu beispielsweise familiengeführte Handwerksunternehmen zählen. Mikrounternehmen machen 62% der gesamten Unternehmenszahlen aus, während etwa ein Viertel der Unternehmen zwischen 10 und 50 VZÄ beschäftigt. Nur 10% der metallverarbeitenden Unternehmen liegen mit 50 bis 250 VZÄ im Bereich des Mittelstands, und der zahlenmässige Anteil grosser Unternehmen über 250 VZÄ ist in dieser Schweizer Branche vernachlässigbar (Bundesamt für Statistik, 2014). Aus dieser Statistik ergibt sich die Herausforderung, auch kleine und kleinste Unternehmen gezielt mit solchen Themen wie Ressourceneffizienz und Gewässerschutz zu erreichen und deren Umsetzung effektiv und effizient zu unterstützen. Dieses Anliegen wird sowohl von Branchenverbänden als auch von kantonaler Seite aus unterstützt und teilweise durch Schulungsangebote gezielt gefördert [12, 14]. Die Unternehmensbefragung hat gezeigt, dass gerade kleine und kleinste Unternehmen häufig Dienstleistungsarbeiten für wechselnde Kunden durchführen und daher stark von der wirtschaftlichen Auftragslage und den Kundenanforderungen abhängig sind [1, 2, 3]. Dies führt bei den Betrieben beispielsweise zu häufig wechselnden Chargen, welche eine optimale Kreislaufführung beeinträchtigen sowie eine Wiederverwendung von Prozessmedien erschweren kann.

Die geographische Verteilung der metallverarbeitenden Industrie in der Schweiz zeigt eine deutliche Anreicherung von Unternehmen in den dicht besiedelten Metropolregionen. Die beiden am stärksten

vertretenen Unterbranchen - NOGA 256100 und 261100 - sind vor allem in den Kantonen Bern, Zürich und Aargau angesiedelt (Abbildung 6) [14].

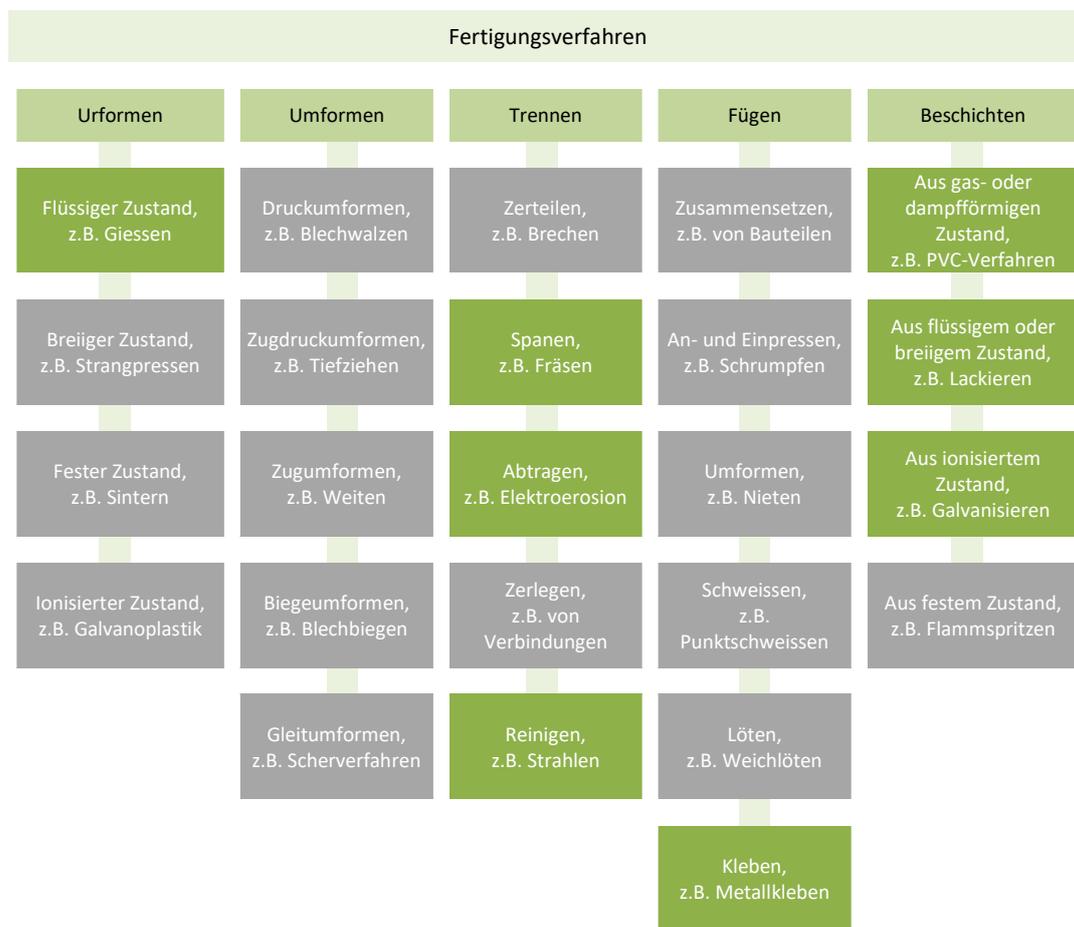


Abbildung 5: Kategorisierung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (Auszug), abwasserrelevante Verfahren sind grün hervorgehoben.

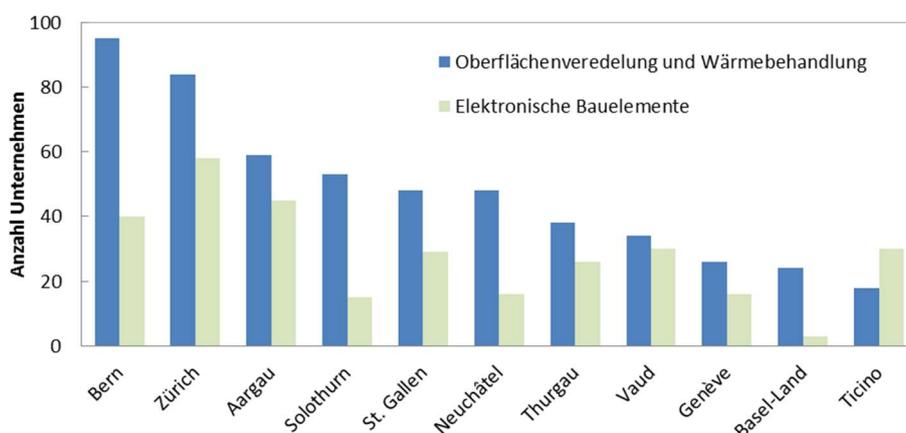


Abbildung 6: Verteilung zweier wichtiger Unterbranchen in den 10 relevantesten Kantonen der Schweiz (Bundesamt für Statistik, 2014)

Tabelle 3: Übersicht der befragten Akteure mit ihren wichtigsten Eigenschaften und im Bericht verwendeten Referenznummern

Nr.	Branche/Hintergrund	Produkte/Leistungen	Lage	Verfahren				Mitarbeiter
				Urformen	Umformen	Vorbehandl.	Beschichten	
[1]	Metallverarbeitung	Diverse Bauteile in Auftragsarbeit	BE			X		12
[2]	Metallverarbeitung	Fassadenbauteile in Auftragsarbeit	LU			X	X	30
[3]	Metallverarbeitung	Kleinbauteile in Auftragsarbeit	LU		X			40
[4]	Metallverarbeitung	Diverse Bauteile in Auftragsarbeit	BL			X	X	125
[5]	Metallverarbeitung	Diverse Bauteile in Auftragsarbeit	LU		X	X	X	185
[6]	Metallverarbeitung	Metallbausätze aus Aluminium	ZH		X	X	X	200
[7]	Metallverarbeitung	Armaturen aus Rotguss	BL	X	X			330
[8]	Industriechemikalien	Betriebsstoffe zur Metallvorbehandlung						
[9]	Umwelttechnologie	Industrielle Abwasserreinigung						
[10]	Entsorger	Entsorgung flüssiger Sonderabfälle						
[11]	Umweltanalytik	Analyse von Prozess- und Abwässern						
[12]	Branchenverband	Plattform für Maschinen- und Anlagenbau						
[13]	Kanton	Zuständiges Amt für Gewässerschutz						
[14]	Kanton	Zuständiges Amt für Gewässerschutz						

3. Wasserflüsse in der metallverarbeitenden Industrie

3.1 Verwendung von (Frisch-)Wasser

In der Metallindustrie spielt Frischwasser im Allgemeinen für Kühlzwecke eine Rolle, sowie zur Materialbehandlung und zum Reinigen (Hillenbrand, et al., 2008). Im Bereich der Materialbehandlung spielt vor allem die chemische Vorbehandlung in Tauch- oder Spritzbädern eine wichtige Rolle. Zusätzlich kommen je nach Branche und Produktionsprozess Reinigungsanwendungen hinzu, in denen das Potential zur Verschmutzung des Wassers mit belastenden Chemikalien entsprechend hoch ist (Hillenbrand, et al., 2008).

Je nach Unterbranche lassen sich verschiedene Produktionsschritte und Fertigungsverfahren identifizieren, die als besonders wasserintensiv einzuschätzen sind. Bei der Erzeugung und Erstbearbeitung von Metall entsteht Frischwasserverbrauch vor allem in der Materialvorbehandlung sowie der pyro- und hydrometallurgischen Extraktion (Environmental Protection Agency, 2008). Umformende, spanende und fügende Verfahren kommen hingegen in der Regel mit wenig Frischwasser aus. In der Akteursbefragung stellte sich heraus, dass Betriebsstoffe meist in geschlossenen Kreisläufen geführt werden und Frischwasser im Wesentlichen zum Nachfüllen dieser Kreisläufe verwendet wird, z.B. bei Fräs- oder Gleitschleifanlagen [3, 5, 6]. Das Beschichten von Oberflächen kann, je nach verwendeter Technologie und Nachbehandlung, zu einem hohen Wasserverbrauch führen (Environmental Protection Agency, 2008; Muff-Levis, 2017). In den befragten Unternehmen wurde für Lackierverfahren allerdings kein Frischwasser verwendet [2, 4, 5, 6].

Verfahren der Oberflächenveredelung und Wärmebehandlung werden dagegen im Allgemeinen als verhältnismässig wasserintensiv beschrieben und spielen in der Schweiz darüber hinaus zahlenmässig eine wichtige Rolle. Ein hoher Wasserverbrauch entsteht dort vor allem zum Betrieb von Spritz- und Tauchbädern, z.B. für Vorbehandlungsverfahren wie Entfetten, Dekapieren und Beizen oder Bearbeitungsverfahren wie Anodisieren, Phosphatieren oder Brünieren. Diese Anwendungen wurden in der Akteursbefragung als wesentliche Frischwassersensenken identifiziert [1, 2, 4]. Infolge von Abtropfverlusten muss in Tauchbädern pro Charge schätzungsweise 20-50 L Wasser nachgefüllt werden, während Spritzverfahren mit 5-10 L Wasserverbrauch pro Charge sparsamer sind [8]. Passivierungs- und Chromatierungsverfahren stellen besonders hohe Anforderungen an die Reinheit des verwendeten Spül- und Badwassers, sodass dafür nur vollentsalztes (VE-) Wasser mit niedrigen Leitfähigkeiten eingesetzt werden kann [6, 8]. Die meisten der befragten Unternehmen hatten zu diesem Zweck VE-Anlagen bestehend aus Kiesfiltern und Ionentauschern im Einsatz [1, 2, 5, 6], einmal kam auch eine Umkehrosiose-Anlage zur Anwendung [4]. In Einzelfällen gab es in der gesamten Produktion nur ein Frischwassernetz, das für alle Anwendungen mit VE-Wasser betrieben wurde [1, 2].

Die befragten metallverarbeitenden Unternehmen hatten teilweise eine sehr unterschiedliche Sensibilisierung im Bereich (Frisch-)Wasserverbrauch. Es war erkennbar, dass die Thematik vor allem solchen Betrieben wichtig erscheint, die Vorbehandlungsbäder betreiben und dementsprechend einen vergleichsweise hohen Wasserverbrauch haben [2, 5, 6]. Alle Betriebe gaben auf Nachfrage an, dass die jährlich anfallenden Kosten für Frischwasser im Verhältnis zu anderen Kostenfaktoren wenig Relevanz haben und das Potential zur Ressourcen- und Kosteneinsparung als niedrig eingeschätzt wird.

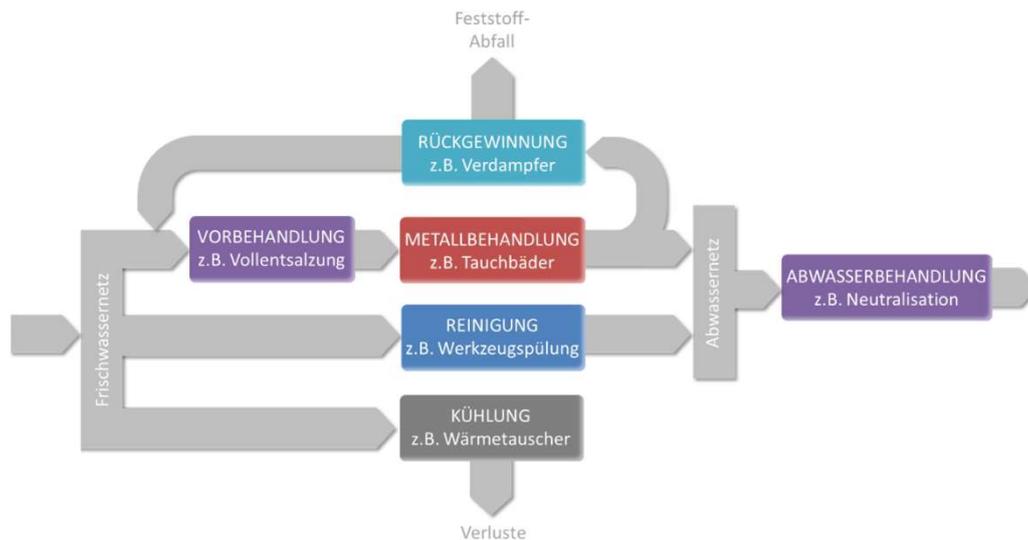


Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung der wichtigsten Wasserflüsse in metallverarbeitenden Betrieben

3.2 Abwasserströme

3.2.1 Anfall und Entsorgung von industriellem Abwasser

Industrielles Abwasser fällt in der Regel dort an, wo auch relevante Mengen an Frischwasser eingesetzt werden, z.B. in Vorbehandlungs- und Spülbädern sowie in Reinigungsanwendungen, während z.B. spanende Verfahren oder Lackierbetriebe häufig abwasserfrei arbeiten. In vielen Fällen ist es für die Unternehmen günstiger und einfacher, auch flüssige Abfallströme als Sonderabfall zu entsorgen, anstatt sie in vorbehandelter Form ins Abwassernetz zu entsorgen. Das trifft insbesondere dann zu, wenn die Abfälle hoch konzentriert und nur mit hohem Aufwand zu reinigen sind, oder nur in unregelmässigen Abständen anfallen, wie z.B. der Inhalt von Vorbehandlungsbädern oder verbrauchte Kühlschmiermittel [8, 9, 10]. Auch im Falle einer Abwasservorbehandlung und -einspeisung ist zu berücksichtigen, dass die anfallenden Rückstände, z.B. Fällschlämme oder Verdampfungsrückstände, wiederum als Sonderabfall entsorgt werden müssen. Im Kontext der Stoffemissionen und Ressourceneffizienz ist es daher besonders wichtig, auch die zu entsorgenden Sonderabfälle der eingesetzten Technologien im Blick zu behalten. Der im Projekt befragte Entsorger gab an, dass etwa 20-30% der behandelten Abfälle aus der Metallverarbeitung stammen, und dass diese sich vor allem aus schwermetallhaltigen Säuren und Laugen (etwa 1/3) und Emulsionen (etwa 2/3) zusammensetzen [10]. Der Entsorger leitet einerseits gereinigtes Abwasser ins Kanalnetz ein und entsorgt andererseits feste Rückstände in Deponien (Untertage-, Reaktor- oder Inertstoffdeponien) oder Kehrlichtverbrennungsanlagen. Eine Metallrückgewinnung wird auf Grund der kleinen schwermetallhaltigen Batchgrössen kaum bis gar nicht mehr vom Entsorger durchgeführt [10].

Die Problematik ist Ingenieurbüros und Kantonen gleichermaßen bekannt, eine quantitative Bilanzierung der Stoffströme gestaltet sich aber schwierig [9, 13, 14]. Nur die Hälfte der befragten metallverarbeitenden Unternehmen leiten tatsächlich industrielles Abwasser in ein Kanalnetz ein, während die anderen eine abwasserfreie Produktion betreiben (Tabelle 4). Als Grund für den Betrieb einer eigenen Abwasservorbehandlung mit anschliessender Einleitung wurden in den meisten Fällen die hohen Entsorgungskosten für Sonderabfälle genannt [2, 6]. Die Kosten für Sonderabfälle richten sich nach dem Behandlungsaufwand beim Entsorger und sind somit von den jeweiligen Inhaltsstoffen und Konzentrationen abhängig [10]. Unternehmen, die ihre Abwasserströme als Sonderabfall entsorgen

lassen, argumentieren hingegen mit dem unvertretbar hohen Aufwand einer eigenen Abwasserreinigung, der nicht nur Betriebskosten umfasst, sondern z.B. auch ausreichend ausgebildetes Personal und die regelmässige Durchführung von Qualitätskontrollen [1, 5].

3.2.2 Technische Verfahren zur industriellen Abwasserreinigung

Die betriebsinterne Abwasserreinigung zur Einhaltung der Einleitbedingungen hängt meist von der Belastung der Wässer im Einzelfall ab und umfasst häufig Behandlungsschritte zur biologischen Reinigung, Abtrennung von Fett und Partikeln, sowie eine Neutralisationsstufe (Schluep, et al., 2006). Zusätzlich dazu werden vor allem in der Metallindustrie häufig Schwermetalle aus dem Abwasser entfernt (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2011). Zur Erreichung dieser Reinigungsziele kommt prinzipiell eine Auswahl technischer Verfahren in Frage (Europäische Kommission, 2006). Im Folgenden werden häufig eingesetzte Verfahren zur Abwasserreinigung näher beschrieben.

