

eiffo eG

SynARCO
Synergetische Analyse und Verbesserung
von Ressourceneffizienz und Chemikalienmanagement
in der Oberflächentechnik

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 348489 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Uwe König, Alexander Leiden, Berthold Seßler und Ernst-Udo Sievers

August 2020

eiffo eG
Im Grörach 10/4, 72631 Aichtal

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 19b, 38106 Braunschweig

Abschlussbericht zum Entwicklungsprojekt

SynARCO
**Synergetische Analyse und Verbesserung von Ressourceneffizienz
und Chemikalienmanagement in der Oberflächentechnik**

gefördert unter dem Az. 348489 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von
Dr. Uwe König
Alexander Leiden
Berthold Seßler
Ernst-Udo Sievers

August 2020

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	Referat	Fördersumme	
Antragstitel		Synergetische Analyse und Verbesserung von Ressourceneffizienz und Chemikalienmanagement in der Oberflächentechnik (SynARCO)	
Stichworte		Ressourceneffizienz, Energie- und Stoffstromanalyse, Chemikalienmanagement, Expositionsszenarien, Risikobewertung, Emissionsüberwachung, Arbeitsschutz	
Laufzeit 18 Monate	Projektbeginn 17.12.2018	Projektende 30.06.2020	Projektphase(n) -
Zwischenberichte			
Bewilligungsempfänger		Tel 07127- 9693009	
eiffo eG www.eiffo.de		Projektleitung Ernst-Udo Sievers	
		Bearbeiter Dr. Uwe König, Berthold Seßler	
Kooperationspartner		Technische Universität Braunschweig IWF - Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik www.tu-braunschweig.de/iwf Alexander Leiden, Dr.-Ing. Tim Abraham, Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann	
<p>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</p> <p>Die Analyse von Prozessdaten einschließlich Energie- und Stoffströmen ist für heutige Unternehmen essenziell, um umweltfreundlich und kostengünstig produzieren zu können. In diesem Kontext nutzt das Vorhaben synergetisch Prozessdaten aus den Produktionsprozessen der Oberflächentechnik, um Ressourceneffizienzanalysen (Ziel: nachhaltiger Einsatz von Roh-, Hilfs-, Betriebsstoffen und Energie) mit Chemikalienmanagement (Ziel: minimale Belastung und Risiken für Umwelt und Mensch) zu verknüpfen. Hierfür wurde ein Software-Tool entwickelt, mit dem die in den Unternehmen erhobenen Daten in Bezug auf Umweltauswirkung und Mitarbeiterbelastungen in einem digitalen Zwilling vorab simuliert und bei unterschiedlichen Arbeitsszenarien dargestellt werden können.</p> <p>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</p> <p>Die Entwicklungsarbeiten wurden in sechs Arbeitsschritten durchgeführt. Nach einer detaillierten <i>Definition der Anforderungen</i> an die zu entwickelnden Lösungen aus betrieblicher und gesetzlicher Perspektive wurde. Darauf aufbauend wurde eine <i>Gesamtmethodik</i> entwickelt, welche die Themenkomplexe Ressourceneffizienzanalyse und Chemikalienmanagement verknüpft, und darauf aufbauend ein für den Einsatz bei KMU geeignetes, <i>modulares Softwaretool</i> für die ganzheitliche Datenhaltung, Modellbildung, Simulation und Bewertung. Parallel wurden bei assoziierten Anwendungspartnern <i>Betriebsdaten erhoben</i> (u.a. Produktionsdaten, Prozessdaten, Stoffstromdaten, Arbeitsszenarien). Diese flossen in die Entwicklung des Tools sowie in die zugrundeliegenden empirischen Emissions-/Expositionsmodelle ein. Damit wurden <i>spezifische Detailmodelle der Prozessketten</i> der assoziierten Unternehmen erstellt und zur <i>Bewertung von realen und alternativen Produktionsszenarien</i> genutzt; daraus wurden Handlungsalternativen abgeleitet. Abschließend wurden die Erkenntnisse verallgemeinert und die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle untersucht.</p>			
<small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0 □ Fax 0541/9633-190 □ http://www.dbu.de</small>			

Ergebnisse und Diskussion

Während für die Analyse und Verbesserung der Ressourceneffizienz bereits etablierte Verfahren verfügbar sind (z. B. Energie- und Stoffstrommanagement, Ökobilanzierung, Materialfluss-kosten-rechnung), sind derzeit gängige Verfahren für betriebliche Anwendungen zum Chemikalien-management und zur Risikobewertung noch nicht ausreichend; insbesondere war eine dynamische Analyse des Chemikalieneinsatzes im Unternehmen und damit einhergehender Risiken bisher nicht möglich.

Die im Vorhaben entwickelte Lösung baut auf einer detaillierten Material- und Energieflusssimulation auf, welche die Fertigungsprozesse dynamisch abbildet und Konsequenzen unterschiedlicher Handlungs-optionen prognostiziert. Der Ansatz ermöglicht insbesondere eine hohe Transparenz hinsichtlich Energie- und Stoffflüssen in den Produktionsprozessen und daraus abgeleitet die individuelle Bewertung und Prognose der Chemikalienbelastung von Mitarbeitern und Umwelt sowie die synergetische Verbesserung der Ressourceneffizienz und des Chemikalieneinsatzes.

Das entwickelte Software-Tool wurde in Zusammenarbeit mit mehreren kleinen und mittleren Betrieben der Oberflächentechnik validiert. Danach eignet sich das Software-Tool sehr gut, um z. B. alternative Handlungs-optionen zum gezielteren und reduzierten Einsatz von Chemikalien im virtuellen Modell zu erproben und zu bewerten, bevor diese in der Praxis umgesetzt werden. Für Produktionsmitarbeiter sinkt in der Folge die Chemikalienexposition am Arbeitsplatz und somit das Risiko von gesundheitlichen Folgeschäden. Für die Unternehmen ergeben sich insgesamt verringerte Emissionen und Umweltwirkungen sowie eine auch im internationalen Vergleich gesteigerte Wettbewerbsfähigkeit.

Perspektivisch kann der bestehende Ansatz über die simulative Bewertung basierend auf historischen Expositionsdaten deutlich hinausgehen. Dazu soll zukünftig auch die Möglichkeit der Nutzung von Live-Daten aus der Produktion sowie eine Anbindung an weitere bestehende Systeme (ERP und/oder MES) untersucht werden. Durch die Kopplung der Systeme können noch exaktere Expositionsbewertungen in Echtzeit ermöglicht werden. Hierfür ist eine Anbindung an Sensornetzwerke erforderlich, welche die entwickelten Modelle bei der Bewertung ergänzen. Perspektivisch lässt sich daraus eine Rückkopplung in die Produktion implementieren, d. h. die Regelung von Anlagen, Anlagenperipherie und TGA kann auf Basis der aktuell gemessenen Chemikalienbelastung kontinuierlich angepasst werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse des Projektes werden sowohl in der nationalen als auch der internationalen Fachwelt verbreitet. Von wissenschaftlicher Seite aus wurden Inhalte des Projektes bei der Deutsch / Englischen Fachtagung „Simulation in Produktion und Logistik“ vorgestellt. Die Veröffentlichung ist als Open Access Veröffentlichung unter dem Titel „*Agent-Based Simulation for Multi-Criterial Planning and Control of Automated Electroplating Lines*“ verfügbar. Ein weiterer Beitrag wurde bei dem Open Access Journal Simulation News Europe eingereicht mit dem Titel „*Agent Based Simulation Approach for Occupational Safety and Health Planning a Case of Electroplating Facilities*“; weitere Publikationen sind in Vorbereitung. Das Projekt wurde außerdem bei den „Oberflächentagen“ des Zentralverbands Oberflächentechnik (ZVO) im September 2019 in Berlin in der zentralen, ersten fachlichen Keynote von Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann vorgestellt; weitere gezielte Präsentationen für industrielle Anwender sind in Vorbereitung.