Fettabscheidung

Die einfachste Möglichkeit zur Abscheidung von Ölen und Fetten aus Abwasserströmen sind mechanische Ölabscheider, in denen bei Raumtemperatur unter Wirkung der Schwerkraft eine Phasentrennung und ein Aufschwimmen der Fettphase stattfindet (Abbildung 8). Wichtig ist dabei, dass eine niedrige Durchflussgeschwindigkeit und eine gleichförmige Strömungsverteilung realisiert werden. Dispersionen und Emulsionen von Wasser-Fett-Gemischen lassen sich mechanisch nicht abtrennen und müssen zunächst gespalten werden. Durch eine Kompensation der Oberflächenladung der Ölkolloide soll das Stoffgemisch destabilisiert werden. Dazu kommen als Spaltmittel entweder Säuren, z.B. Salz- oder Schwefelsäure, oder Metallsalze, z.B. Calcium- oder Magnesiumchlorid, zum Einsatz (Europäische Kommission, 2006). Ist die Phasentrennung erreicht, kann das Öl beispielsweise mittels Mikrofiltration oder Flotation abgetrennt werden. Zu beachten ist, dass sauer gespaltene Abwässer nach der Behandlung noch neutralisiert werden müssen, während die durch Salzsplattung entstehenden Hydroxidschlämme aufwändig zu entwässert sind. Als Alternative, die sich zum Stand der Technik entwickelt, gelten Ultrafiltrationsverfahren, die ohne Einsatz von Chemikalien eine Wasserabtrennung von bis zu 90% ermöglichen und schon für geringe Emulsionsmengen wirtschaftlich betrieben werden können (Baumann Mineralölvertrieb, 2009).

Tabelle 4: Übersicht der eingesetzten Wasserreinigungsverfahren in den befragten Unternehmen

Nr.	Industrielles Abwasser?	Biologische Stufe	Eingesetzte Verfahren zur (Ab-)Wasserreinigung			
			Fettabscheider	Verdampfung	Neutralisation	Fällung Flockung
[1]	Nein					
[2]	Ja					X
[3]	Ja		X			X
[4]	Nein			X		
[5]	Nein			X	X	
[6]	Ja				X	X
[7]	Ja		X			

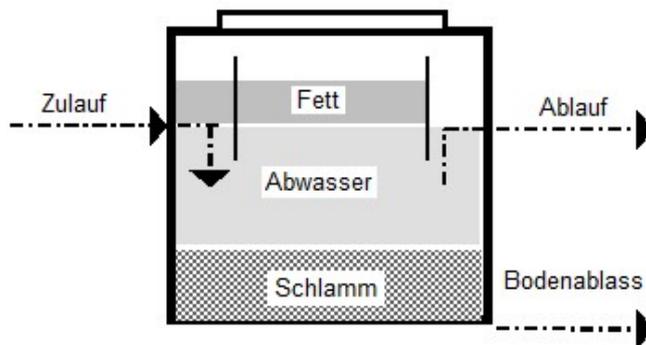


Abbildung 8: Aufbau eines Ölabscheiders mittels Schwerkraft (nach (Life, 2002))

Neutralisation

Die Gewässerschutzverordnung schreibt für industrielle Abwässer die Einhaltung zulässiger pH-Werte vor, daher muss in vielen Abwasserströmen der pH-Wert vor Einleitung angepasst werden (Abbildung 9 (1)). Saure Wässer werden durch Zugabe von Basen und alkalische Wässer durch Zugabe von Säuren neutralisiert (Europäische Kommission, 2006). Bei kleinen Volumenströmen kommt als basisches Neutralisationsmittel häufig Natronlauge zum Einsatz, die mit den Säureanionen des Wassers sehr gut lösliche Salze bildet und deren Einsatz üblicherweise zu keinem zusätzlichen Neutralisationsschlammfall führt. Grössere saure Volumenströme werden aus Kostengründen meist mit Kalkmilch neutralisiert, die allerdings mit Säureanionen wie Sulfat, Phosphat oder Fluorid schwerlöslichen Neutralisationsschlamm bildet, der abgetrennt werden muss. Zur Neutralisation basischer Abwässer wird in der Regel Schwefel- oder Salzsäure verwendet. Auch CO_2 bietet sich als Neutralisationsmittel an, weil es sich leicht dosieren lässt und eine Aufsalzung mit Chloriden oder Sulfaten vermieden wird. Beim Einsatz von Schwefelsäure ist darauf zu achten, dass Sulfatkonzentrationen über 300 mg/L zu Betonkorrosion führen können (Londong, et al., 2007; Hauser, 2016).

Es ist zu beachten, dass es sich beim pH-Wert um eine logarithmische Grösse handelt, d.h. dass eine Neutralisation von pH=5 auf pH=6 beispielsweise zehnmal so viel Neutralisationsmittel erfordert wie eine Neutralisation von pH=6 auf pH=7. Zusätzlich hat auch die Pufferkapazität des Wassers einen entscheidenden Einfluss auf den Neutralisationsmittelverbrauch. Zur Reduktion des Chemikalieneinsatzes kann es sinnvoll sein, Abwässer verschiedener pH-Werte im Unternehmen zu mischen, wobei dann ein besonderes Augenmerk auf möglichen Nebenreaktionen der Abwasserbestandteile liegen sollte (Londong, et al., 2007).

Fällung und Flockung

Im Wasser enthaltene Schwermetalle oder andere gelöste Metallsalze können im Zuge der Neutralisation als Hydroxide, Oxidhydrate oder basische Salze durch Überschreiten ihrer Löslichkeitsgrenze ausgefällt werden (Abbildung 9 (1)). Durch die gezielte Zugabe von Fällmitteln können auch andere lösliche Wasserinhaltsstoffe, z.B. Kolloide, in ihre unlösliche Form überführt werden (Europäische Kommission, 2006). Metalle können bei der sogenannten hydroxidischen Fällung durch Zugabe von Natronlauge oder Kalkmilch in Form von Metallhydroxiden gefällt werden, wobei das Erreichen eines kritischen pH-Wertes von besonderer Bedeutung ist (Hauser, 2016). Bei der Fällung mit Natronlauge fallen beispielsweise dreiwertige Ionen noch im leicht sauren Bereich aus, die Fällung zweiwertiger Ionen erfolgt in der Reihenfolge Cu, Pb, Zn, Co, Ni, Cd, Mn, Fe bei steigenden pH-Werten,

und einige Metalle gehen bei zu hohen pH-Werten wieder in Lösung. Als Alternative zur hydroxidischen Fällung bietet sich die Carbonatfällung mit Soda oder Calciumcarbonat an, in der zwar vergleichsweise gut lösliche aber dafür grob-kristalline Metallcarbonate gebildet werden. Müssen sehr niedrige Restkonzentrationen im Abwasser erreicht werden, z.B. für Hg oder Cd, wird häufig die Fällung von Metallsulfiden bevorzugt, die sich durch ausserordentlich geringe Löslichkeiten auszeichnen. Komplexeverbindungen, die in der Metallindustrie häufig durch Cyanide, Phosphate, NTA oder EDTA gebildet werden, sind in Lösung sehr beständig und nur schwer fällbar. In einigen Fällen kann eine Hydroxidfällung bei hohen pH-Werten Erfolg haben, starke Komplexe müssen hingegen sulfidisch gefällt werden (Londong, et al., 2007; Europäische Kommission, 2006; Rombach, 2002).

Die durch Fällung entstehenden Flocken lassen sich wegen ihrer geringen Grösse nur schwer aus dem Wasser abtrennen, sodass das Flockenwachstum häufig gezielt gefördert werden muss. Durch den Einsatz von Eisen- oder Aluminiumsalzen als Flockungsmittel wird dabei die abstossende Ladung der Kolloide kompensiert, sodass sie sich zu Flocken zusammenlagern können. In dieser Phase ist eine gute Durchmischung der Suspension besonders essentiell, um eine hohe Kontaktwahrscheinlichkeit der Kolloide zu gewährleisten. Durch die zusätzliche Zugabe langkettiger organischer Moleküle (Polyelektrolyte) als Flockungshilfsmittel verbinden sich anschliessend die kleinen Partikel zu grösseren Teilchen. Da diese vergleichsweise instabil sind, muss der Energieeintrag in die Suspension hier so geringgehalten werden, dass ein Absetzen der kleineren Flocken gerade verhindert wird (Londong, et al., 2007; Hauser, 2016).

Verdampfer

Eine verbreitete Möglichkeit zur Aufbereitung und weitgehenden Rückgewinnung von Industrieabwässern ist die Verdampfung, meist unter Vakuum. Bei Temperaturen von 40-90 °C wird ein Grossteil des Abwassers verdampft und als Destillat zurückgewonnen, während ein hochkonzentrierter Rückstand zurückbleibt, der je nach Feststoffgehalt als Abwasser oder – häufiger – Sonderabfall entsorgt wird. Das Verfahren wird im Batchbetrieb durchgeführt und bietet sich vor allem für solche Anwendungen an, in denen nur geringe Abwassermengen anfallen und das Destillat als Frischwasserersatz wiederverwendet werden kann.

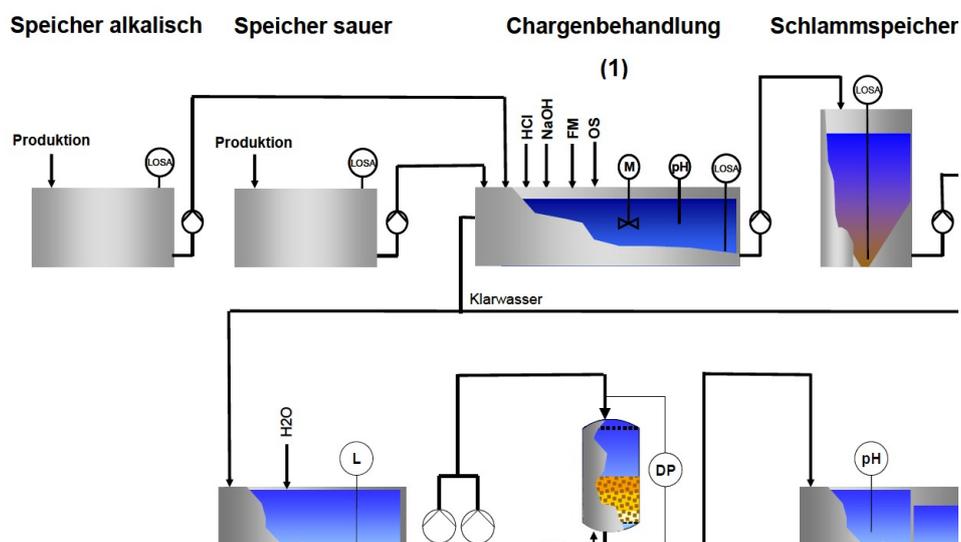


Abbildung 9: Fließbild einer Abwasserbehandlung mittels Neutralisation, Fällung und Flockung (1) und zweistufiger Filtration (2) (Hauser, 2016)

Filtrationsverfahren

Filtrationsverfahren kommen in der Abwasserreinigung vor allem zur Abtrennung von gefällten und geflockten Schlämmen zum Einsatz (Abbildung 9 (2)) (Europäische Kommission, 2006). Am weitesten verbreitet sind für diesen Zweck manuell oder automatisch betriebene Kammerfilterpressen, in die das Abwasser mit hohem Druck (bis 15 bar) gefördert wird und in denen die Feststoffe durch Filtertücher zurückgehalten werden. Die Abtrennung feinsten Partikel wird dabei nicht nur durch das Filtertuch, sondern auch durch Tiefenfiltration im sich bildenden Filterkuchen gewährleistet (Hauser, 2016; Rombach, 2002). In Kammerfilterpressen oder alternativ in Bandfilterpressen werden die Schlämme mit einem Feststoffgehalt von 35-40 % zurückgehalten (Europäische Kommission, 2006). In einigen Fällen kommt eine Nachfiltration von wässrigen Überständen zur weitergehenden Schwebstoffabtrennung durch Mehrschichtfilter, z.B. aus Kies, Sand und Anthrazit, zum Einsatz (Hauser, 2016). Als «Polizeifilter» können vor der Einleitung von Abwässern druckgetriebene Membranverfahren dienen, die Restgehalte an Metallen und Schwebstoffen zuverlässig minimieren (Hauser, 2016). Üblicherweise kommen zur Behandlung von Industrieabwässern Ultrafiltrationsmembranen mit Trenngrenzen um 0.01-0.1 µm und Nanofiltrationsmembranen mit ladungsspezifischen Trenngrenzen um 1-10 nm zum Einsatz (Europäische Kommission, 2006). Entscheidend für den optimalen Betrieb von Membrananlagen ist eine ausreichend hohe Qualität des Zulaufs sowie die richtige Auswahl des Membranmoduls und der Betriebsbedingungen, z.B. des pH-Werts (Rombach, 2002).

3.2.3 Praktische Umsetzung der Abwasserreinigung

Eine Übersicht der in den befragten Unternehmen eingesetzten Wasserreinigungsverfahren (Tabelle 4) zeigt, dass in der metallverarbeitenden Branche biologische Verfahren kaum vorkommen und Fettabscheider nur in Einzelfällen eingesetzt werden, wenn es um die Aufbereitung von Reinigungs- oder Schmiermitteln geht [3, 7]. Am häufigsten wurden Abwässer mittels Verdampfung aufbereitet [4, 5], sowie chemisch-physikalisch behandelt [2, 3, 5, 6]. Es wird geschätzt, dass ca. 70% der Unternehmen ihr Abwasser mittels Verdampfung aufbereiten, was eine Rückgewinnung von etwa 80% des jeweiligen Abwassers ermöglicht [8]. Die restlichen Unternehmen setzen physikalisch-chemische Reinigungsverfahren ein, die üblicherweise aus einer Neutralisation, Fällung und Flockung und anschließender Einleitung ins Kanalnetz bestehen [8]. Von Ingenieurbüros und branchennahen Dienstleistern werden diese beiden Verfahren folglich als Stand der Technik in der Metallbranche eingeschätzt [8, 9, 11]. Entsorgte Sonderabfälle werden üblicherweise mit Dekantern und Verdampfern (Organik) oder mittels Verdampfung, Fällung/Flockung und Neutralisation (Anorganik) behandelt, bevor das Abwasser eingeleitet wird [10]. Die Entsorgung der zurückgebliebenen Schlämme kann in Deponien, Zementwerken, Kehrlichtverbrennungsanlagen oder über Recycling erfolgen [10]. Der Stand der Technik in der industriellen Abwasserreinigung von metallverarbeitenden Betrieben wird einerseits als ausgereift und stabil beschrieben, d.h. es gab in den letzten Jahren und Jahrzehnten nur wenige neuartige Entwicklungen [8]. Andererseits gilt die Thematik im Einzelfall unter Berücksichtigung der jeweils eingesetzten Fertigungsverfahren und Betriebsstoffe als sehr komplex, und setzt technisches und chemisches Hintergrundwissen auch im kantonalen Vollzug voraus [9, 14].

Die Herausforderungen bei der Erfassung von industriellen Abwasserströmen beginnen damit, dass Sanitär- und Industrieabwasser üblicherweise gemeinsam eingeleitet werden, sodass in einigen

Unternehmen keine quantitativen Angaben zum Anfall von Prozessabwässern verfügbar waren [6, 7]. Die konsequente Trennung von Industrie- und sonstigen Abwässern erleichtert hingegen die Bilanzierung [3]. Eine Abschätzung der industriellen Abwassermengen wird häufig dadurch erleichtert, dass die Abwasservorbehandlung typischerweise im Stunden-, Tages- oder Wochenrhythmus batchweise mit bestimmten Volumina betrieben wird [2, 3, 6, 7]. Dies erschwert allerdings die Abschätzung von Stoffeinträgen in die jeweils nachgelagerten ARA und Gewässer, da anstelle von Stichproben die Analyse von Wochen- oder Monatsmischproben nötig wird [11, 13, 14]. Eine Qualitätskontrolle des eingeleiteten Industrieabwassers erfolgte in einigen der befragten Unternehmen, wobei damit üblicherweise die laufende oder stichprobenartige Kontrolle des pH-Wertes gemeint ist und nur in einem Einzelfall Proben zur vertieften Analyse an externe Labors gegeben wurden [2, 3, 6]. Das interviewte Entsorgungsunternehmen analysiert routinemässig Wochenmischproben des eigenen Abwassers auf diejenigen Parameter, die laut Gewässerschutzverordnung vorgeschrieben sind [10].

4. Stoffemissionen aus der Metallverarbeitung

4.1 Eintrag kritischer Stoffe in Abwasserströme

4.1.1 Eintragspfade in Abwässer der Metallverarbeitung

Eine Vielzahl von Mikroverunreinigungen ist in den Schweizer Oberflächengewässern gefunden worden, und die Anzahl an detektierbaren Substanzen steigt stetig (Schluep, et al., 2006). In der Metallindustrie werden relevante Stoffe üblicherweise als Industriechemikalien eingesetzt, deren Anwendung das Risiko von Stoffemissionen birgt. Eine vom BAFU zusammengestellte Liste häufiger und als besonders relevant eingeschätzter Mikroverunreinigungen enthält eine Aufzählung von Industriechemikalien – eine Reihe davon kommt in den einzelnen metallverarbeitenden Unterbranchen zum Einsatz (Tabelle 5). Je nach Stoffeigenschaften und Anwendungsfall können die Substanzen beispielsweise als Lösungsmittel, pH-Regulatoren, Stabilisatoren, Katalysatoren, Weichmacher oder Komplexbildner dienen, und auch Kühlwasser kann Chemikalien gegen einen mikrobiologischen Befall der Kühlsysteme enthalten (Statistisches Bundesamt, 2014). Für jeden Anwendungsfall kommt eine grosse Vielzahl möglicher Einsatzstoffe in Frage, wobei sich für jede Stoffgruppe die am häufigsten eingesetzten Substanzen grob zusammenstellen lassen (Tabelle 6). Es wird, am Beispiel des Tensids PFOS, von industriellen Stoffverlusten aus der Galvanikindustrie ins Abwasser im Bereich von 5-50% berichtet (Hillenbrand, et al., 2014), was den Handlungsbedarf zur Reduktion von Stoffemissionen im Anwendungsfall deutlich macht.