Fazit

Im Projekt ist es gelungen, die Analyse der Energie- und Ressourceneffizienz sowie des Risikomanagements in einer Gesamtmethodik mit einem integrierten Simulationstool zu verbinden. Dies schafft Synergien hinsichtlich Datenerfassung, Modellbildung und Bewertung, da für beide Arten von Analysen umfassende produktionsbezogene Daten sowie die Abstraktion des Realsystems in ein digitales Modell erforderlich sind. Die Methodik wurde am Beispiel der Analyse des Einsatzes besonders kritischer Chemikalien (hier Chromtrioxid) entwickelt; der Ansatz ist jedoch generischer Natur, die Übertragbarkeit auf andere Energie- und Stoffströme in der Produktion, auch in anderen Branchen, ist möglich. Ein wesentlicher Vorteil besteht im angemessenen Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Durchführung der Analysen. Auch kleine Unternehmen können damit negative Auswirkungen in Bezug auf die Zielsysteme Mitarbeiter und Umwelt selbständig und mit darstellbarem Aufwand ermitteln und reduzieren.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	1
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen.....	5
1. Zusammenfassung.....	6
2. Ausgangslage und Motivation.....	7
3. Zielsetzung und Aufgabenstellung.....	11
4. Durchgeführte Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse.....	13
4.1 Durchführung des Vorhabens.....	13
AP 1: Spezifizierung und Strukturierung von Anforderungen.....	13
AP 2: Methoden- und Softwareentwicklung für eine Kombination von Ressourceneffizienzanalyse und Chemikalienmanagement.....	20
AP 3: Datenerhebung bei assoziierten Anwendungspartnern.....	26
AP4: Modellierung einer spezifischen Prozesskette.....	35
AP5: Bewertung von realen und alternativen Produktionsszenarien.....	37
AP6: Ergebnistransfer.....	43
4.2 Diskussion der Ergebnisse und der Zielerreichung.....	43
4.3 Bewertung der Vorhabensergebnisse.....	44
4.4 Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....	48
5. Fazit.....	49
6. Literaturverzeichnis.....	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzeption für die Kombination von Ressourceneffizienzanalyse und Chemikalienmanagement in Galvanikbetrieben.....	11
Abbildung 2: Schematische Verbindung der technischen Parameter mit den Risikowerten	15
Abbildung 3: Bedingungen zur Analyse und Bewertung der Auswirkungen von technischen Maßnahmen	16
Abbildung 4: Identifikation von gemeinsamen Parametern und Datenquellen für Ressourceneffizienzanalyse und Chemikalienmanagement	18
Abbildung 5: Detaillierte Übersicht zu Optimierungszielen, entsprechenden Parametern und jeweiligen Datenquellen für integrierte Ressourceneffizienzanalyse und Chemikalienmanagement..	19
Abbildung 6: Verortung der zu entwickelnden Softwareumgebung	20
Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung der entwickelten Gesamtmethodik	20
Abbildung 8: Ausschnitt aus Datenerfassungsmodul für das Produkt mit dem Produktionsprogramm	21
Abbildung 9: Einzelmodelle aus der Simulation	22
Abbildung 10: Parameterabhängige Fallunterscheidung zur Surrogatmodellauswahl	23
Abbildung 11: Lineare Surrogatmodelle in Abhängigkeit von Beckengröße und Fluidbewegung	24
Abbildung 12: Überblick über Visualisierung eine Galvaniklinie [Lei19]	24
Abbildung 13: 3D Visualisierung einzelner Arbeitsplätze mit Anzeige der Mitarbeiterbelastung.....	25
Abbildung 14: Shopfloor Heatmap für Mitarbeiterwege und –verteilung im Produktionsbereich.....	25
Abbildung 15: Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040	25
Abbildung 16: Entwicklung der betrieblichen Expositionen.....	26
Abbildung 17: Typisches Ergebnis einer ART Modellierung.....	28
Abbildung 18:: Exposition in Abhängigkeit der Konzentration: Simuliert nach ART und technische Daten	30
Abbildung 19: Ressourcenflüsse bei der Hartverchromung.....	32
Abbildung 20: betriebliche Messung, Betrieb 1 - Abhängigkeit Exposition von Stromstärke.....	33
Abbildung 21: Betriebliche Messung, Betriebe 1 und 2 – Abhängigkeit der Exposition von der Leistung der Prozessbad-Absaugung	34
Abbildung 22: Elemente einer Galvaniklinie.....	35
Abbildung 23: Beckenanordnung der generischen Prozesskette für die kombinierte Nickel/Chromgalvanik.....	35
Abbildung 24: Ergebnisvisualisierung in der entwickelten Applikation.....	38
Abbildung 25: Entwicklung der modellierten Cr(VI) Konzentration im Elektrolyten und der Mitarbeiterbelastung bei verschiedenen Bauteilen und Fluidgeschwindigkeiten	39
Abbildung 26: Spüleffekt modelliert mit ART: Exposition in Abhängigkeit von der kontaminierten Oberfläche	41
Abbildung 27: Spüleffekt modelliert mit ART: Exposition in Abhängigkeit vom Spüleffekt.	41
Abbildung 28: Entwickelte Gesamtmethodik zur synergetischen Analyse und Verbesserung von Ressourceneffizienz und Chemikalienmanagement in der Oberflächentechnik.....	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitsszenarien einer galvanischen Anlage am Beispiel Verchromung	27
Tabelle 2: Einflussnehmende technische Parameter	29
Tabelle 3: Technische Parameter Verchromung	30
Tabelle 4: Generisches Produktionsprogramm mit Beckenkonfiguration	36
Tabelle 5: Produkte für Produktionsszenarien	37
Tabelle 6: Einstellungen im ART Tool	41
Tabelle 7: Ökonomische Bewertung aus Sicht der Anwendung	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