Tabelle 5: Abwasserrelevante Stoffe der wichtigsten Unterbranchen aus NOGA 24, 25 und 26

NOGA-Code	Branche	Abwasserrelevante Stoffe
242000	Rohrprodukte aus Stahl	Öle und Fette, Feststoffe, Säuren
244200	Erzeugung und erste Bearbeitung von Aluminium	Sulfate, Sulfide, Ammoniak, Nitrate, Phosphor, Phenole, Lösungsmittel, Mineralöle, Metalle
256100	Oberflächenveredelung und Wärmebehandlung	Metalle, Zyanide, Tenside, AOX, Komplexbildner, Chloride, Sulfate, Phosphate, Nitrate, Bor, Biozide
259300	Drahtwaren, Ketten und Federn	Amine, Sulfate, Öle, Schmierstoffe
261100	Elektronische Bauelemente	Metalle, Zyanide, Tenside, AOX, Komplexbildner, Chloride, Sulfate, Phosphate, Nitrate
261200	Bestückte Leiterplatten	Metalle, Zyanide, Tenside, AOX, Komplexbildner, Chloride, Sulfate, Phosphate, Nitrate

4.1.2 Massnahmen zur Reduktion der Stoffeinträge

Die Schweizer Industriebetriebe behandeln ihr Abwasser gemäss den Anforderungen der Gewässerschutzverordnung, die eine Abwasserreinigung nach "Stand der Technik" vorschreibt (Gewässerschutzverordnung, 2016). Der Begriff des "Standes der Technik" lässt allerdings in vielen Fällen Interpretationsspielraum (siehe Kapitel 2.2.2). Wichtig ist es deshalb, anhand konkreter Beispiele für Technologien und Richtwerte Massnahmenempfehlungen zur Reduktion des Stoffeintrags ins Abwasser zu formulieren. Grundlage dafür sind einerseits die verfügbaren BREF-Dokumente auf EU-Ebene und andererseits erfolgreiche Praxisbeispiele auf Ebene einzelner Kantone oder Industriebetriebe.

Tabelle 6: Häufig eingesetzte Substanzen in Betriebsstoffen der Metallindustrie [8, 11] (Muff-Levis, 2017)

Stoffgruppe	Häufig eingesetzte Substanzen
Komplexbildner	Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA) Nitrilotriessigsäure (NTA) Phosphorsäure Zitronensäure Tartrate/Weinsäure
Biozide	Chlormethylisothiazolinon (CMIT) Didecyldimethylammoniumchlorid (DDAC) Octylisothiazolinon (OIT) Benzalkoniumchlorid (BAC) Benzisothiazolinon (BIT) Glutaraldehyd
Lösungsmittel	Toluol (Methylbenzol) Xylol (Dimethylbenzen) Tetrachlorethylen (Perchlorethylen) Aceton (Propanon, Dimethylketon)
Tenside	Perfluorooctansulfonsäure (PFOA) Natriumdodecylbenzolsulfonat (LAS) Tetrapropylbenzolsulfonat (TPS) Nonylphenoethoxylat (NPE(O))
Oxidationsmittel	Ammoniumperoxodisulfat Organ. Säuren Natriumhypochlorit (NaOCl) Ozon (O ₃) Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂)

Als Massnahme zur Reduktion potentiell gefährlicher Stoffemissionen wird in der Industrie allen voran häufig die Substitution der kritischen durch alternative Substanzen vorgeschlagen (Zettl, et al., 2014; Hillenbrand, et al., 2014). Idealerweise sind die Ersatzstoffe weniger schädlich und gut abbaubar, sodass das Abwasser dadurch weniger belastet wird. Die Stoffsubstitution wird allerdings von der Anwenderseite in der Regel als sehr aufwändig beschrieben, weil in vielen Fällen z.B. durch veränderte Reaktionsbedingungen angrenzende Verfahren angepasst werden müssen und die erzielte Qualität der Prozesse und Produkte dadurch verringert werden könnte. Hersteller der eingesetzten Betriebschemikalien haben den Bedarf für Stoffsubstitutionen erkannt, können aber nur in enger Abstimmung mit vor- und nachgelagerten Verfahrensschritten sinnvolle Alternativen entwickeln. So hängt beispielsweise die Chemikalienauswahl für Entfettungsprodukte unter anderem davon ab, unter welchen Betriebsbedingungen der Metallbearbeiter das Entfettungsverfahren betreibt und welche Lackiertechnologien und -produkte nachfolgend zum Einsatz kommen [8]. Letztlich sollte sich eine Stoffsubstitution auch aus ökonomischer Sicht für das betroffene Unternehmen lohnen oder zumindest nicht negativ auswirken (Dücker, et al., 2015). In weniger umfangreichen Fällen kann das Vorgehen durchaus mit vertretbarem Aufwand einen guten Beitrag zur Eintragsreduzierung leisten - etwa bei der Umstellung von herkömmlichen auf lösemittelfreie Klebstoffe in der Metallverarbeitung (Dücker, et al., 2015). Auch die Substitution ungefährlicher Stoffe sollte geprüft werden, wenn sich daraus Vorteile an anderer Stelle in der Verfahrenskette ergeben. Die Substitution von Chemikalien mit Hinblick auf ein optimales "Waste Design", d.h. auf die gute Reinigbarkeit des kontaminierten Wassers in einer nachgeschalteten Reinigungsstufe, kann in vielen Fällen eine Option darstellen (Hillenbrand, et al., 2008).

Kommt die Substitution einer kritischen Substanz nicht in Frage, kann ihr Einsatz in der Produktion so optimiert werden, dass der Eintrag in Abwasserströme verringert wird (Dückert, et al., 2015). Durch eine optimierte Stoffdosierung können in vielen Fällen der Verbrauch und die Emission einer Substanz gleichermaßen verringert werden. Eine zusätzliche Option zur Reduktion von Stoffeinträgen in die Umwelt stellt in den meisten Fällen die Einführung oder Optimierung einer betriebsinternen Abwasserreinigung dar. Durch den Einsatz von Adsorptions-, Oxidations- oder Dialyseverfahren lässt sich die Belastung des Abwassers deutlich verringern, wobei sich die Technologiewahl im Einzelfall an den im Gewerbe auftretenden Substanzen orientieren sollte [9]. Membranverfahren können eine besonders hohe Abwasserqualität erreichen und ermöglichen in vielen Fällen die Rückgewinnung von sauberem Wasser und/oder von relevanten Stoffen zum erneuten Einsatz in der Produktion (Dückert, et al., 2015; Hillenbrand, et al., 2008). Einsatzgebiete für Membranverfahren in der Metallindustrie sind z.B. Partikelabscheidung, Entfettungsbadpflege, Elektrolyt- und Beizbadpflege sowie Spülwasseraufbereitung (Rögener, 2007).

4.2 Verfahrensspezifische Betrachtungen

Um die Eintragspfade von Stoffen in industrielles Abwasser im Einzelfall zu identifizieren und zu charakterisieren, ist eine Betrachtung der technischen Produktionsprozesse sinnvoll. Im Bereich der Metallverarbeitung sind einzelne Fertigungsverfahren aufgrund des damit verbundenen hohen Chemikalieneinsatzes als besonders abwasserrelevant einzuschätzen. Dazu zählen vor allem spanende Trennverfahren, wie z.B. Fräsen oder Bohren, und mechanische Oberflächenbehandlungsverfahren, wie z.B. Strahlen oder Schleifen. Zu den Reinigungsverfahren wird in diesem Kontext auch die Materialvorbehandlung, z.B. durch Entfetten oder Beizen, gezählt, die zu den abwasserrelevantesten Verfahrensschritten in der Metallverarbeitung gehört. Ebenso können beim Behandeln mit Flüssigkeiten, z.B. beim Lackieren, Galvanisieren oder Brünieren, Stoffeinträge in das Abwasser eine Rolle spielen. Im Folgenden werden Fertigungsverfahren, welche von den befragten Unternehmen angewendet werden, beschrieben und deren Abwasserrelevanz eingeschätzt.

4.2.1 Urformverfahren

Die Gruppe der Urformverfahren beinhaltet alle Fertigungsverfahren, bei denen aus einem formlosem Stoff ein fester Körper hergestellt wird. Je nach Zustand des Stoffes (flüssig, breiig, usw.) unterscheiden sich die Verarbeitungsverfahren – flüssig geschmolzenes Metall wird beispielsweise beim Giessen in Formen gefüllt und abgekühlt, während körnige oder pulverförmige Ausgangsstoffe gesintert werden (Abbildung 10). Beim Giessen können grosse Mengen an Kühlwasser eingesetzt werden, stofflich belastetes Abwasser entsteht hingegen nicht. Möglicherweise verunreinigte Luftströme lassen sich mit geeigneten Filtern (z.B. Aktivkohlebett) reinigen [7].

4.2.2 Spanende Trennverfahren

Spanende Fertigungsverfahren umfassen die Bearbeitungsprozesse Bohren, Fräsen und Drehen. Um die Umform- und Reibungsenergie an der Bearbeitungsstelle und die thermische Belastung von Werkzeug und Werkstück zu verringern, werden Kühlschmiermittel (KSM) eingesetzt (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, 2016). Für langsame, schwere Bearbeitungen werden meist reine Öle zur Schmierung verwendet, während hohe Schnittgeschwindigkeiten mit starker Wärmeentwicklung meist wässrige KSM-Emulsionen mit guter Kühlwirkung erfordern (Baumann Mineralölvertrieb, 2009). In KSM sind demnach neben Basisölen meist weitere Inhaltsstoffe enthalten,

wie z.B. Emulgatoren, Korrosionsinhibitoren, Entschäumer oder Biozide (Tabelle 7), wobei nichtwassermischbare KSM in der Regel mit weniger Einzelkomponenten auskommen als wassermischbare Alternativen. Die VKIS-VSI-IGM Stoffliste für Kühlschmiermittel nach DIN 51385 für die Metallbearbeitung weist Lieferanten sowie Verbraucher auf die Verantwortung hin, geltende Gesetze, Verordnungen und Regelwerke einzuhalten. Die Stoffliste enthält spezifische Anforderungen für die Zubereitung von wassermischbaren und wassergemischten Kühlschmiermitteln sowie nichtwassermischbaren Kühlschmiermitteln (VKIS-VSI-IGM, 2015). Die heute eingesetzten KSM sind nitritfrei, sodass die Bildung als krebserregend geltender Nitrosamine im Betrieb weitestgehend ausgeschlossen werden kann (Baumann Mineralölvertrieb, 2009). Auch Chlor wird wegen der damit verbundenen Entsorgungsproblematik kaum noch in KSM eingesetzt (Dopatka, 1993).

Neben verbrauchten Kühlschmiermitteln fallen beim Spanen im Wesentlichen Metallabfälle, ölhaltige Schleifschlämme und Späne als Abfall an (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, 2016). Die KSM werden im Betrieb üblicherweise gereinigt, nachdosiert und wiederverwendet, bis sie nach mehrmonatiger Standzeit schliesslich entsorgt werden [3, 5, 6]. Die Entsorgung geschieht meist als Sonderabfall [3, 5], manchmal nehmen auch die Produkthanbieter gebrauchte KSM zurück [6]. Fallen ausreichend grosse Mengen an gebrauchten KSM im metallverarbeitenden Betrieb an, kann sich der Betrieb einer eigenen Spaltanlage, z.B. mittels Salz- oder Säurespaltung lohnen (siehe auch Kapitel 3.2.2) (Baumann Mineralölvertrieb, 2009).



Abbildung 10: Zwei der vier Urformverfahren (links: Giessen, rechts: Sintern) (RunawayChoppers, 2010; Wikipedia, 2013)

4.2.3 Mechanische Oberflächenbearbeitung

Eine Reihe anwendungsspezifischer Verfahrensvarianten oder -kombinationen kommt zur mechanischen Oberflächenbearbeitung in Frage. Müssen metallische Werkstücke poliert, geschliffen oder entfettet werden, ist z.B. das Gleitschleifen (Trowalisieren) geeignet (Muff-Levis, 2017). Das Werkstück wird dabei zusammen mit Schleifkörpern und einer Schleifmittellösung (Compound) in eine Trowalisierungsanlage gegeben und unter rotierender Bewegung behandelt. Das Trowalisieren einer Produktcharge kann bis zu einer Stunde dauern und zwischen 40 und 100 Liter Frischwasser

verbrauchen [3]. Der Einsatz von Wasser und Compound ist beim Gleitschleifen unverzichtbar, um den entstehenden Abrieb der Schleifkörper aufzunehmen und abzutransportieren. Ihre Zusammensetzung ist für gewöhnlich vergleichbar mit der von Kühlschmiermitteln, sie enthalten ebenso Chemikalien zum Korrosionsschutz, Komplexbildner und Entfettungsstoffe (siehe auch Kapitel 4.2.2) (Muff-Levis, 2017). Das entstandene Abwasser enthält neben Abrieb von Metallbauteilen und Schleifkörpern (Keramik oder Kunststoff), auch eingeschleppte Öle und Fette sowie die Bestandteile der KSM und Entfetter. Eine Aufreinigung des Wassers und Wiederverwendung des Compounds wird z.B. mittels Zentrifugation und Flockung ermöglicht [3] (Walther Trowal GmbH).

4.2.4 Vorbehandlungsverfahren

In vielen Unterbranchen der Metallverarbeitung spielt die Oberflächenvorbehandlung eine wichtige Rolle. Ziel der eingesetzten Verfahren ist es, die Metalloberflächen von Rückständen vorheriger Behandlungsschritte zu reinigen und ggf. für nachfolgende Behandlungen vorzubereiten. Dies geschieht üblicherweise in mehrstufigen Spritz- oder Tauchbädern unter Verwendung saurer oder alkalischer wässriger Lösungen und anschliessender Wasserspülung (Abbildung 11) (Muff-Levis, 2017). Die im Projekt befragten Unternehmen hatten, je nach technologischer Spezialisierung und Produktionsumfang, insgesamt zwischen 9 [4, 6] und 20 [1] Tauchbäder mit Füllvolumina von jeweils etwa 20 m³ [1, 4, 5] im Einsatz.

Tabelle 7: Übersicht der wichtigsten Inhaltsstoffe in Kühlschmiermittel (Baumann Mineralölvertrieb, 2009; Dopatka, 1993)

Inhaltsstoff	Aufgaben	Beispielstoffe
Basisöl	Basisflüssigkeit, Schmierwirkung	Kohlenwasserstoffe, synthetische Ester, Polyglykole
Emulgator	Verringerung der Grenzflächenspannung zwischen Öl- und Wasserphase	Alkanolaminseife, Kaliumseife als anionische Emulgatoren, Fettalkoholethoxylat, Fettsäureamid als nichtionogene Emulgatoren, organische Borverbindungen
Korrosionsinhibitor	Bildung eines Schutzfilms auf der Metalloberfläche	Alkanolamine, Sulfonate, Fettsäureamide, Carbonsäureseife, organische Borverbindungen
Entschäumer	Verbesserung der Schmierwirkung	Pflanzliche oder synthetische Ester, Siliconpolymere, Tributylphosphat
Biozid	Hemmung des mikrobiellen Befalls der Emulsion	Formaldehydabspalter, Borsäure, Alkoholderivate, N/S-haltige Heterocyclen
Antioxidantien	Unterbindung natürlicher Oxidationsvorgänge	Organische Sulfide, Zinkdithiophosphate, aromatische Amine
Lösungsvermittler, Stabilisator	Verbesserung der Emulsionsstabilität	Benzotriazol, Glykol

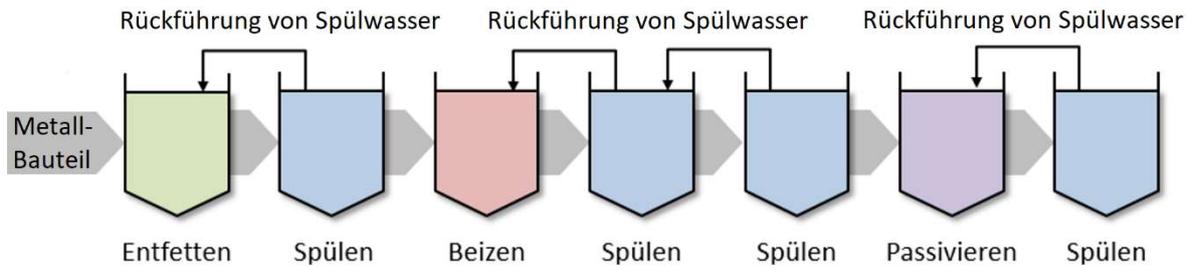


Abbildung 11: Typischer Aufbau einer Metallvorbehandlungsanlage, bestehend aus Entfettungs-, Beiz- und Passivierungsbädern mit Spülschritten dazwischen

In Vorbehandlungsverfahren können neben Metallen auch Cyanide, Chloride, Sulfate, Phosphate und Nitrate ins Abwasser gelangen. Bei der Verwendung von wässrigen alkalischen Reinigern fallen Abwässer mit Polyphosphaten und anderen Komplexbildnern wie Gluconsäure, Triethanolamin und Nitrilotri-Essigsäure (NTA) an. Eine wichtige Rolle spielen hier ausserdem die Stoffgruppen der Komplexbildner und der Tenside, wobei beispielsweise Nonylphenoethoxylat (NPE) und Perfluoroktansäure (PFOS) zu nennen sind (Environmental Protection Agency, 2008). Hervorragende Reinigungsleistungen können mit chlorierten Kohlenwasserstoffen wie Trichlorethylen erzielt werden. Jedoch ist der Einsatz solcher Lösungsmittel aus Umweltgründen sehr eingeschränkt und mit hohen Auflagen versehen.

Bei der Reduktion von Stoffeinträgen aus Vorbehandlungsverfahren stellt die grosse Vielfalt an Betriebschemikalien und deren Inhaltsstoffen insgesamt eine Herausforderung dar. In den befragten metallverarbeitenden Betrieben mit Vorbehandlungsstufen kamen jeweils über 5 verschiedene Chemikalienmischungen zum Einsatz, deren Wirkung und Zusammensetzung den Mitarbeitern häufig unklar ist [1, 5, 6, 11]. Der im Projekt befragte Hersteller von Entfettungschemikalien hat z.B. über 40 verschiedene Produkte im Angebot, deren Einsatz jeweils von vielen Faktoren abhängt [8]:

- Qualitätsanforderungen (z.B. in Abhängigkeit eines folgenden Beschichtungsverfahrens)
- zu behandelndes Metall (z.B. Eisen, Zink oder Aluminium)
- Betriebsbedingungen (z.B. Verweilzeiten und Badtemperatur)
- Verfahrensführung (z.B. Spritz- oder Tauchverfahren mit oder ohne Rückführung)

Die Wirkstoffkonzentrationen in Vorbehandlungsbädern liegen üblicherweise im Bereich von 2-5 %. Kommen anstelle von Tauchbädern Spritzverfahren zum Einsatz, kann aufgrund des zusätzlichen mechanischen Reinigungseffekts durch den Wasserstrahl die Stoffkonzentration etwas verringert werden, ohne das Qualitätseinbussen zu erwarten sind [8]. Der interviewte Chemikalienhersteller merkte an, dass Kunden sich vermehrt für Niedrigtemperaturbäder (35-40 °C) interessieren, deren geringere Wirksamkeit allerdings üblicherweise nur durch einen erhöhten Chemikalieneinsatz kompensiert werden kann [8]. Durch Verschleppungs- und Verdünnungsverluste werden in den meisten Unternehmen die Betriebsstoffe der Bäder regelmässig nachdosiert [2, 5, 6]. Bringen wechselnde Auftragschargen unterschiedliche Anforderungen an die Vorbehandlung mit sich, werden üblicherweise die Verweilzeiten in den einzelnen Bädern angepasst, während Temperatur und Konzentrationen unverändert bleiben [4].

Einen wesentlichen Einfluss auf die Emission von Betriebschemikalien haben die Standzeiten der Vorbehandlungsbäder. Eine Gegenüberstellung zeigt, dass sich je nach Verfahrensführung die

Standzeiten in den befragten Betrieben deutlich unterscheiden (Tabelle 8). In allen Fällen wurden höhere Standzeiten erreicht, als vom Hersteller der Betriebsstoffe empfohlen wird. In der Praxis werden die Standzeiten erfahrungsgemäss meist so weit ausgereizt, bis entweder die Qualität des Bades deutlich nachlässt oder die geforderten Produktspezifikationen nicht mehr gewährleistet werden können [1, 2, 4, 6]. In einem Fall konnte die Standzeit eines Brünierbades von regulär 2 Wochen auf 6 Monate erhöht werden, ohne dass Qualitätseinbussen zu beobachten waren [1]. Ein ausserplanmässiger Austausch von Bädern kann jedoch jederzeit notwendig werden, wenn die Qualität der Bäder rapide und deutlich nachlässt. Das ist meist bei Auftragsarbeiten der Fall, wenn z.B. vom Kunden angenommene Ware zu stark mit Fetten belastet ist [4, 8]

Eine gute Schadstoffrückhaltung in Vorbehandlungsverfahren lässt sich meist sehr einfach durch ausreichend lange Abtropfzeiten oder durch den Einbau von Spritzblechen in den Reinigungsstufen ermöglichen (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2011). In der Unternehmensbefragung fiel auf, dass die Abtropfzeiten mit 3-5 Minuten [1, 2, 6] meist deutlich hinter der Empfehlung von 5-15 Minuten [8] zurückblieben. Dadurch erhöht sich die Menge an Betriebschemikalien, die in nachfolgende Spülschritte verschleppt und aus dem Prozess herausgeführt wird. Die realisierten Abtropfzeiten waren insgesamt wenig im Fokus der Betriebe [2,5] und zwar unabhängig davon, ob der Bäderbetrieb manuell [1, 6] oder programmiert automatisch [2, 4, 5] erfolgte. In einigen Unternehmen wird gezielt darauf geachtet, durch eine optimierte Chargierung und Bauteilaufhängung schöpfendes Austragen von Bädereinhalten zu vermeiden [1, 6]. Ein manueller Umhängeschritt zwischen Bauteilhärtung und Brünierung verbesserte in einem Unternehmen zwar die Bäderverschleppung, generiert aber einen zusätzlichen Mehraufwand [1].

Entfetten

Entfettungsmittel werden eingesetzt, um fettige Anhaftungen wie Kühlschmiermittel, Korrosionsschutzöle, Fette usw. auf Metalloberflächen zu entfernen. Zu den drei am häufigsten verwendeten Reinigungsmedien zählen wässrige Lösungen, nicht halogenierte organische Lösemittel und chlorierte Kohlenwasserstoffe (Jelinek, 2013; Muff-Levis, 2017).

Aufgrund der Gefahren von bestimmten chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) gegenüber Mensch und Umwelt unterliegt die Verwendung Verboten und strengen Beschränkungen, welche in der Schweizerischen Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung festgehalten sind (Schweizerischer Bundesrat, 2005). Wegen ihrer guten und universellen Reinigungswirkung werden chlorierte Lösemittel noch in Spezialfällen, wie bei besonders starker Verschmutzung oder sehr hohen Reinheitsanforderungen angewendet. Nicht halogenierte organische Lösemittel besitzen ebenfalls ein gutes Lösungsvermögen für Fette, Öle und Wachse, sind aber zum Teil entzündbar. Sie sind bedeutend umweltfreundlicher und weniger gesundheitsschädlich als chlorierte Lösemittel. Wässrige Reiniger lösen Salze besser als organische Lösemittel, hingegen Fette und Öle weniger gut. Durch den Einsatz mechanischer Unterstützung (z.B. Druckfluten, Ultraschallunterstützung) und einer Erhöhung der Badtemperatur sind aber wässrige Reinigungssysteme auch für hartnäckige organische Verschmutzungen geeignet [8] (Schestag, 2015). Wässrige Entfettungssysteme haben gegenüber der Reinigung mit nichthalogenierten Kohlenwasserstoffen allerdings auch Nachteile, insbesondere hinsichtlich des Energieaufwands beim Trocknen und den teilweise nicht unerheblichen Anforderungen an die Abwasserreinigung (Schestag, 2015).

Tabelle 8: Standzeiten unterschiedlicher Vorbehandlungsbäder in den befragten Unternehmen und laut Herstellerempfehlung

Verfahren	Realisierte Standzeiten	Empfohlene Standzeit
Entfetten	6 Monate [2]	3 Monate [8]
	10 Monate [4]	
	6-12 Monate [6]	
Beizen	24-60 Monate [4]	3 Monate [8]
	6-12 Monate [6]	
Brünieren	6 Monate [1]	6 Monate [8]
	> 60 Monate [4]	
	6-12 Monate [6]	

Zu behandelnde Abwässer fallen bei Spülgängen nach wässrigen Entfettungslösungen an. Eine dafür geeignete Abwasservorbehandlung umfasst in der Regel Fällungs-, Flockungs- und Neutralisationsverfahren (Muff-Levis, 2017), die auch in den meisten befragten Unternehmen zum Einsatz kamen [2, 3, 5, 6]. Werden cyanidhaltige Bäder eingesetzt, ist eine Oxidation der Cyanide, z.B. mittels UV und Wasserstoffperoxid, notwendig. Zu beachten ist die mögliche Entstehung von AOX, wenn zur Reinigung cyanidhaltiger Abwässer Hypochlorit eingesetzt wird. Stand der Technik ist es daher im Allgemeinen, cyanidische Entfettungsverfahren durch alternative Techniken zu ersetzen (Umweltbundesamt, 2015). Sind in den Entfettungschemikalien starke Komplexbildner wie EDTA (Ethylendiamintetraessigsäure) oder NTA (Nitrilotriessigsäure) enthalten, gilt es als Stand der Technik, diese Stoffe durch biologisch abbaubare Alternativen (z.B. Derivate der Glykolsäure) zu ersetzen oder alternative Techniken anzuwenden. Wenn EDTA verwendet werden muss, müssen die Verluste möglichst geringgehalten und alle Reste im Abwasser geklärt werden. EDTA lässt sich z.B. vollständig durch UV-Strahlung und Wasserstoffperoxid entfernen (Umweltbundesamt, 2015).

Beizen

In der Metallindustrie wird das Beizen zur Vorbehandlung eingesetzt, um metallisch reine, blanke und oxidfreie Oberflächen zu erhalten (Abbildung 12). Mittels Säuren oder Laugen werden Rost, Zunder, Oxidschichten, Guss- oder Walzhaut entfernt (Jelinek, 2013). Stähle werden vorwiegend mit sauren Lösungen, wie Salz-, Schwefel- oder Salpetersäure, gebeizt. Zur Behandlung von Aluminium- und Zinkwerkstoffe können sowohl saure als auch alkalische Beizen eingesetzt werden. Um die Auflösung des Grundmaterials gering zu halten, werden den Beizsäuren in der Regel organische Inhibitoren zugegeben. Durch Zugabe von Tensiden kann zusätzlich eine begrenzt entfettende Wirkung erzielt werden (Schestag, 2015). Als erwähnenswerte Neuentwicklung gilt die sogenannte «Neutrale Beize», die pH-neutral ist, dafür aber Phosphonate als Komplexbildner enthält. Sie stellt allerdings wegen des hohen Chemikalieneinsatzes und der aufwändigen Entsorgung nur in Spezialfällen eine sinnvolle Alternative dar [8].

Mit der Zeit reichern sich in den Beiz- und Spülbädern Metallionen an, weshalb sie regelmässig gewechselt werden müssen. Verworfen Bäder können betriebsintern durch Schwermetallfällung und Neutralisation oder extern als Sonderabfall in chemisch-physikalischen Behandlungsanlagen für Industrieschlämme und Abwässer entsorgt werden (Muff-Levis, 2017; Schestag, 2015). Bäder auf

Schwefelsäurebasis enthalten oftmals viel Sulfate, welche mit Kalk bis zu einem Gehalt von etwa 1000 mg/l gereinigt werden können. Bäder in denen Buntmetalle behandelt werden enthalten oft Fluoride, z.B. Ammoniumbifluorid, die ebenfalls mit Kalk bis zu einem Restgehalt von etwa 40 mg/l entfernt werden können (Muff-Levis, 2017).

Dekapieren

Das Dekapieren wird angewendet, um störende Oxidschichten und alkalische Rückstände, welche nach vorangegangener Behandlung in einem alkalischen Entfettungsbad entstehen, auf metallischen Oberflächen vor dem Beschichtungsprozess zu entfernen und eine aktive Oberfläche zu erzeugen (Blöcher Oberflächentechnik GmbH, 2017). Zum Einsatz kommen hier stark verdünnte Mineralsäuren oder aktivierende saure Lösungen mit welchen nur dünne Oxid- oder Anlaufschichten entfernt werden können (Schestag, 2015).

Die entstehenden Abwässer enthalten neben den entsprechenden eingesetzten Säuren auch abgelöste Metalle. Als innerbetriebliche Vorbehandlung können verbrauchte Dekapierbäder gefällt, wenn nötig geflockt und neutralisiert werden. Der Schlamm kann mittels Filterpresse entwässert und der zurückgebliebene Filterkuchen muss als Sonderabfall entsorgt werden. Bäder auf Schwefelsäurebasis können zudem hohe Sulfatgehalte im Abwasser verursachen, welche bei Sulfatkonzentrationen über 500 mg/l betonkorrosiv sein können. Zur Entfernung der Sulfate kann dem Abwasser Kalk zugegeben werden. Der Einsatz von Kalk kann auch zur Entfernung von Fluoriden, welche in Dekapierbädern für Buntmetalle anfallen, verwendet werden (Muff-Levis, 2017).

4.2.5 Beschichtungsverfahren

Nach der Oberflächenbearbeitung folgen in der Regel unterschiedliche Beschichtungsprozesse wie Phosphatieren, Brünieren oder Lackieren. In den letzten 20 Jahren wurden vor allem Fortschritte in der Materialentwicklung erzielt, welche die Fertigungstechnik und die Produktqualität beeinflussen. Dadurch konnte die Material- und Energieeffizienz in verschiedenen Prozess- und Anlagenbereichen verbessert werden. Umwelt- und arbeitsschutzrelevante Aspekte der verschiedenen Beschichtungsverfahren sind insbesondere die Freisetzung von leichtflüchtigen organischen Lösemitteln (VOC), die Entstehung von Sonderabfällen und belastetem Abwasser (Schestag, 2015).



Abbildung 12: Beizen von Aluminiumblechen im Tauchverfahren (ESP Südexal GmbH)

Chromatieren

Die Chromatierung dient dem Korrosionsschutz metallischer Oberflächen und erzeugt einen geeigneten Haftgrund für nachfolgende Schichten. Mit Hilfe von Chromsäure bildet sich auf dem zu behandelten Werkstück eine Chromatschicht. Aufgrund dieser gebildeten anorganischen nichtmetallischen Schutzschicht, wird das Verfahren auch zur Passivierung gezählt (Holzapfel Group, 2017).

Herkömmlicherweise wird sechs- oder dreiwertiges Chrom für den Chromatierungsprozess eingesetzt. Das hochgiftige, sechswertige Chrom weist karzinogene und erbgutverändernde Eigenschaften auf (European chemicals agency, 2010). Mehrere Chrom(VI)-Verbindungen sind mit anderen besonders gefährlichen Substanzen auf der Zulassungsliste von REACH, dem europäischen Chemikaliengesetz, aufgelistet. Diese Substanzen dürfen in Zukunft nur noch mit einer Zulassung für den spezifischen Gebrauch verwendet werden. Die Schweiz hat 2012 dieses Regulierungsinstrument und die entsprechende Liste in die Schweizer Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV, Anhang 1.17) übernommen und verlangt ab dem 1. Juni 2021 eine Zulassung für verschiedene Chrom(VI)-Verbindungen. Für gewisse Oberflächenprozesse, in denen Chromtrioxid, seine Säuren und deren Oligomere sowie Natriumdichromat zum Einsatz kommen, besteht keine Zulassungspflicht, da in deren Endprodukt kein Chrom(VI) vorliegt (Roth, 2017) [8].

Sechswertige Chromverbindungen werden in die dreiwertige Form überführt, die als Chrom(III)-Hydroxide durch eine Neutralisation gefällt werden können. Üblicherweise erfolgt die Reduktion mit Natriumhydrogensulfit (Bisulfit) bei pH-Werten unter 2,5. Bei hohen pH-Werten kann die Reaktion auch im alkalischen Bereich mit Natriumdithionit oder Eisen(II)-Verbindungen durchgeführt werden, wodurch das Ansäuern entfällt (Umweltbundesamt, 2015).

Brünieren

Das Brünieren als Fertigungsverfahren wird zur Oberflächenbehandlung bei Eisenwerkstoffen verwendet und dient als Korrosionsschutz. Durch stark oxidierende Lösungen wird auf der Oberfläche ein Oxidfilm (Fe_3O_4) erzeugt, das Eisen färbt sich dabei braun bis schwarz. Brünierbäder können aus sauren oder alkalischen Lösungen, sowie aus Salzschnmelzen bestehen. Am häufigsten wird eine Lösung aus Natriumhydroxid unter Zusatz von Oxidationsmittel, z.B. Natriumnitrit, verwendet, so z.B. auch bei einem der befragten Unternehmen [5]. Brüniert werden kann heiss bei Temperaturen von 135°-145°C oder kalt bei 80 °C (Schestag, 2015; Muff-Levis, 2017). Bevor die Werkstücke brüniert werden können, wird ein Reinigungs- und anschliessend ein Spülschritt vorgeschaltet. Nach dem Brünieren wird nochmals mit Wasser gespült und am Schluss erfolgt eine Beölung des Werkstücks, um einen dauerhaften Korrosionsschutz zu gewährleisten (Schestag, 2015).

Das Brünieren selbst ist ein abwasser- und schwermetallfreies Verfahren, da die Bäder geschlossen sind und lange Standzeiten haben, bis sie als Abfall entsorgt werden. Die Spül- und Reinigungsschritte verursachen Abwasser, das normalerweise mittels Neutralisation behandelt wird. Hohe Nitritgehalte können mit Oxidationsmitteln wie Hypochlorit oder mit Amidosulfonsäure gesenkt werden (Muff-Levis, 2017). Im Brünierbad konzentriert sich durch die Aufnahme von CO_2 aus der Luft Natriumcarbonat auf, welches mit verschiedenen Metallverbindungen Brünierschlamm bildet. Der entstandene nitrithaltige Schlamm kann mittels Zyklonen oder Zentrifugen aus dem Bad entfernt und als Sonderabfall entsorgt werden (Muff-Levis, 2017).

Lackieren

Es gibt eine Vielzahl an Lackierverfahren, von denen am häufigsten das Nass-, Tauch- und Pulverlackieren vorkommen (Schestag, 2015). Vier der interviewten Betriebe wendeten für die Beschichtung der Werkstücke Lackierprozesse an [2, 4, 5, 6]. Die Werkstücke wurden entweder nur oder hauptsächlich pulverlackiert [2, 5, 6] oder es wurden beide Verfahren zu gleichen Teilen angewendet [4].

Die Nasslackierung gilt heute als das meistverbreitete Verfahren in Industrie und Handwerk und erfolgt hauptsächlich über eine Spritztechnik, die den Nasslack mittels einer Spritzpistole zerstäubt und auf das Werkstück aufbringt (Abbildung 13, links). Die Spritzlackierung gewährleistet eine hohe Flächenleistung und Beschichtungsqualität sowie grosse Flexibilität und Mobilität. Nachteilig ist, dass ein erheblicher Teil des Lackes fehlverspritzt wird (Overspray). Durch den Einsatz geeigneter Spritzpistolen oder elektrostatisch unterstützter Verfahren lässt sich der Overspray allerdings deutlich senken. Zur Absaugung des Oversprays und der Lösemittel erfolgt die Spritzlackierung oft in Kabinen, welche den Lacknebel absaugen und durch Filter (Trockenabscheidung) oder über einen Wasservorhang (Nassabscheidung) auffangen (Schestag, 2015). Prinzipiell besteht die Möglichkeit, die in der Nassabscheidung entstehenden Abwässer durch eine Fällung und Flockung mit anschliessender Filtration zu behandeln oder als flüssiger Sonderabfall zu entsorgen (Muff-Levis, 2017). In den befragten Unternehmen fiel jedoch aufgrund der eingesetzten Trockenabscheidung überhaupt kein Abwasser an. Die Entsorgung der Lackabfälle und des in Vliesen und Filtern abgefangenen Oversprays erfolgte in allen befragten Betrieben als Sonderabfall [2, 4, 5, 6].

Die meisten Lacke enthalten Lösemittel, die bei der Verarbeitung freigesetzt werden. Um Lösemittlemissionen zu verringern, ist eine Umstellung auf lösemittelärmere Lacksysteme wie Wasserlacke und «High Solids» eine mögliche Alternative (Romey, et al., 2009). Durch die Verwendung von Wasserlacken können zudem Reinigungsvorgänge an den Werkstücken und den Lackiereinrichtungen mit Wasser erfolgen anstelle von lösemittelbasierten Reinigern. Weiter enthalten Lacke unter anderem Schwermetalle, chlorierte Kohlenwasserstoffe, Tenside und Konservierungsstoffe (Zentralschweizer Umweltfachstellen & Innerschweizer Maler-Verband, 2015).



Abbildung 13: Manuelles Lackieren von Blechbauteilen (Links: Nasslackieren, Rechts: Pulverlackieren)
(Verzinkerei Wollerau AG)

Die Pulverlackierung ist ein Fertigungsverfahren, welches die Eigenschaften der metallischen Werkstücke entscheidend verändern kann. Durch die Behandlung erhöht sich der Korrosionsschutz, die Chemikalienbeständigkeit und die Widerstandsfähigkeit. Zudem erhält das beschichtete Werkstück antibakterielle Eigenschaften und gute elektrische Ableiteigenschaften (Pulvertec Nord, 2017). Eine Pulverpistole lädt die Lackteilchen elektrostatisch auf, welche danach fein verteilt auf das Werkstück aufgebracht werden (Abbildung 13, rechts). Beschichtet werden können demnach nur Werkstücke, die elektrisch leitfähig sind, wie etwa Stahl oder Aluminium. Nach der Applikation wird die Farbbeschichtung bei Temperaturen von 140° und 200 °C eingebrannt (Rino Weder, 2016). Beim Pulverlackieren fallen kein Abwasser und keine Lösemittlemissionen an [2, 4, 6].