ART	Advanced REACH Tool
BREF	Best Available Techniques Reference
ECHA	European Chemicals Agency
KMU	Kleine oder mittlere Unternehmen
LCA	Life Cycle Assessment / Ökobilanzierung
LCC	Life Cycle Costing / Lebenszykluskostenrechnung
MFS	Materialflusssimulation
MEFA	Material- und Energieflussanalysen
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
VFW	Verfahrwagen
WT	Warenträger

1. Zusammenfassung

Die Analyse von Prozessdaten inkl. Energie- und Stoffströmen ist für heutige Unternehmen essenziell, um umweltfreundlich und kostengünstig produzieren zu können. In diesem Kontext wurde in dem durchgeführten Vorhaben eine Methodik und ein Software-Tool entwickelt, in dem Ressourceneffizienzanalysen (mit dem Ziel eines nachhaltigen Einsatzes von Roh-, Hilfs-, Betriebsstoffen und Energie) sowie Chemikalienmanagement (mit dem Ziel einer minimalen Belastung und Risiken für Umwelt und Mensch) für Unternehmen der Oberflächentechnik in einem integrierten Ansatz gemeinsam durchgeführt werden können. Wichtig ist dabei insbesondere auch eine synergetische Nutzung von Prozessdaten, deren gesonderte Erfassung und Auswertung in den vorwiegend kleinen und mittleren Betrieben mit erheblichem Aufwand verbunden ist.

Während für die Analyse und Verbesserung der Ressourceneffizienz bereits etablierte Verfahren verfügbar sind (z. B. Energie- und Stoffstrommanagement, Ökobilanzierung, Materialflusskostenrechnung), sind derzeit gängige Verfahren für betriebliche Anwendungen zum Chemikalienmanagement und zur Risikobewertung noch nicht ausreichend; insbesondere war eine dynamische Analyse des Chemikalieneinsatzes im Unternehmen und damit einhergehender Risiken bisher nicht möglich.