5. Ressourceneffizienz in Industrie und Gewerbe

5.1 Problemverständnis und Lösungsansätze

Das produzierende Gewerbe bezieht und verbraucht eine Vielzahl verschiedener Ressourcen, wobei Wasser, Materialien und Energie die wesentlichen Kategorien darstellen. Im Rahmen der "Cleaner Production"-Anstrengungen sind derzeit viele Unternehmen bestrebt, ihren Einsatz an Ressourcen zu reduzieren. Dies kann einerseits durch prozessintegrierte Ansätze geschehen, z.B. durch optimierte und ressourcensparende Produktionsprozesse. Andererseits kommen prozessintegrierende Lösungen in Frage, etwa die Rückgewinnung und Wiederverwendung von Ressourcen in einem nachgeschalteten Recyclingverfahren. Im Rahmen des Projekts sollen schwerpunktmässig die Ressourcen Wasser und Material betrachtet werden, da sie im direkten Zusammenhang zur Abwasserbelastung stehen. Es steht eine Fülle von Literatur zum Thema "Ressourceneffizienz in Industrie und Gewerbe" zur Verfügung, die Empfehlungen und Massnahmen zur praktischen Umsetzung der Ressourceneffizienz in verschiedenen Industriebranchen liefert (Emec, et al., 2013; Impulsgruppe "Dialog Grüne Wirtschaft", 2016; Dückert, et al., 2015). Die durchgeführte Unternehmensbefragung hat gezeigt, wie eng das Thema Ressourceneffizienz in der praktischen Umsetzung mit ökonomischen Aspekten verbunden ist (Abbildung 14): Als wichtigster Treiber wurden Einsparpotentiale durch Ressourceneffizienzmassnahmen identifiziert, z.B. im Bereich der Betriebs- oder Entsorgungskosten. Analog dazu sind entstehende Zusatzkosten oder anderweitiger Mehraufwand der wichtigste Grund für Unternehmen, von solchen Massnahmen abzusehen. Als weitere Motivation für die Umsetzung von Massnahmen wurden gesetzliche Verpflichtungen sowie Nachfrage von Seite der Kunden genannt. In Hinblick auf die Schwerpunktbranche Metallherstellung und -verarbeitung, sowie auf die im Projekt besonders relevanten Ressourcen Wasser und Material wurde eine Reihe von Ansätzen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz identifiziert und in Kategorien zusammengefasst (Abbildung 15).

5.1.1 Rückgewinnung und Wiederverwendung von Ressourcen

Das Recycling vor allem von Wasser kann in vielen Gewerben einen wesentlichen Beitrag zur Ressourceneffizienz leisten. Für die Kreislaufführung von Brauchwasser ist in den meisten Fällen eine Zwischenbehandlung nötig, etwa zur Entfernung bestimmter Inhaltsstoffe oder zur Kühlung. Anschliessend ist eine Wiederverwendung des Wassers möglich, wobei häufig eine Nutzung auf unterschiedlichen Qualitätsniveaus sinnvoll ist (Hillenbrand, et al., 2008). Die Mehrfachnutzung von Wasserströmen ist lediglich in solchen Fällen nicht zu empfehlen, in denen das Wasser als Verschleppungs- oder Spritzverlust anfällt, oder wenn der Kreislauf nach Betriebsstillstand, Reinigung oder Chargenumstellung hochgefahren wird (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004). Wegen der Aufkonzentrierung bestimmter Stoffe in mehrfach recycelten Wasserströmen ist von dieser Massnahme auch dann abzusehen, wenn der Produktionsprozess anfällig für Störungen durch angereicherte Stoffe ist, etwa im Falle von Schleif- oder Fällungsverfahren (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2011; Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004). Nicht nur zur Einsparung von Wasser, sondern auch von anderen Betriebsstoffen kann Kreislaufführung eine Option darstellen. Gerade für anspruchsvolle Trennaufgaben wie etwa zur Aufkonzentration und zur Wertstoffrückgewinnung sind Recyclingverfahren mit Membrantechnologie häufig vielversprechend (Hillenbrand, et al., 2008). In der durchgeführten Unternehmensbefragung fiel auf, dass vor allem in kleineren Betrieben eine Wasserrückgewinnung als nicht wirtschaftlich betrachtet und daher darauf verzichtet wurde [1, 2, 3]. Grössere Unternehmen mit Vorbehandlungsbädern hatten eine Wasseraufbereitungsanlage in Betrieb, wobei meist Verdampfungsanlagen eingesetzt wurden [4, 5, 6].

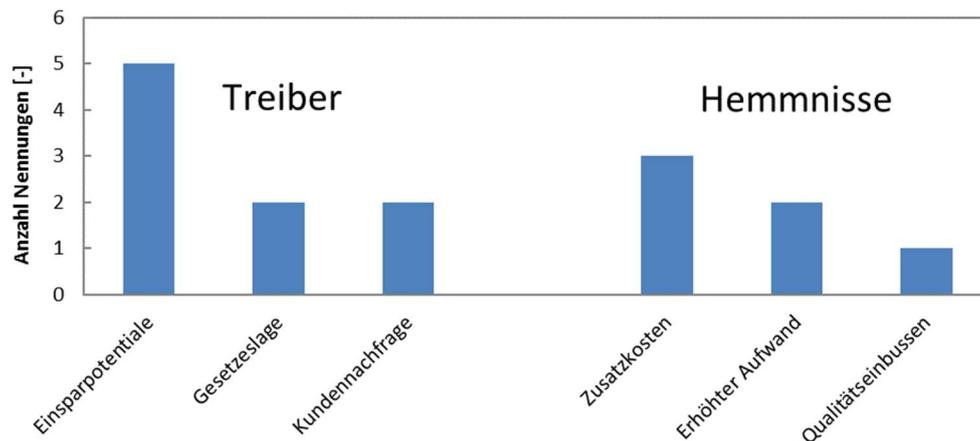


Abbildung 14: Die wichtigsten Treiber und Hemmnisse für Ressourceneffizienzmassnahmen, dargestellt mit der Häufigkeit ihrer Nennung in der Unternehmensbefragung (Mehrfachnennungen möglich)

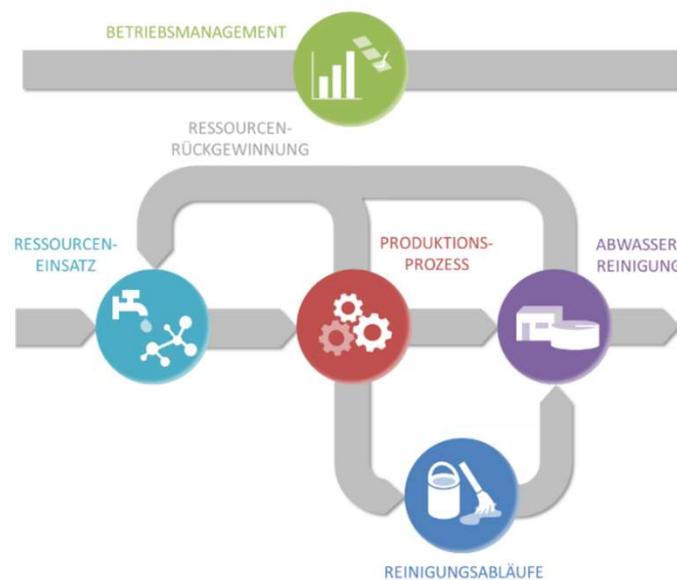


Abbildung 15: Identifizierte Ansatzpunkte zur Optimierung der Ressourceneffizienz in Industrie und Gewerbe

5.1.2 Optimierung des Produktionsprozesses

Technischen Produktionsprozessen kommt in Industrie und Gewerbe eine besondere Bedeutung zu, und ihre Optimierung oder Modifikation ist häufig ein guter Ansatz zur Verbesserung der Ressourceneffizienz (Hillenbrand, et al., 2008). Vergleichsweise einfach umzusetzen ist im Allgemeinen das Nachrüsten auf den aktuellen Stand der Technik (Dückert, et al., 2015). Auch Auswahl und Einsatz von Betriebsstoffen bieten häufig Potential zur Optimierung - häufig empfohlen wird beispielsweise die Verwendung von Regenwasser als Ersatz für Frischwasser (Hillenbrand, et al., 2008; Dückert, et al., 2015).

Auch wenn sie mit vergleichsweise grossem Aufwand einhergeht, kann im Einzelfall die Umstellung ganzer Verfahrensschritte eine wesentliche Ressourceneinsparung ermöglichen (siehe Kapitel 5.2). Als konkrete wassersparende Alternativverfahren kommen - je nach Branche und Anwendungsfall - Gegenstromextraktion, indirekte Kühlsysteme, Vakuumerzeugung im geschlossenen Kreislauf sowie die abwasserfreie Abgasreinigung in Frage (Hillenbrand, et al., 2008). Die Optimierung der betriebsinternen Abwasserreinigung stellt eine weitere Massnahme zur verbesserten Ressourceneffizienz dar – sinnvoll sind hier häufig eine Trennung unterschiedlich belasteter Abwasserströme und ein gutes "Waste Design". In der metallverarbeitenden Industrie – vor allem, wenn Vorbehandlungsbäder betrieben werden – wäre theoretisch eine Trennung und separate Behandlung von alkalischen, sauren, komplexbildnerhaltigen und cyanidhaltigen Wasserströmen sinnvoll [9]. Insgesamt zeigte die durchgeführte Befragung allerdings, dass das Abwassermanagement von den wenigsten Unternehmen als relevantes Thema wahrgenommen wird [2, 6, 7]. Nur in Einzelfällen erfolgte eine separate Behandlung von Prozess- und Sanitärabwasser [3, 6]. Je nach Abwassereigenschaften und -behandlungsverfahren kann die gezielte Vermischung von Abwässern sogar als ressourcensparende Massnahme betrachtet werden, z.B. wenn dadurch der optimale pH-Wert zur Chromfällung ohne Dosierung von Neutralisationsmitteln erreicht werden kann [2].

5.1.3 Optimierung der Reinigungsabläufe

Da ein Grossteil des Frischwassers in Industrie und Gewerbe für Reinigungszwecke verwendet wird, ist die Optimierung von Reinigungsabläufen häufig von grosser Bedeutung für eine verbesserte Ressourceneffizienz. Zur Reduktion des Frischwasserverbrauchs werden üblicherweise "Clean in Place"-Reinigungen (CIP) sowie der Einsatz wassersparender Spültechniken empfohlen (Zettl, et al., 2014). Dazu zählen beispielsweise Kaskadenspülungen oder Schwallreinigungstechniken, die entweder eine Reduktion der Spülzeiten oder eine Verringerung des Wasserbedarfs bei gleichbleibender Reinigungsleistung erlauben (Zettl, et al., 2014; Hillenbrand, et al., 2008). Vor allem im Hinblick auf die Spülwasserbelastung und Materialrückgewinnung ist häufig der Einsatz von Molchsystemen sinnvoll, durch welche die Reinigung etwa bei Chargenwechseln deutlich optimiert werden kann (Zettl, et al., 2014). Je nach Verfahrensschema kann auch eine Mehrfachnutzung von Spülwasser in Frage kommen - in der Metallverarbeitung wird etwa ein dreistufiges Recycling von Wasser aus Spülbädern empfohlen (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2011). Spülwasserrecycling wird dann nötig, wenn beispielsweise die Verdampfungsverluste im beheizten Prozessbad gering sind und damit auch der Kaskadenstrom tief ist. In einer möglichen Spülwasserkreislaufführung kann das gebrauchte Spülwasser über Separatoren oder Filtration entölt und abschließend durch Ionentausch oder Umkehrosmose entsalzt werden (Abbildung 16).

5.1.4 Optimierung des Betriebsmanagements

Einen weiteren Beitrag zur Erhöhung der Ressourceneffizienz können praktische Veränderungen auf der Ebene des Betriebsmanagements liefern. In Unternehmen mit Batch- oder Chargenbetrieb kann bereits eine Optimierung des Produktionsplans helfen, Reinigungsaufwand und Ressourcenverluste zu minimieren (Hillenbrand, et al., 2008). In der durchgeführten Unternehmensbefragung stellte sich gerade dieser Ansatz als besonders schwer umsetzbar heraus, weil viele Betriebe der metallverarbeitenden Industrie als Dienstleister Aufträge verschiedener Kunden bearbeiten und bei Zeitplanung und Chargierung nur wenig Handlungsspielraum haben [1, 2, 3].

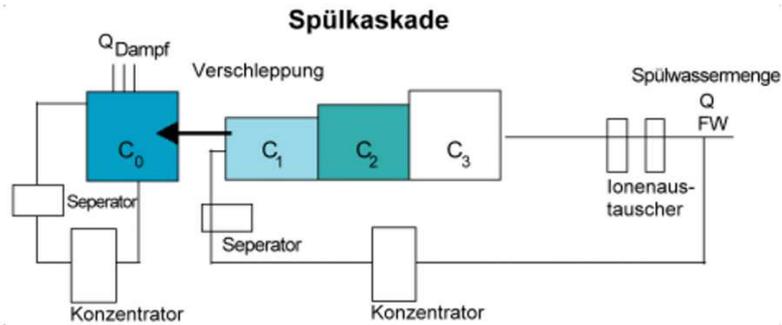


Abbildung 16: Mehrfachnutzung des Spülwassers durch Spülkaskade und Spülwasserkreislaufführung (Wigol, 2015). FW = Frischwasser, Q= Spülwassermenge [l/h] C₀=Konzentration des Prozessbades, C_n=Konzentrationen in den Spülbädern

Auch eine verbesserte Mess- und Regeltechnik kann zur Ressourceneffizienz beitragen (Hillenbrand, et al., 2008). Alleine durch die Nachrüstung von Informationssystemen wie etwa Wasserzählern und Steuerungselementen lassen sich Ressourceneinsparungen im Bereich von 5-10% erreichen (Zettl, et al., 2014). In Hinblick auf den Gewässerschutz kann in der betriebsinternen Abwasserbehandlung eine optische und akustische Alarmierung bei der Überschreitung von Grenzwerten, im Notfall auch eine Anlagenabschaltung oder Umleitung in ein Rückhaltebecken sinnvoll sein (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2011). In den befragten metallverarbeitenden Unternehmen wurde der Betriebsüberwachung im Bereich (Ab-)Wasser insgesamt nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Vereinzelt wurden Messdaten erfasst, aber nicht routinemässig verarbeitet oder zu Optimierungszwecken ausgewertet [1, 4].

Als entscheidende Triebkräfte für die Verbesserung der Wassereffizienz in Industrie und Gewerbe gelten sowohl ökonomische Aspekte als auch Fragen der praktischen Umsetzbarkeit. Von wirtschaftlicher Seite müssen beispielsweise die Kosten der Massnahmen gegen die Einsparpotentiale für Betriebsstoffe, Frischwasser und Abwasserentsorgung abgewogen werden. Die Umsetzbarkeit von Massnahmen hängt zum Beispiel von den technischen Voraussetzungen im Einzelfall ab – wichtige Impulse dazu können aus technischen Entwicklungen wie etwa günstig verfügbarer Messtechnik oder verbesserten spezialisierten Abwasserbehandlungsverfahren kommen (Hillenbrand, et al., 2008). In der metallverarbeitenden Industrie gelten die Frischwasserkosten insgesamt als «zu» niedrig, als dass sie Massnahmen mit entsprechendem Mehraufwand rechtfertigen würden [1, 4, 5]. Dieser geringe Anreiz zur Ressourceneffizienz wird auch von branchenfremden Akteuren als kritisch empfunden [9, 12, 13, 14]. Im Vergleich dazu wurden die Entsorgungskosten für Sonderabfälle von einigen Betrieben als so relevant eingestuft, dass in diesem Bereich eine Effizienzsteigerung und Kostenreduktion angestrebt wird [2, 4, 8].

Als wesentlicher Faktor wurde ausserdem die Sensibilisierung der Akteure im Unternehmen identifiziert. So kann beispielsweise ein grundlegendes Umweltbewusstsein im Unternehmen und die Verfügbarkeit von spezialisiertem Fachpersonal die Umsetzung von Ressourceneffizienz-Massnahmen begünstigen (Remmen, et al., 2016). Dem Mitarbeitercoaching kommt eine wichtige Rolle zu, um Ressourcenverluste durch Unwissen oder Unachtsamkeit von Mitarbeitern zu reduzieren. Die entsprechend geschulten Mitarbeiter können ausserdem einen Beitrag leisten, um Ressourcenverluste durch technische Störungen oder Undichtigkeiten zu vermeiden und zu beheben. Zudem ist ihr Wissen und ihre Motivation instrumental zur Identifikation von Verbesserungsmöglichkeiten und bei der Umsetzung von Massnahmen. Die Befragung hat gezeigt, dass vor allem branchenfremde Akteure der

Sensibilisierung der Mitarbeiter eine grosse Bedeutung zuschreiben [9, 13, 14], während die Relevanz von den betroffenen Unternehmen selbst weniger stark wahrgenommen wird. So wird die Sensibilisierung und Motivation der eigenen Mitarbeiter in den meisten Fällen als gut und ausreichend beschrieben [1, 3, 5, 6] und es werden zwar Schulungen zur Arbeitssicherheit, aber nicht zu Umwelt- oder Ressourcenschutz durchgeführt [4]. Von Seiten der Unternehmensleitung signalisieren einschlägige Zertifizierungen oder Teilnahmen an entsprechenden freiwilligen Programmen eine gewisse Sensibilisierung im Bereich Ressourceneffizienz. Die Umsetzung eines Umweltmanagementsystems nach ISO 14001 war in den meisten interviewten Betrieben etabliert [2, 4, 5, 7], während einzelne Unternehmen aufgrund des damit verbundenen erhöhten (Dokumentations-) Aufwands keine Zertifizierung anstrebten [1, 6]. Zusätzlich zu solchen freiwilligen Initiativen spielen Zulassungsverfahren, Verbote oder Anwendungseinschränkungen von Chemikalien und Anreizsysteme als gesetzgeberische Instrumente eine Rolle (Abegglen, et al., 2012). Die befragten Unternehmen hielten sich selbstverständlich an die gesetzlichen Vorgaben, empfanden viele Regelungen aber insgesamt als intransparent und schwer verständlich [1] und deren Umsetzung als zu aufwändig, z.B. im Fall der VOC-Lenkungsabgabe [4].

5.2 Verfahrensspezifische Betrachtungen

5.2.1 Urformverfahren

Urformverfahren wie Giessen gelten als vergleichsweise erprobt und lassen sich nicht beliebig optimieren. In den letzten Jahrzehnten konnten in diesem Bereich nur geringe Effizienzsteigerungen erreicht werden, und was vor 20-30 Jahren Stand der Technik war, gilt heutzutage noch nicht als veraltet [7, 12, 13]. Wasser wird vor allem zu Kühlzwecken und für die Formvorbereitung verwendet. Es wird empfohlen, die Kühlung in einem geschlossenen Kreislauf zu betreiben und allfälliges Abwasser, wenn möglich, wiederzuverwenden. Wasser mit einer niedrigeren Qualität kommt möglicherweise für einen Einsatz anstelle von Frischwasser in einem anderen Prozess in Frage (Environmental Protection Agency, 1996). Der befragte Rotguss-Hersteller verwendet seine Sand-Giessformen zum grössten Teil wieder, bevor das Material als Sonderabfall entsorgt werden [7]. Als wichtigste Ressource gilt die Abwärme der Schmelzöfen, welche anderweitig genutzt werden kann. Im Winter kann sie beispielsweise zum Betrieb von Heizungen oder zum Verdampfen von Lösungsmitteln eingesetzt werden [7].

5.2.2 Spanende Trennverfahren

Bei spanenden Verfahren spielt der Einsatz von Kühlschmiermitteln in Kreislaufführung eine besonders wichtige Rolle. Bei der Auswahl von Kühl- oder Schleifmitteln ist daher gezielt darauf zu achten, dass diese einen Kreislaufbetrieb ermöglichen, (Abbildung 17) (Dückert, et al., 2015).

Bei einer Kreislaufführung können die Standzeiten der wassermischbaren Kühlschmiermittel mindestens ein halbes Jahr bis sogar zwei Jahre betragen, bis ein vollständiger Austausch nötig wird [3, 5, 6]. Eine lange Standzeit von Kühlschmiermitteln trägt zu einer Reduzierung des Abfallaufkommens sowie der eingesetzten Mengen und damit zu einer Verminderung der Kosten bei. In der Praxis werden in der Regel wöchentliche Kontrollen mittels Refraktometrie durchgeführt und bei Bedarf wird neues Öl nachdosiert [3, 5, 6]. Grossen Einfluss auf die Standzeit kann biologischer Befall durch Mikroorganismen, Bakterien, Pilze oder Hefen haben. Die interviewten Betriebe beobachteten ein biologisches „Umkippen“ vor allem im Sommer bedingt durch die erhöhte Umgebungstemperatur [3, 6]. Es trat auch vermehrt biologischer Befall auf, wenn Kühlschmiermittel aus der Abtropfwanne wieder ins System

zurückgeführt wurde. Seitdem das abgetropfte Kühlschmiermittel entsorgt wird, wurde kein Umkippen mehr beobachtet [5]. Die anfallenden Metallspäne geben die interviewten Betriebe entweder dem Lieferanten zwecks Recycling zurück [6] bzw. werden an einen Altmetallhändler verkauft [3] oder werden aufgrund eines fehlenden Händlers in der näheren Umgebung als Sonderabfall entsorgt [5].

Stand der Technik ist ausserdem die Anwendung der Minimalmengenschmierung. Wie es der Name vermuten lässt, benötigt diese Technik nur geringe Mengen an Öl (ca. 5 bis 200 Milliliter Öl/h). Im Unterschied zur Überflutungskühschmierung, welche mehrere hundert Liter pro Stunde benötigt, können mit der Minimalmengenschmierung Kühlmittel eingespart sowie Kosten für den Einkauf, die fachgerechte Aufbereitung und Entsorgung stark reduziert werden (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, 2016). In einigen Fällen kann darüber hinaus durch die Anwendung von Trockenbearbeitungstechniken gänzlich auf jegliche Art von Schmierstoffen verzichtet werden (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, 2016).

5.2.3 Mechanische Oberflächenbearbeitung

Beim Gleitschleifen entstehen sowohl flüssige Abfälle als auch Schlämme durch den Abrieb der Schleifkörper und Werkstücke. Die Gleitschleifflüssigkeit kann in modernen Anlagen im Kreislauf gefahren werden, was den Einsatz von Betriebsstoffen reduziert. Zudem lässt sich die Abwassermenge im Vergleich zu einer Chargenbehandlung ohne Medienrückführung um mindestens 90% senken. Um eine möglichst lange Kreislaufführung zu ermöglichen, müssen die eingetragenen Verunreinigungen möglichst kontinuierlich aus dem Prozess ausgeschleust werden (Schestag, 2015; Muff-Levis, 2017). Bei häufig wechselnden Chargen, bei denen unterschiedliche Metalle behandelt und verschiedene Kühlschmiermittel eingesetzt werden, kann sich die Wiederverwendung der Gleitschleifflüssigkeit als schwierig erweisen, so dass sich eine Kreislaufführung in der Praxis nicht umsetzen lässt [3].

Es gibt einige Verwertungsmöglichkeiten für Abfälle aus Gleitschleifprozessen. Zum Beispiel können Schleifkörper – je nach Zusammensetzung – neu aufgearbeitet oder in der Baustoffindustrie verwertet werden (Schestag, 2015). Die Gleitschleifschlämme enthalten feine Metallspäne, welche zurückgewonnen werden können [3]. Da der Metallanteil in der Regel eher gering ist (< 10%), kommt eine Rückgewinnung oft nur bei der Bearbeitung von Edelmetallen und einigen Schwermetallen in Frage.



Abbildung 17: Bandfilteranlage zur Abtrennung der Metallspäne vom zu rezirkulierenden Kühlschmiermittel (APODIS GmbH)

5.2.4 Vorbehandlungsverfahren

In Vorbehandlungsverfahren der Metallindustrie lassen sich deutliche Ressourceneinsparungen typischerweise durch die Verlängerung der Standzeiten von Spülbädern erreichen (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2011). Beispielsweise konnte in einem interviewten Betrieb die Bäderstandzeit von 2 Wochen auf 6 Monate erhöht werden, ohne merkliche Leistungs- oder Qualitätseinbussen [1].

Austragsverluste und Verschleppungen aus den Beiz-, Reinigungs- und Spülbädern lassen sich vermindern, wenn die Gestelle, an denen die Werkstücke aufgehängt sind, so gestaltet werden, dass Flüssigkeiten schnell und gut ablaufen können. Dabei sollte auf schöpfende Teile verzichtet und auf schräg gestellte Rohre geachtet werden. Die Werkstücke selbst sollten möglichst wenig schöpfende Bereiche enthalten, z.B. können Sacklöcher oft durch Durchgangsbohrungen ersetzt werden. Auf die Bauteilgestaltung haben die wenigsten der befragten Betriebe Einfluss, da sie im Wesentlichen Auftragsarbeiten ausführen [1, 2, 3, 4, 5]. Eine günstige Aufhängung der Bauteile ist in einigen Betrieben hingegen Inhalt gezielter Optimierungsmassnahmen [1, 6]. Weiter ist auf ausreichende Abtropfzeiten zu achten, um Verschleppungen ins Folgebäd zu vermindern (siehe auch Kapitel 4.2.4). Die Werkstücke können zusätzlich gerüttelt oder abgeblasen werden (Schestag, 2015), was jedoch in keinem der befragten Unternehmen umgesetzt wurde.

Die empfohlene dreistufige Wiederverwendung von Spülwasser (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2011) wurde in keinem der besuchten Betriebe realisiert, stattdessen schwankte die Umsetzung der Spülschritte stark zwischen den Unternehmen. Während im kleinsten Betrieb kein Spülwasser aufbereitet wurde, war in grösseren Betrieben eine Kreislaufführung des Spülwassers im Einsatz [4, 5]. Das im Kreislauf geführte Spülwasser wird alle 2 bis 4 Wochen mittels Adsorption und Ionentauscher regeneriert [4]. Einige Anlagenbetreiber verbessern ihren Ressourcenverbrauch schon durch einen effizienten Betrieb der bestehenden Spülbäder, z.B. durch Auffüllen von Spülbädern mit Wasser der nachgelagerten Stufen anstelle von Frischwasser [4] oder durch Spülen von Bauteilen im Gegenstrombetrieb [6]. Empfohlen wird ausserdem der Einsatz wassersparender Reinigungsdüsen und eine verbesserte Temperaturregelung von Wärmetauschern mit Vorwärm- und Kühlbecken (Dückert, et al., 2015), was jedoch von keinem der befragten Betriebe umgesetzt wurde.

Des Weiteren wird die Rückgewinnung von Wertstoffen aus Spülbädern empfohlen (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2011). Als lohnenswert gilt heute vor allem die Rückgewinnung der Elemente Nickel, Kupfer, Zinn, Silber und Gold [9]. Kupfer, Nickel und Zink können mittels Trommelelektrolyse zurückgewonnen werden, die Edelmetalle Silber und Gold durch Elektrolysezellen (Antech-Gütling Gruppe, 2017; Prowatech AG, 2017). Für Spülwässer mit geringen Elektrolytkonzentrationen empfiehlt sich der Einsatz von Ionenaustauschern (Blume, 2010; Umicore Galvanotechnik GmbH, 2011).

Entfetten

Beim Entfetten ist es Stand der Technik, mit dem Vorfertiger zusammenzuarbeiten, um die an den Metallbauteilen anhaftende Menge an Fett oder Öl so gering wie möglich zu halten. Regelmäßiges Überprüfen der Anwendungsart, der Art des Öls und dessen Einsatzmenge können den Ölverbrauch minimieren. Durch Änderung der Fertigungsmethode könnte sogar ganz auf den Einsatz von Öl verzichtet werden (Umweltbundesamt, 2015). Die Unternehmensbefragung hat allerdings gezeigt, dass diese Ansätze im Falle von Auftragsarbeiten für Kunden keine Option sind [1, 2, 4].

Wässrige Entfettungssysteme sind der Lösemittelentfettung vorzuziehen, es sei denn, diese Systeme beschädigen das Substrat. Bei wässrigen Entfettungslösungen gilt es als Stand der Technik, die Menge

an verbrauchten Chemikalien und den Energieverbrauch zu reduzieren, indem Systeme mit langer Standzeit eingesetzt werden, die regeneriert sowie kontinuierlich gewartet werden (Umweltbundesamt, 2015). In den meisten befragten Betrieben findet tatsächlich eine regelmässige Kontrolle der Bäderqualität statt [2, 4, 6]. Dies geschieht üblicherweise, indem alle 1-2 Tage der pH-Wert gemessen und mit Sollwerten abgeglichen wird [2, 4] – in einem Fall finden zusätzlich dazu alle 3-6 Monate Kontrollen durch ein externes Labor statt [2].

Erfordert der Prozess den Einsatz von Lösungsmittel, ist es in Fällen starker Beölung sinnvoll, mechanische Verfahren, z.B. Zentrifugieren oder Luftmessen, zum vorgängigen Entfernen des Öls zu verwenden. In vielen Fällen kann das abgeschleuderte Öl durch eine Filtration zurückgewonnen werden. Eine mechanische Vorreinigung der zu entfettenden Teile hilft die Standzeiten der nachfolgenden Entfettungslösungen zu verlängern und die Menge an Chemikalien einzusparen (Umweltbundesamt, 2015). Eine mechanische Vorentfettung wurde allerdings in keinem der befragten Unternehmen eingesetzt.

Beizen

Es gibt verschiedene verfahrenstechnische Ansätze, um die Standzeiten von Beizbädern zu verlängern. Für das Beizen in grosstechnischem Maßstab ist es Stand der Technik, Verfahren zur Regenerierung und Badpflege wie Elektrolyse, Kühlkristallisation oder Ionenaustausch zur Verlängerung der Standzeiten einzusetzen. Die Rückgewinnung von Ätzlauge gilt als Stand der Technik, wenn deren Verbrauch hoch ist, keine Zusatzstoffe stören und die Produktoberfläche die Spezifikationen erfüllen kann (Environmental Protection Agency, 2008). Weitere in Frage kommende Massnahmen sind das mechanische Vorentrosten und Vorentzndern durch Bürsten und Strahlen sowie das Abfiltrieren fester Bäder-Verunreinigungen (Environmental Protection Agency, 2008). Auch das Einhalten der erforderlichen Beizzeit, regelmässige Kontrollen und Korrektur der Badzusammensetzung verbessern die Qualität der Bäder und tragen somit zur einer Standzeitverlängerung bei (Environmental Protection Agency, 2008; Schestag, 2015). In den befragten Betrieben kommen mechanische und Filtrationsverfahren nicht zum Einsatz, eine regelmässige Qualitätskontrolle und Nachdosierung bei Bedarf sind jedoch gängig [2, 4, 6]. Eine Aufbereitung von Beizbädern mit dem Ziel der Wertstoffrückgewinnung könnte in Zukunft lohnenswert werden, wenn die Markpreise für Titan oder Zirkonium entsprechend ansteigen. Eine Wiederverwendung mit dem Ziel, Entsorgungskosten einzusparen, erscheint hingegen nur in Einzelfällen sinnvoll [8].

Dekapieren

Beim Dekapieren besteht die wichtigste Möglichkeit zur Standzeitverlängerung darin, auf einen möglichst geringen Eintrag von Alkalinität aus dem Vorprozess zu achten, welcher durch effektives Zwischenspülen gewährleistet werden kann (Schestag, 2015). Da es bei einigen Lösungen möglich ist, auf zwischengeschaltete Spülschritte zu verzichten, kann dies zur einer Vereinfachung der Bäderfolge und zur Reduktion des Wasserverbrauchs führen. So kann bei guter Abstimmung der Prozessbäder auf eine Zwischenspülung verzichtet werden, wenn beispielsweise vor der Metallisierung in cyanidischen Lösungen die Dekapierung in einer Alkalicyanidlösung stattfindet. Auch bei Verwendung eines schwefelsäurehaltigen Dekapierbades vor einer schwefelsauren Verkupferung oder Verzinnung kann auf die Zwischenspülung verzichtet werden (Schestag, 2015).

5.2.5 Beschichtungsverfahren

Chromatieren

Herkömmlicherweise gilt es als Stand der Technik, beim sechswertigen Hartverchromen den Stoffkreislauf zu schliessen, indem alle Stoffe mit dem Spülwasser zurückgeführt werden (Umweltbundesamt, 2015). Angeregt durch die Überarbeitung der REACH-Verordnung (siehe Kapitel 4.2.5) konzentrieren sich aktuelle Bestrebungen aber zunehmend darauf, Chrom(VI) als Einsatzstoff in Beschichtungsverfahren durch Alternativen zu ersetzen. Eines der befragten Unternehmen hat schon vor Ablauf der REACH-Frist seine Produktion von Chrom(VI) auf Chrom(III) umgestellt [6].

Die am häufigsten eingesetzten Alternativen zu Chrom(VI) sind laut Akteursbefragung Titan- und Zirkoniumverbindungen. Ein chromfreies Beschichtungsbad setzt sich beispielsweise aus 20-30 mg/L Zr oder Ti, 200-300 mg/L Polymeren und 400-600 mg/L Organosilanen zusammen [8]. Speziell beim dekorativen Galvanisieren ist es ausserdem Stand der Technik, Chrom(VI) durch dreiwertiges Chrom oder alternative Stoffe, wie Zinn-Kobalt, zu ersetzen (Umweltbundesamt, 2015). Eine weitere Möglichkeit bei Aluminium gänzlich auf eine Chrompassivierung zu verzichten ist der Einsatz des TSA-Verfahrens (Tartaric-Sulphuric-Anodizing). Dabei fallen im Abwasser biologisch abbaubare Tartrate und höhere bis hohe Sulfatkonzentrationen an (Muff-Levis, 2017).

Brünieren

Der Spülgang nach dem Brünieren ist wichtig, um die dickflüssige Brünierlösung vollständig vom Werkstück zu entfernen, da sie sonst eine nachträgliche Korrosion oder ein Ausblühen begünstigen könnte. Um den Wasserverbrauch zu senken, kommen eine Kaskadenspülung und eine vorgeschaltete Sparspülung in Frage. Verdampfungsverluste im Brünierbad können durch eine Rückführung des angereicherten Spülwassers aus dem Sparspülbecken ausgeglichen werden (Schestag, 2015; Muff-Levis, 2017). Mehrstufige oder effiziente Spülschritte werden in vielen der befragten Unternehmen auch entsprechend umgesetzt (siehe auch Kapitel 5.2.4).

Um Verdampfungsverluste und Energieverbrauch zu reduzieren, sind bei neueren Anlagen flexible Badabdeckungen, z.B. Klappen oder Rollabdeckungen, Stand der Technik. Auch bei bestehenden Anlagen lassen sich Abdeckungen nachrüsten und dadurch hohe Einsparungen erzielen, so gibt es z.B. Abdeckplatten, die manuell in Ruhezeiten aufgelegt werden oder hohle Kunststoffkugeln, die flächendeckend auf das Bad aufgebracht werden können (Schestag, 2015; Muff-Levis, 2017). Entgegen der gängigen Empfehlungen werden Verdampfungsverluste aus warmen Bädern in den befragten Betrieben allerdings als wenig relevant wahrgenommen [1, 4, 6]. Nur in einigen Unternehmen hat es sich etabliert, die über einen längeren Zeitraum nicht im Betrieb befindlichen Bäder manuell zuzudecken [2, 4, 5]. Der Energieverbrauch der beheizten Bäder steigt bei ansonsten gleichen Randbedingungen quadratisch mit der Badtemperatur. Durch Senkung des Temperaturniveaus der beheizten Prozess- und Reinigungsbäder kann eine weitere Energieeinsparung erzielt werden. Beispielsweise wird eine durchschnittliche Energieersparnis von 30% erbracht, wenn eine Reduktion von 80 °C auf 70 °C erfolgt. Eine alternative und energetisch interessante Verfahrensvariante ist das Kaltbrünieren. Das Kaltbrünieren wird bei Raumtemperatur durchgeführt und vorwiegend bei kleinen Bädern sowie bei zeitlich eingeschränkter Nutzung eingesetzt (Schestag, 2015). In den befragten Betrieben hat sich diese Verfahrensvariante allerdings noch nicht durchgesetzt, und ihre Sinnhaftigkeit wird ausserdem in Frage gestellt, weil die niedrigere Badtemperatur üblicherweise durch höhere Stoffkonzentrationen kompensiert werden muss [8].

Lackieren

Bei der Spritzlackierung ist ein gewisses Mass an Overspray unumgänglich. Je nach Menge des Abfalls können die Entsorgungskosten einen relevanten Kostenpunkt darstellen [4]. Massnahmen zur Reduzierung des Oversprays helfen, Lackmaterialien einzusparen und die Abfallmenge zu vermindern. Mögliche Ansätze dazu sind beispielsweise der Einsatz von elektrostatischen Sprühverfahren und der High-Volume-Low-Pressure Technik (HVLP) sowie eine entsprechende Schulung des Personals (Schestag, 2015).