Die im Vorhaben entwickelte Lösung baut auf einer detaillierten Material- und Energieflusssimulation auf, welche die Fertigungsprozesse dynamisch abbildet und Konsequenzen unterschiedlicher Handlungsoptionen prognostiziert. Der Ansatz ermöglicht insbesondere eine hohe Transparenz hinsichtlich Energie- und Stoffflüssen in den Produktionsprozessen und daraus abgeleitet die individuelle Bewertung und Prognose der Chemikalienbelastung von Mitarbeitern und Umwelt sowie die synergetische Verbesserung der Ressourceneffizienz und des Chemikalieneinsatzes. Zum Aufbau und zur Validierung der zugrundeliegenden Modelle und des Tools wurden Daten bei assoziierten Industriepartnern erhoben. Entwicklung und Erprobung des Tools erfolgten ebenfalls in enger Kooperation mit den Unternehmen als potenzielle Anwender.

Mit dem Software-Tool können auch alternative Handlungsoptionen zum gezielteren und reduzierten Einsatz von Chemikalien vorab im virtuellen Modell erprobt und bewertet werden, bevor diese in der Praxis umgesetzt werden. Für Produktionsmitarbeiter sinkt in der Folge die Chemikalienexposition am Arbeitsplatz und somit das Risiko von gesundheitlichen Folgeschäden. Für die Unternehmen ergeben sich insgesamt verringerte Emissionen und Umweltwirkungen sowie eine auch im internationalen Vergleich gesteigerte Wettbewerbsfähigkeit.

Perspektivisch kann der bestehende Ansatz über die simulative Bewertung basierend auf historischen Expositionsdaten deutlich hinausgehen. Dazu soll zukünftig auch die Möglichkeit der Nutzung von Live-Daten aus der Produktion sowie eine Anbindung an weitere bestehende Systeme (ERP und/oder MES) untersucht werden. Durch die Kopplung der Systeme können noch exaktere Expositionsbewertungen in Echtzeit ermöglicht werden. Hierfür ist eine Anbindung an Sensornetzwerke erforderlich, welche die entwickelten Modelle bei der Bewertung ergänzen. Perspektivisch lässt sich daraus eine Rückkopplung in die Produktion implementieren, d. h. die Regelung von Anlagen, Anlagenperipherie und TGA kann auf Basis der aktuell gemessenen Chemikalienbelastung kontinuierlich angepasst werden. Der Einsatz kritischer Chemikalien lässt sich damit weiter reduzieren.

Das Vorhaben wurde durchgeführt von den Kooperationspartnern:

eiffo eG – Ingenieurunternehmen der industriellen Oberflächentechnik mit Sitz in Aichtal, Baden-Württemberg, www.eiffo.de

Technische Universität Braunschweig – Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), www.tu-braunschweig.de/iwf

Ermöglicht wurde das Vorhaben durch eine Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Aktenzeichen (Az:) 34848.

2. Ausgangslage und Motivation

Für eine umweltfreundliche und kostengünstige Produktion ist die laufende Erfassung und Analyse von Prozessdaten notwendig, um daraus die Energie- und Stoffströme der Prozesse abbilden, überwachen und mit Hilfe von Simulationen vorausschauend optimieren zu können. Die zunehmende Digitalisierung der Industrie wird in diesem Zusammenhang als eine wichtige Triebkraft für ein höheres Maß an Ressourceneffizienz gesehen. Sie bietet Möglichkeiten für eine gezieltere Steuerung und effizientere Ausgestaltung des Ressourceneinsatzes in Unternehmen und entlang ganzer Wertschöpfungsketten [I]. Für viele Unternehmen, insbesondere KMU wie sie im Bereich der Oberflächentechnik überwiegend zu finden sind, stellt die effiziente Erfassung und Verarbeitung größerer Datenmengen jedoch eine große Herausforderung dar. Einerseits werden aufwendige Messsysteme benötigt, um relevante Daten zu erfassen. Andererseits werden menschliche Ressourcen für die Datenauswertung und -interpretation benötigt. Die Aufwände für Datenerfassung und -analyse übersteigen dabei ggf. sogar die positiven Effekte der daraus abgeleiteten Handlungen. Aus diesem Grund ist es erstrebenswert, maximalen Nutzen aus erhobenen Daten zu ziehen.