Sofern es die zu lackierenden Produkte, die Qualitätsanforderungen und der Fertigungsablauf zulassen, sollten vorzugsweise abfallarme Pulverlackierungen verwendet werden (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2011). Das Lackmaterial der Pulverlackierung kann praktisch im Kreislauf gefahren werden, eine Limitierung liegt hauptsächlich darin, dass das Pulver immer kleinere Partikelgrössen annimmt und schliesslich als Staub entsorgt werden muss [2]. Häufig wechselnde Chargen und der hohe Reinigungsaufwand nach Chargen- und Farbwechsel stellen in der Praxis wichtige Herausforderungen für die Wiederverwertung dar [2, 4, 5]. Eine vorausschauende Planung und Chargierung, sodass möglichst wenige Farbwechsel anfallen, ist deshalb für eine Rückgewinnung von Pulverlacken entscheidend [2, 5]. Täglich mehrmalige Chargenwechsel und hohe Qualitätsanforderungen können Betriebe veranlassen, von einem Recycling von Pulverlacken abzusehen [6].

6 Schlussfolgerungen

Die Schweizer Gewässerschutzverordnung fordert nicht nur eine Minimierung von Abwasserströmen, sondern auch von Stoffeinträgen aus industriellen Betrieben. Die vorgeschriebene Abwasserqualität orientiert sich weitestgehend am Stand der Technik und an Grenzwerten für bestimmte Stoffgruppen. Im hier beschriebenen Projekt wurde anhand einer Literaturrecherche und einer Akteursbefragung untersucht, welche Stoffeinträge in industrielles Abwasser metallverarbeitender Betriebe relevant sind und welche Massnahmen zu deren Verringerung in Frage kommen.

6.1 Relevante Stoffeinträge und Massnahmen

Die metallverarbeitende Industrie wurde im Projekt als Beispielbranche ausgewählt, weil sie zahlenmässig in der Schweiz sehr präsent ist und dort nennenswerte Potentiale zur Verbesserung der Abwasserqualität gesehen werden. 80% der branchenzugehörigen Schweizer Firmen sind im Bereich der Oberflächenveredelung und Wärmebehandlung tätig. Die metallverarbeitende Industrie ist geprägt von Kleinstunternehmen mit weniger als 10 Vollzeitäquivalenten (VZÄ) und etwa 90% der Firmen haben weniger als 50 VZÄ, während der Anteil grosser Firmen vernachlässigbar ist. Gerade unter den kleinen und kleinsten Betrieben finden sich viele Dienstleister, die Auftragsarbeiten für wechselnde Kunden durchführen.

Die Verwendung von Frischwasser beschränkt sich in der Metallverarbeitung vor allem auf Kühl- und Reinigungszwecke sowie auf Spülbäder chemischer Behandlungstufen. Nur etwa die Hälfte der befragten Unternehmen leitet industrielles Abwasser ein, während die anderen Betriebe anfallende Konzentrate als Sonderabfall entsorgen. Inhaltsstoffe des industriellen Abwassers sind neben Metallrückständen vor allem die üblichen Einsatzstoffe in metallverarbeitenden Verfahren, wie etwa:

- Lösungsmittel
- pH-Regulatoren
- Stabilisatoren
- Komplexbildner
- Tenside
- Biozide

Sie treten bei spanenden Trennverfahren vor allem als Bestandteile von Kühlschmiermitteln auf und werden normalerweise als Sonderabfall entsorgt. Nichtsdestotrotz können sie z.B. bei Reinigungsvorgängen ins Abwasser entweichen. Abwässer aus der mechanischen Oberflächenbearbeitung können Inhaltsstoffe von Compounds enthalten, falls die Prozesswässer nicht vollständig als Abfall entsorgt werden. Relevante Stoffeinträge treten ausserdem in chemischen Vorbehandlungs- und Beschichtungsverfahren durch Verschleppung ins Spülwasser auf. Verschmutztes Spülwasser wird entweder mittels Neutralisation und Fällung aufbereitet und in die Kanalisation geleitet, oder es wird verdampft und der Rückstand als Sonderabfall entsorgt. Lackierverfahren sind nach Stand der Technik üblicherweise abwasserfrei.

Eine Möglichkeit zur Reduktion bestimmter Stoffeinträge kann die Substitution einzelner Einsatzstoffe darstellen, wie z.B. die Umstellung von Cr(VI) auf Cr(III) in der chemischen Beschichtung. Häufig kann auch der Chemikalieneinsatz durch Rückgewinnung und Wiederverwendung von Betriebsstoffen minimiert werden, wie es z.B. inzwischen bei Kühlschmiermitteln gängig ist. In bestimmten Fällen kann

auch die Umstellung der Produktionsverfahren eine Verbesserung der Abwasserbelastung bewirken, wie z.B. der vermehrte Einsatz der Pulverlackierung anstelle der Nasslackierung zeigt. Schliesslich kommt der industriellen Abwasserreinigung eine Schlüsselrolle zu, um die Abwasserqualität, z.B. von Spülwässern aus chemischen Behandlungsbädern, vor der Einleitung deutlich zu verbessern. Für die relevantesten Fertigungsverfahren wurden im Projekt typische Abwasserinhaltsstoffe, sowie umgesetzte und empfohlene Massnahmen zur Verringerung des Stoffeintrags zusammengetragen (Tabelle 9).

6.2 Ansätze, Potentiale und Limitierungen

Im Gespräch mit metallverarbeitenden Unternehmen, Technologieanbietern und Behörden wurden gewisse Treiber und Hemmnisse zur Reduzierung des Stoffeintrags in industrielles Abwasser herausgearbeitet. Als wesentliches Kriterium für die Reinigung und Entsorgung von Abwasser gelten nach wie vor die gesetzlichen Anforderungen, zu deren Einhaltung die Betriebe verpflichtet sind. Während für pH-Wert, Feststoffe, organische Summenparameter und bestimmte Schwermetalle Grenzwerte festgelegt sind, unterliegen viele andere Abwasserinhaltsstoffe keinen konkreten Limitierungen. Der komplexen Zusammensetzung von industriellem Abwasser aus einer Vielzahl organischer und anorganischer Inhaltsstoffe, die grösstenteils den Abwassereinleitern selbst nicht bekannt sind, wird damit kaum Rechnung getragen. Die Untersuchung des Vorkommens und der Relevanz von Einzelstoffen kann für dieses Problem einen möglichen Ansatz darstellen. Es muss allerdings beachtet werden, dass das eingesetzte Stoffspektrum sehr breit ist, häufig wechselt und die erforderliche Abwasseranalytik entsprechend aufwändig wäre. Als aufwändig aber vielversprechend wird eine fundierte Bewertung von Stoffen und Stoffgruppen anhand ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften und ihres ökotoxikologischen Wirkpotentials eingeschätzt.

Eine quantitative Abschätzung der Stoffeinträge in industrielles Abwasser wird erfahrungsgemäss dadurch erschwert, dass weder von Seiten der Betriebe noch durch die ARA weitergehende Analysen der Wasserströme stattfinden. Bei Probenahmen zur Beurteilung der Wasserqualität ist ausserdem zu beachten, dass industrielles Abwasser häufig chargenweise entsorgt wird und somit zu Stossbelastungen in ARA und Gewässern führen kann. Auffallend in der Akteursbefragung war ausserdem der hohe Anteil an Unternehmen, die eine abwasserfreie Produktion betreiben und stattdessen Schlämme und hochkonzentrierte Flüssigkeiten als Sonderabfall entsorgen. Mit diesen «Zero liquid discharge»-Bestrebungen verschiebt sich der Fokus vom direkt oder indirekt eingeleiteten betrieblichen Abwasser zu den Entsorgungsunternehmen und Feststoffdeponien. Bei Bemühungen zur Erfassung und zur Reduktion von Stoffeinträgen sind diese Abfallströme und Akteure dementsprechend zwingend einzubeziehen.

Die metallverarbeitende Branche in der Schweiz setzt sich vor allem aus kleinen und Kleinstunternehmen zusammen, die teilweise kaum vernetzt und entsprechend schwer erreichbar sind. Eine besondere Herausforderung besteht darin, nicht nur betriebsinterne Massnahmen umzusetzen, sondern Umweltschutzaspekte auch an Schnittstellen übergreifend weiterzuverfolgen, z.B. in Lieferketten zu wechselnden Kunden. Gerade kleinere Betriebe empfinden die Anforderungen zum Umweltschutz häufig als unklar und ihre Umsetzung als aufwändig – gleichzeitig mangelt es an Ressourcen, Personal und Know-how, um Massnahmen z.B. zur verbesserten Ressourceneffizienz zu realisieren.

Tabelle 9: Aufstellung der relevanten Abwasserinhaltsstoffe und Massnahmen zur Reduktion von Stoffeinträgen aus verschiedenen Fertigungsverfahren

Fertigungs- verfahren	Typische relevante Stoffe im Abwasser	Umgesetzte Massnahmen gemäss Unternehmensbefragung und Literaturrecherche	Empfohlene Massnahmen zur weiteren Verringerung des Stoffeintrags
Urformen	<ul style="list-style-type: none"> • Schwermetalle • Phosphor-, Schwefel-, Stickstoffverbindungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Kreislaufführung des Kühlwassers 	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederverwendung von Gussformmaterial
Spanendes Trennen	<ul style="list-style-type: none"> • Phosphor-, Schwefelverbindungen • Tenside • Biozide 	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung von wassermischbaren Kühlschmiermitteln (KSM) • Kreislaufführung der KSM • Entsorgung von KSM als Sonderabfall 	<ul style="list-style-type: none"> • Regelmässige Überprüfung der KSM bezügl. Notwendigkeit eines Wechsels • Reinigung und Rückgabe von Spänen an Metalllieferanten • Beachtung von Umweltschutzaspekten bei Reinigung von Bauteilen und Anlagen
Mechanische Oberflächenbearbeitung	<ul style="list-style-type: none"> • Tenside • Stickstoffverbindungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung von wassermischbaren Gleitschleif-Compounds • Aufbereitung und Kreislaufführung der Compounds und Entsorgung von Rückständen als Sonderabfall • Prozesswasserreinigung mittels Neutralisation, Flockung und Feststoffabtrennung 	<ul style="list-style-type: none"> • Abwasserfreiheit durch Kreislaufführung der Prozesswässer und Entsorgung von Rückständen als Sonderabfall
Chem. Vorbehandlung und Beschichtungs-bäder	<ul style="list-style-type: none"> • Schwermetalle • Chrom, Zirkonium, Titan • Chlor-, Schwefel-, Phosphor-, Stickstoffverbindungen • Cyanide • Tenside 	<ul style="list-style-type: none"> • Regelmässige Überprüfung der Badqualität bezgl. Notwendigkeit eines Wechsels • Weitestgehende Abwasserfreiheit durch Entsorgung von Bäderinhalten als Sonderabfall • Weitestgehende Kreislaufführung von Spülwässern und Entsorgung von Rückständen als Sonderabfall • Ersatz von Cr(VI)-Chromatierung durch alternative Beschichtungsverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion von Verschleppungsverlusten durch verlängerte Abtropfzeiten • Mehrstufige Spülstufen und «smarte» Spülregimes • Beachtung von Umweltschutzaspekten bei vor- und nachgelagerten Produktionsschritten in Absprache mit Kunden • Beachtung von Umweltschutzaspekten bei der Betriebsmittelwahl in Absprache mit Lieferanten
Lackieren	<ul style="list-style-type: none"> • Polymere • Lösungsmittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Weitestgehende Abwasserfreiheit beim Nass- und Pulverlackieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Rückgewinnung und Wiederverwendung von Pulverlacken • Beachtung von Umweltschutzaspekten bei vor- und nachgelagerten Produktionsschritten in Absprache mit Kunden

Die Akteursbefragung hat ausserdem gezeigt, dass die Komplexität der betriebenen technischen Anlagen und der verwendeten chemischen Zusatzstoffe in den Unternehmen selbst nicht als Problem wahrgenommen wird. Sie erschwert aber erfahrungsgemäss das Erkennen von Schwachstellen und die Umsetzung von Massnahmen, und erfordert eine entsprechend hohe Sensibilisierung der Mitarbeitenden.

Konkrete Massnahmen, die zur Ressourceneffizienz in metallverarbeitenden Betrieben beitragen können, sind die Betriebsstoffrückgewinnung und -wiederverwendung, die Umstellung von Produktionsverfahren und ein verbessertes Betriebsmanagement. In vielen Fällen wirken sich diese Massnahmen auch positiv auf die Stoffemissionen ins Abwasser aus, wie z.B. beim betriebsinternen Recycling von Wasser oder Kühlschmiermitteln (siehe Anhang B). Es kann allerdings auch zu Konflikten kommen, wenn z.B. Energiesparmassnahmen zu höherem Wasser- und Chemikalienverbrauch führen oder andersherum. Als wichtigste Treiber für die Umsetzung von Umweltschutz- und Ressourceneffizienzmassnahmen haben sich in der Akteursbefragung Einsparpotentiale, gesetzliche Anforderungen und Nachfragen durch Kunden herausgestellt. Die Einsparpotentiale im Bereich der Frischwasserkosten sowie der Entsorgungskosten für Abwasser und Abfall werden in der Branche insgesamt aber als vernachlässigbar eingeschätzt. Entscheiden Betriebe sich gegen Massnahmen, so wird dies üblicherweise mit nicht vertretbarem Mehraufwand an Geld, Zeit oder Personal begründet, sowie mit befürchteten Qualitätseinbussen in der Produktion.

Im Dialog mit Behörden, metallverarbeitenden Betrieben und Technologieanbietern hat sich gezeigt, dass die Themen Gewässerschutz und Ressourceneffizienz für alle Akteursgruppen von Bedeutung sind. Eine effiziente Umsetzung von Massnahmen bedarf einer engen Abstimmung von Akteursgruppen untereinander, wobei auch externe Impulse und Innovationen wichtig sind (Abbildung 18):

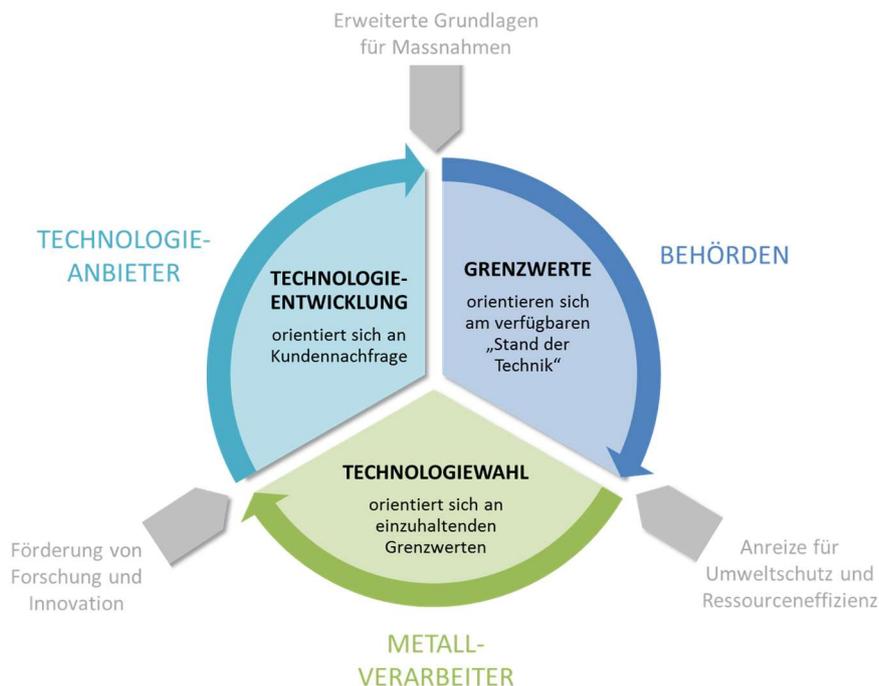


Abbildung 18: Abhängigkeiten zwischen den Akteursgruppen und Ansatzpunkte bei der Umsetzung von Gewässerschutz- und Ressourceneffizienzmassnahmen

Die metallverarbeitenden Unternehmen orientieren sich bei ihrer Auswahl von Produktions- und Reinigungsverfahren primär an den gesetzlich vorgegebenen Grenzwerten, während darüberhinausgehende Umweltschutzmassnahmen eher als vermeidbare zusätzliche Kostenbelastung empfunden werden. Mit ihrer Nachfrage bestimmen diese Betriebe massgeblich den Markt an verfügbaren Technologien und die auf Seiten der Anlagenbauer und Technologieanbieter stattfindende Entwicklung und Innovation. Die Gewässerschutzverordnung, nach der die einleitenden Betriebe sich richten, schreibt wiederum eine Abwasserreinigung nach «Stand der Technik» vor. Dadurch ist die geforderte Reinigungsleistung abhängig vom Stand der technologischen Entwicklung und den verfügbaren Produktions- und Reinigungsverfahren. Diese Abhängigkeiten zeigen einerseits die Schwierigkeiten bei der Umsetzung von Massnahmen auf, sie machen andererseits aber auch mögliche Ansatzpunkte für Verbesserungen deutlich. Essentiell erscheint in diesem Zusammenhang etwa die Schaffung von Anreizen für metallverarbeitende Betriebe, selbständig über die gesetzlichen Anforderungen hinausreichende Gewässerschutz- und Ressourceneffizienzmassnahmen umzusetzen. Es kann ausserdem sinnvoll sein, die Innovation und Entwicklung zukunftsweisender umwelt- und ressourcenschonender Technologien zu fördern, die über die jetzige Marktnachfrage hinausgehen. Ergänzend ist es wichtig, den Eintrag industrieller Stofffrachten so weit zu erfassen und zu bewerten, dass in gesetzlichen Einleitbedingungen der komplexen Zusammensetzung industrieller Abwässer Rechnung getragen werden kann, und zwar möglichst entkoppelt vom derzeitigen Stand der Technik.

7 Literatur

Abegglen C. und Siegrist H. Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. [Bericht]. - Bern : Bundesamt für Umwelt, 2012.

Allgemeine Unfallversicherungsanstalt Sicherer Umgang mit Kühlschmierstoffen (KSS) im Betrieb // Sicherheitsinformation. - 2013.

Antech-Gütling Gruppe Recyclingverfahren. - 2017.

APODIS GmbH Apodis Filtration [Online] // Apodis Filtervliese. - 08. 08 2017. - <https://www.apodis.de/de/produkte/fl%C3%BCssigkeitsfiltration/filtervliese>.

BAFU Mikroverunreinigungen: Bundesrat für weiterführende freiwillige Massnahmen . - 2017.