Vor diesem Hintergrund wurden im vorliegenden Projekt zwei für KMU essenzielle Themenkomplexe mit dem Ziel verknüpft, die Prozessdaten synergetisch für eine Optimierung der Produktionsprozesse hinsichtlich beider Themenkomplexe zu ermöglichen:

1. **Analyse und Optimierung der Ressourceneffizienz** mit dem Ziel eines ökologisch und wirtschaftlich nachhaltigen Einsatzes von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie Energie in der Produktion;
2. **Chemikalienmanagement** mit dem Ziel, die Risiken für Mensch und Umwelt resultierend aus dem Chemikalieneinsatz in der Produktion zu minimieren.

Dabei stellt gerade die Möglichkeit, Funktionen wie die Risikominimierung des Chemikalieneinsatzes, die aufgrund gesetzlicher Vorgaben erforderlich sind, mit Funktionen zur Rohstoff- und Energieeinsparung verknüpfen zu können, die bisher freiwillig bzw. zur Kostenminderung durchgeführt werden, für KMU einen hohen Nutzen und Anreiz dar, entsprechende Maßnahmen tatsächlich anzuwenden und umzusetzen. Im Projekt wurden dazu Methoden und digitale Tools entwickelt, die insbesondere für den Einsatz in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) in der Oberflächentechnik geeignet sind.

Ressourceneffizienz und Chemikalienmanagement sind aufgrund der hohen Energieintensität und des Einsatzes kritischer Chemikalien in den Prozessen der Oberflächentechnik für diese Unternehmen von besonderer Bedeutung. So beträgt der Anteil der Energiekosten in der Oberflächentechnik zwischen 8 % und bis zu 15% der Gesamtkosten der Unternehmen [II]. Dies ist im Vergleich zum Mittelwert der verarbeitenden Industrie von 2-4% Energiekostenanteil ein sehr hoher Wert, vergleichbar mit der Energieintensität in der Metallerzeugung.

Gleichzeitig ist der Stoff- und Chemikalieneinsatz sehr hoch: nach Angaben des Zentralverbandes Oberflächentechnik (ZVO) finden in den Produktionsprozessen bis zu 400 verschiedene Einsatzstoffe (Stoffe und Formulierungen) Verwendung [III]. Der Einsatz kritischer Chemikalien soll dabei aus Sicht der Umwelt und des Arbeitsschutzes zukünftig deutlich reduziert werden; die Europäische Chemikalienverordnung führt hier zu laufend steigenden Aufwendungen und Zulassungsaufgaben. Zudem sind Chemikalienverbräuche auch ein wesentlicher Kostenfaktor für die meisten Unternehmen.

Als wirtschaftlich wichtiges Beispiel sei hier auf die Verwendung von Nickelsalzen verwiesen. Der Anteil der Nutzung zur Beschichtung (galvanisch und chemisch Nickel) beträgt über die Jahre kontinuierlich rund 5 - 6% des Gesamtnickelverbrauchs in Deutschland bei einem Jahresverbrauch von ca. 7.000 – 8.000 Tonnen pro Jahr [IV]. Dieses Beispiel ist auch insofern von Bedeutung, da die produktbezogene Recyclingrate von Nickel auf über 80 Prozent geschätzt wird, sodass 25% der Nickel-Nachfrage durch Recycling gedeckt werden können. Damit hat Recycling bereits einen hohen Stellenwert in der Oberflächentechnik, was durch die genauere Kenntnis der Ressourcenverwendung und entsprechendes Che-

mikalienmanagement noch weiter verbessert werden kann. Die Integration von Ressourceneffizienzanalyse (Energie- und Stoffeinsatz) und Chemikalienmanagement wie im vorliegenden Projekt konzipiert birgt somit auch in dieser Hinsicht sehr hohes Nutzenpotenzial für die Unternehmen.

Eine solche integrierte Datenerfassung, Analyse und darauf aufbauende Optimierung der Ressourceneffizienz verknüpft mit einer Risikoüberwachung des Chemikalieneinsatzes ist nach dem Stand der Technik nicht verfügbar.

Etabliert sind insbesondere vielfältige Methoden und Tools für die Durchführung von **Ressourceneffizienzanalysen** und ökonomisch-ökologische Bewertungen; diese umfassen zum Beispiel Materialflusssimulation (MFS), Material- und Energieflussanalysen (MEFA), Materialflusskostenrechnung (MFCA), Ökobilanzierung / Life Cycle Assessment (LCA) oder Lebenszykluskostenrechnung / Life Cycle Costing (LCC). Je nach Analyseziel bietet sich die Anwendung einer einzelnen oder die Kombination mehrerer dieser Methoden an.[V] Für eine ganzheitliche Betrachtung der Ressourceneffizienz kommt insbesondere lebenswegübergreifenden Verfahren wie LCA eine besondere Bedeutung zu. Die Methodik ist international anerkannt und genormt (DIN EN ISO 14040) [VI] und betrachtet Umweltaspekte und potentielle Umweltwirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung – also von der „Wiege bis zur Bahre“ (*cradle to grave*). Die LCA-Methode basiert allerdings grundsätzlich auf statischen Daten, d. h. zeitabhängige Wechselwirkungen in Produktionsumgebungen (z. B. dynamische Verbrauchsprofile von Maschinen und Anlagen oder produktindividueller Materialfluss in flexiblen Produktionssystemen) werden von ihr nicht berücksichtigt. Falls diese Aspekte im Sinne der Zielstellung betrachtet werden sollen, bieten sich Simulationsansätze wie MEFA an, welche Dynamiken im Produktionssystem erfassen und bewertbar machen. Sie ermöglichen insbesondere die Verbesserung operativer Kennzahlen (z. B. Durchlaufzeiten und Anlagenauslastungen) und sind deshalb zur Erreichung einer kostenoptimierten Produktion fast unerlässlich.

Grundsätzlich erfordert die Anwendung der genannten Methoden geeignete Expertentools und entsprechend umfangreiches Methoden- und Softwarewissen. **Die damit einhergehende Komplexität sowie der resultierende Aufwand stellen für kleine Unternehmen eine signifikante Herausforderung dar.** Insbesondere für diese Unternehmen sind deshalb effiziente, kostengünstig anzuwendende Tools für die Ressourceneffizienzanalyse erforderlich; hierfür sind aktuell ebenfalls noch keine Lösungen etabliert.

Die gleiche Anforderung gilt auf der anderen Seite für Methoden und Tools des **Chemikalienmanagements**; hierfür sind jedoch bisher **keine dem Ressourcenmanagement vergleichbare Methoden und Tools verfügbar.**

Die Anforderungen an ein Chemikalien- und Risikomanagement-Tool werden hier insbesondere durch die EU-Chemikalienverordnung REACH bestimmt, die den Chemikalieneinsatz in produzierenden Unternehmen regelt. Diese fordert eine sichere Verwendung von Chemikalien in der Produktion. Dies beinhaltet u. a. die Analyse von Arbeitsszenarien, um die Exposition und somit das Risiko für die Mitarbeiter zu ermitteln.[VII] Schwerpunkt der Bewertungen sind die Auswirkungen von Chemikalien auf Mensch und Umwelt, z. B. hinsichtlich Mutagenität / Genotoxizität, pränataler Entwicklungstoxizität, Reproduktionstoxizität, Karzinogenität und Bioakkumulation. Wenn Mitarbeiter in der Produktion mit gesundheitsgefährdenden Stoffen in Kontakt kommen, nehmen sie diese über verschiedene Wege auf. Die sogenannte Inkorporation erfolgt dabei insbesondere inhalativ (d. h. durch die Atmung) oder dermal (d. h. durch Hautkontakt). Der Einfluss der Stoffe hängt primär von der Exposition der Mitarbeiter ab, die durch den Anlagenbetrieb beeinflusst werden kann.