Baumann Mineralölvertrieb Kühlschmierstoffe [Online]. - 2009. - 4. September 2017. - www.baumann-oil.de.

Bayerisches Landesamt für Umwelt Merkblatt Nr. 4.5/2-40 // Hinweise zu Anhang 40 zur Abwasserverordnung (Metallbearbeitung, Metallverarbeitung). - 2011.

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft Merkblatt Nr. 4.5/2-41 Hinweise zu Anhang 41 zur Abwasserverordnung (Herstellung und Verarbeitung von Glas und künstlichen Mineralfasern). - München : [s.n.], 2004.

Blöcher Oberflächentechnik GmbH Dekapieren. - 2017. - <http://www.bloechergmbh.de/entfett.html#dek>.

Blume R. Abwasser aus Galvanisierbetrieben - giftig und eine lohnende Rohstoffquelle. - 2010.

Braun Christian und Gälli René Mikroverunreinigungen aus Industrie und Gewerbe [Bericht]. - Schlieren : BMG Engineering, 2014.

Bundesamt für Statistik Arbeitsstätten und Beschäftigte nach Jahr, Kanton, Wirtschaftsart (NOGA 2008), Grössenklasse und Variable // Datensatz. - 2014.

Bundesamt für Statistik Steckbrief Nomenklatur // Allgemeine Systematik der Wirtschaftszweige - NOGA. - 2016.

Bundesamt für Statistik Umweltschutzausgaben der Unternehmen 2013 // Datensatz. - 2013.

Bundesamt für Statistik Umweltschutzausgaben Schweizer Unternehmen 2003 // Datensatz. - 2003.

Bundesamt für Umwelt Schweizspezifische Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser und diffusen Einträgen [Bericht]. - Bern : [s.n.], 2015.

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft Stand der Technik im Gewässerschutz // Mittelungen zum Gewässerschutz Nr. 41. - Bern : [s.n.], 2001.

Deutsches Institut für Normung DIN 8580:2003-09 // Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. - 2003.

Dopatka Jürgen Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren - Kühlschmierstoffe [Bericht] / Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung. - Stuttgart : [s.n.], 1993.

Dückert Elisabeth [et al.] Analytische Untersuchung zur Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe [Bericht]. - Stuttgart : Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, 2015.

Emec Soner [et al.] Analyse von Potentialen der Material- und Energieeffizienz in ausgewählten Branchen der Metall verarbeitenden Industrie [Bericht]. - Berlin : VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2013.

Environmental Protection Agency BAT Guidance Note on Best Available Techniques for the Surface Treatment of Metals and Plastic Materials. - Irland : [s.n.], 2008.

Environmental Protection Agency BAT Guidance note on best available techniques for non-ferrous metals and galvanising. - Irland : [s.n.], 2008.

Environmental Protection Agency BAT Guidance Note on Best Available Techniques for Non-Ferrous Metals and Galvanising. - Irland : [s.n.], 2008.

Environmental Protection Agency BATNEEC GUIDANCE NOTE // FERROUS METAL FOUNDRIES. - Irland : [s.n.], 1996. - Bd. Draft 3.

ESP Südeloxal GmbH SÜDELOXAL Oberflächenveredelung [Online]. - 03. 08 2017. - <https://www.suedeloxal.de/vorbehandlungen/chemische-vorbehandlung.html>.

Euro Inox Mechanische Oberflächenbehandlung nichtrostender Stähle in dekorativen Anwendungen // Merkblatt 968. - 2005. - Bd. 6.

Europäische Kommission Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries. - Brüssel : [s.n.], 2014.

Europäische Kommission Best available techniques reference document for the non-ferrous metals industries. - Brüssel : [s.n.], 2014.

Europäische Kommission Integrated Pollution Prevention and Control // Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry. - Brüssel : [s.n.], 2005.

Europäische Kommission Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) // Reference Document on Best Available Techniques in the Ferrous Metals Processing Industry. - Brüssel : [s.n.], 2012.

Europäische Kommission Reference Document on Best available Techniques for the Waste Treatment Industries // BREF. - 2006.

Europäische Kommission Reference document on best available techniques in the ferrous metals processing industry // Integrated Pollution Prevention Control. - Brüssel : [s.n.], 2012.

European chemicals agency Liste der besonders besorgniserregenden Stoffe. - 2010.

Freiburghaus Matthias Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft [Artikel] // gwa. - [s.l.] : SVGW, 2009. - 12.

Gewässerschutzverordnung Gewässerschutzverordnung 814.201. - [s.l.] : Schweizer Bundesrat, 2. Februar 2016.

Hauser Herbert Vorbereitungskurs Prozesswasser- und Abwassertechnik. - Zürich : [s.n.], 2016.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie Bewertung von Stoffen/Stoffgruppen 6.25 Benzothiazole [Bericht].

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie Bewertungen von Stoffen/Stoffgruppen 6.09 Alkylphenole [Bericht].

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie Bewertungen von Stoffen/Stoffgruppen 6.12 Komplexbildner [Bericht].

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie Bewertungen von Stoffen/Stoffgruppen 6.22 Bisphenole [Bericht].

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung Praxisleitfaden: Ressourceneffizienz in der Produktion - Zerspanungsprozesse. - 2016. - Bde. Band 17 der Schriftenreihe der Technologielinie Hessen-Umwelttech.

Hillenbrand Thomas [et al.] Massnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer [Bericht]. - Dessau-Rosslau : Umweltbundesamt, 2014.

Hillenbrand Thomas, Sartorius Christian und Walz Rainer Technische Trends der industriellen Wassernutzung [Bericht]. - Karlsruhe : Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, 2008.

Holzapfel Group Oberflächenverfahren - Chromatieren. - 2017.

Impulsgruppe "Dialog Grüne Wirtschaft" GO FOR IMPACT [Bericht]. - 2016.

Jelinek T.W. Praktische Galvanotechnik: Lehr- und Handbuch. - Bad Saulgau : Leuze, 2013.

Life Technologievergleich und Ökobilanz von Abwasserreinigungsanlagen in alpinen Extremlagen [Online]. - 22. März 2002. - 1. September 2017. - <http://www.hydro-it.com/extern/life/mechanisch/fettabscheider.html>.

Londong J. und Rosenwinkel K. Industrieabwasserbehandlung. - [s.l.] : Bauhaus-Universität Weimar, 2007.

Metallbeschichtung Gerstungen GmbH Ein Journal zur Verbesserung von Abläufen und Qualität // Informationen für unsere Kunden. - 2011.

Muff-Levis Tamara Metallverarbeitung - Emissionen aus Branche der Metallverarbeitung. - Luzern : Dienststelle für Umwelt und Energie Luzern, 2017.

Prowatech AG Rückgewinnung. - 2017.

Pulvertec Nord Pulverbeschichten - Pulverbeschichtung in allen RAL Farben und Zwischentönen. - 2017.

Remmen Kirsten, Moser Catherine und Hugi Christoph Konzept Ressourcenwirtschaft / Cleaner Technology / Cleaner Production [Bericht]. - Muttenz : Fachhochschule Nordwestschweiz, 2016.

Rino Weder Pulverbeschichten. - 2016.

Rögner F. Membrantechnik in der Metallindustrie - Möglichkeiten und Grenzen [Buch]. - Potsdam : [s.n.], 2007.

Rombach Elinor Verfahrensprinzipien und Prozesstechnik der Abwasserreinigung // Heft 95 der Schriftenreihe der GDMB.

Romey Edgar und Morlock Andreas Wasserlack oder High Solid? Schritt für Schritt zum richtigen Lacksystem. - 2009.

Roth Christine Regulierung von Trichlorethylen und Chromaten. - 2017.

RunawayChoppers Giessen [Buch]. - 2010. - Bd.

<http://www.runawaychoppers.com/RunawayChoppers/Fertigung/Fertigung/Giessen> abgerufen am 12.09.2017.

Schestag Roland Betrieblicher Umweltschutz in der Metallbearbeitung. - Baden-Württemberg : Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2015.

Schlupe Mathias [et al.] Organische Mikroverunreinigungen und Nährstoffhaushalt [Bericht]. - [s.l.] : Bundesamt für Umwelt, 2006.

Schweizerischer Bundesrat Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen // 814.81. - 18. 05 2005.

ScienceIndustries Schweizerische chemische und pharmazeutische Industrie [Bericht]. - Zürich : [s.n.], 2012.

Separ Chemie GmbH Emulsionsspaltung [Online]. - 15. Dezember 2016. - www.separchemie.de/prozesse/emulsionsspaltung.

Statistisches Bundesamt Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen [Bericht]. - Wiesbaden : [s.n.], 2014.

The MAK-Collection Methyl-1H-benzotriazol [MAK Value Documentation in German language, 1988] // The MAK Collection for Occupational Health and Safety. - 2012. - S. 1-5. - DOI: 10.1002/3527600418.mb2938543kskd0014.

Umicore Galvanotechnik GmbH Aufarbeitung und Rückgewinnung von Edelmetallen. - [s.l.] : Eugen G. Leuze Verlag, 2011.

Umweltbundesamt Entscheidungshilfe für Stoffhersteller, Formulierer und Endanwender von Chemikalien // Leitfaden Nachhaltige Chemikalien. - 2010.

Umweltbundesamt Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung // Merkblatt zu den besten verfügbaren Techniken für die Oberflächenbehandlung von Metallen und Kunststoffen. - Dessau : [s.n.], 2015.

uni-protokolle.de Urformverfahren. - 2017.

Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute [Online]. - 15. Dezember 2016. - www.vsa.ch/nc/fachbereiche-cc/industrie-gewerbe/stand-der-technik.

Verein Deutscher Ingenieure Metalloberflächenbehandlung in der Feinwerktechnik - Chemische Behandlung durch Beizen // VDI-Richtlinie. - 1980. - Bd. VDI 2420.

Verzinkerei Wollerau AG Verzinkerei Wollerau AG [Online]. - 2010. - 08. 08 2017. - <https://verzinkerei-wollerau.ch/dienstleistungen>.

VKIS-VSI-IGM VKIS - VSI - IGM Stoffliste für Kühlschmierstoffe nach DIN 51385 für die Metallbearbeitung. - 2015.

VSR-Gewässerschutz Infoblatt // VSR-Gewässerschutz sieht bei der Einleitung von Benzotriazolen dringenden Handlungsbedarf. - Geldern : [s.n.].

Walther Trowal GmbH Trowal Prozesswasseraufbereitung für die Oberflächentechnik [Bericht]. - Haan : [s.n.].

Wanzl Metallwarenfabrik GmbH Eintauchen, um glänzend aufzutauchen [Online]. - 15. Dezember 2016. - www.wanzl.com/de_DE/presse-und-news/pressemitteilungen/eintauchen-um-glaenzend-aufzutauchen.

Wigol Oberflächentechnik [Buch]. - Worms : [s.n.], 2015. - Bde.
<https://www.wigol.de/de/produkte/produktkataloge/oberflaechentechnik-membranreinigung-antiscaling/oberflaechentechnik/oberflaechentechnik> abgerufen am 13.09.2017.

Wikipedia Metallpulverspritzguss [Buch]. - 2013. - Bde.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:OBE-Metallpulverspritzguss-Abb4.jpg> abgerufen am 28.08.2017.

Zentralschweizer Umweltfachstellen & Innerschweizer Maler-Verband Abwasser, Abfälle und Emissionen im Malereigewerbe. - 2015.

Zettl Elisabeth [et al.] Analyse von Ressourceneffizienzpotenzialen in KMU der chemischen Industrie [Bericht]. - München : VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2014.

8 Anhang

Anhang A: NOGA-Klassifizierung Metallerzeugung und -bearbeitung

NOGA-Code	Unterbranche
241000	Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegerungen
242000	Herstellung von Stahlrohren, Rohrform-, Rohrverschluss- und Rohrverbindungsstücken aus Stahl
243100	Herstellung von Blankstahl
243200	Herstellung von Kaltband mit einer Breite von weniger als 600 mm
243300	Herstellung von Kaltprofilen
243400	Herstellung von kaltgezogenem Draht
244100	Erzeugung und erste Bearbeitung von Edelmetallen
244200	Erzeugung und erste Bearbeitung von Aluminium
244300	Erzeugung und erste Bearbeitung von Blei, Zink und Zinn
244400	Erzeugung und erste Bearbeitung von Kupfer
244500	Erzeugung und erste Bearbeitung von sonstigen NE-Metallen
244600	Aufbereitung von Kernbrennstoffen
245100	Eisengiessereien
245200	Stahlgessereien
245300	Leichtmetallgiessereien
245400	Buntmetallgiessereien

Herstellung von Metallerzeugnissen

NOGA-Code	Unterbranche
251100	Herstellung von Metallkonstruktionen
251200	Herstellung von Ausbauelementen aus Metall
252100	Herstellung von Heizkörpern und -kesseln für Zentralheizungen
252900	Herstellung von Sammelbehältern, Tanks u. ä. Behältern aus Metall
253000	Herstellung von Dampfkesseln (ohne Zentralheizungskessel)
254000	Herstellung von Waffen und Munition
255000	Herstellung von Schmiede-, Press-, Zieh- und Stanzteilen, gewalzten Ringen und pulvermetallurgischen Erzeugnissen
256100	Oberflächenveredlung und Wärmebehandlung
256201	Mechanische Werkstätten
256202	Schlossereien
256203	Schmieden
257100	Herstellung von Schneidwaren und Bestecken aus unedlen Metallen
257200	Herstellung von Schlössern und Beschlägen aus unedlen Metallen
257300	Herstellung von Werkzeugen
259100	Herstellung von Fässern, Trommeln, Dosen, Eimern u. ä. Behältern aus Metall
259200	Herstellung von Verpackungen und Verschlüssen aus Leichtmetall
259300	Herstellung von Drahtwaren, Ketten und Federn
259400	Herstellung von Schrauben und Nieten
259900	Herstellung von sonstigen Metallwaren a. n. g.

Anhang B: Steckbriefe guter Praxisbeispiele

Firma	Bucher Leichtbau AG
Standort	Fällanden, ZH
Mitarbeiterzahl	200
Tätigkeitsbereich	Produktion von Leichtbauelementen und Einrichtungen für die Flugindustrie
NOGA-Klassifizierung	Nr.25 (Herstellung von Metallerzeugnissen)
Eingesetzte Fertigungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Spanendes Bearbeiten • Oberflächenbehandlung von Aluminiumteilen • Pulverlackierung • Wärmebehandlung zur Härtung
Abwasserrelevante Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Entfetten • Beizen • Dekapieren • Passivieren
Wasserverwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserverbrauch für Spülbäder ca. 3 m³/h • Spülung mit VE-Wasser vor Passivierung
Abwasserreinigung	<ul style="list-style-type: none"> • Neutralisation aller Abwässer vor Einleitung in die Kanalisation • Abwasserqualität wird einmal pro Jahr durch das AWEL kontrolliert • Abwasser wird zweimal jährlich extern auf Schwermetalle geprüft
Massnahmen zur verbesserten Ressourceneffizienz	<ul style="list-style-type: none"> • keine Verwendung von Chrom(VI) mehr in der Passivierung, Einsatz eines Alternativproduktes • Kreislaufführung von Kühlschmiermitteln in spanender Fertigung und des Spülwassers in der Oberflächenbehandlung • Rücknahme und Recycling der Metallspäne durch Lieferanten • Bauteilaufhängung und -chargierung in Tauchbädern wird im Rahmen eines „Mitarbeiterprojekts“ optimiert • Qualitätsmanagement/-abteilung hält den Überblick über umweltrelevante Gesetze und Verordnungen

Firma	Müller Martini Maschinen und Anlagen AG
Standort	Hasle, LU
Mitarbeiterzahl	185
Tätigkeitsbereich	Herstellung von Verschaltungen, Konstruktionen und Baugruppen aus Stahl, Edelstahl und Aluminium
NOGA-Klassifizierung	Nr.25 (Herstellung von Metallerzeugnissen)
Eingesetzte Fertigungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Blech- und Edelstahlbearbeitung • Spanendes Bearbeiten • Beschichtung und Veredelung
Abwasserrelevante Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Entfetten • Beizen • Passivieren
Wasserverwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfüllung der Spülbäder mit ca. 340 m³ Leitungswasser/Jahr • Spülung mit VE-Wasser vor Passivierung
Abwasserreinigung	<ul style="list-style-type: none"> • Neutralisation und Verdampfung der verbrauchten Spül- und Tauchbäder. Anschliessend Wiederverwendung des Destillats zur Auffüllung der Bäder • Nur Einleitung von Sanitärwasser in die Kanalisation
Massnahmen zur verbesserten Ressourceneffizienz	<ul style="list-style-type: none"> • Kreislaufführung von Kühlschmiermitteln in spanender Fertigung und des Spülwassers in der Oberflächenbehandlung • Grösstenteils Auffangen und Wiederverwendung von Pulverlacken, Chargierung der Pulverlackierung so, dass möglichst wenig Farbwechsel anfallen • Wärmerückgewinnung aus Lackieröfen zur Vorwärmung der Tauchbäder • Teilnahme am EnAW-Programm zur Reduktion von CO₂-Emissionen • Umweltmanagement und Umweltbeauftragter

Firma	Georg Fischer JRG AG
Standort	Sissach, BL
Mitarbeiterzahl	330 (am Standort)
Tätigkeitsbereich	Herstellung von Gussteilen aus Kupfer- und Aluminiumlegierungen
NOGA-Klassifizierung	Nr.24 (Metallerzeugung und -bearbeitung)
Eingesetzte Fertigungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Giessen • Spanendes Bearbeiten • Montage
Abwasserrelevante Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Spanendes Bearbeiten
Wasserverwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Jährlicher Wasserverbrauch von ca. 12'000 m³ vor allem für Sanitärzwecke, nur kleiner Teil zum Nachfüllen von Prozess-/Kühlwasser
Abwasserreinigung	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz eines Ölabscheiders für z.B. Putzwässer, Sickerwasser aus Stahlmulde, bevor Einleitung ins Kanalnetz erfolgt
Massnahmen zur verbesserten Ressourceneffizienz	<ul style="list-style-type: none"> • Kühlwasser der Giesserei wird nach Luftkühlung auf dem Dach recirkuliert. Sonstige Kühlkreisläufe unter Verwendung von Wärmetauschern. • Nutzung der Abwärme im Winter zum Betrieb von Bodenheizungen • Substitution von Trichlorethylen durch einen alternativen Betriebsstoff • Bei Zerspanung anfallende Späne werden nach Material sortiert gesammelt, zentrifugiert und mit 1% Restölgehalt abtransportiert zwecks Einschmelzen und Wiederverwendung • Abzentrifugiertes Öl wird filtriert und in den Kühlkreislauf zurückgegeben • Lösungsmittel aus Teilereinigungsanlage wird verdampft und zum Waschen recirkuliert