In der Oberflächentechnik, die aufgrund ihrer mittelständischen Prägung und der Art der Prozesse noch einen hohen Anteil manueller Arbeitsschritte mit hohem Personaleinsatz erfordert, kommt dem sicheren Chemikalienmanagement daher besondere Bedeutung zu. Aufgrund einer immer strikteren Reglementierung des Chemikalieneinsatzes, um die Schäden für Mensch und Umwelt durch Freisetzung chemi-

scher Stoffe möglichst gering zu halten, müssen Unternehmen der Oberflächentechnik dabei einen stetig wachsenden Aufwand betreiben. Stand der Technik sind dabei Maßnahmen entsprechend der technischen Beschreibungen der DGUV [VIII] bzw. der Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 561, aus denen sich bei chemischen Gefährdungen wie in der Oberflächentechnik z. B. folgende technische und organisatorische Maßnahmen ableiten lassen:

- Geschlossene Anlagen bei Einsatz von Gefahrstoffen (z.B. Chromtrioxid bei Verchromungsanlagen) mit einer mechanischen Abdeckung und Absaugung
- Technische Funktionsüberwachung der Absauganlage mit Rückkopplung zum Prozess
- Überwachung technischer Lüftung durch Vorrichtungen nach TRGS 722 2.3.1 (3)
- Regelmäßige Kontrolle und Funktionsprüfung der Absauganlagen

Im Rahmen des ART (Advanced REACH Tool) Projektes wurde ein Bewertungswerkzeug zur Risikoanalyse entwickelt [IX], [X] und in die Richtlinien der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) integriert [XI][XIII]. Gleichzeitig werden in den deutschen Technischen Regelwerken Zusammenhänge zwischen operativen Daten aus dem Anlagenbetrieb (z. B. Chemikalienkonzentration, Prozesstemperatur, Prozessdauer, Absaugleistung) und Risikobewertungen entwickelt und eingesetzt [XII]. Werkzeuge für die Bewertung von Umwelteinflüssen werden ebenfalls entwickelt, mit den operativen Daten verbunden und in die Bewertung integriert (z. B. European Union System for the Evaluation of Substances – EUSES [XIII]).

Insgesamt besteht jedoch Einigkeit, dass die derzeit genutzten Verfahren für betriebliche Anwendungen zum Chemikalienmanagement und zur Risikobewertung noch nicht ausreichend sind [XIV]. Laut Bundesinstitut für Risikobewertung liegen die Ursachen für die unzureichende Umsetzung in Betrieben vor allem in der mangelnden Verfügbarkeit und Genauigkeit von Messdaten. Verlässliche Messungen der Chemikalienfreisetzung liegen aufgrund des Messaufwands (wenn überhaupt) nur für längere Zeiträume vor, sodass kurzfristige Aussagen, z. B. in dynamischer Abhängigkeit vom Produktionsprogramm, nicht möglich sind. Rückschlüsse auf die Belastung einzelner Mitarbeiter oder Arbeitsplätze sind kaum möglich. Die (dynamische) Wirkung von Verbesserungsmaßnahmen kann entsprechend bisher nur sehr eingeschränkt bewertet werden. Bestehende Tools ermöglichen zudem keine automatisierte Ermittlung von Risikodaten aus gemessenen Prozessdaten und sind in der Nutzung relativ aufwendig und somit kostenintensiv. Insbesondere für KMU ist ein dynamisches Monitoring – die Verfügbarkeit entsprechender Sensorik vorausgesetzt – aufgrund der damit verbundenen Kosten derzeit nicht realisierbar.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Methoden und Tools sowohl für Analysen der Ressourceneffizienz als auch für das Chemikalienmanagement grundsätzlich zur Verfügung stehen. Deren Anwendung stellt KMU jedoch einerseits vor große Herausforderungen hinsichtlich zu bewältigender Komplexität und Ressourceneinsatz. Andererseits sind wünschenswerte Funktionen zur dynamischen und individuellen Bewertung der Wirkung eingesetzter Chemikalien nicht ausreichend integriert. **Inbesondere ist eine Verknüpfung der Funktionen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz einerseits und des sicheren Chemikalienmanagements andererseits, die sich aufgrund der gemeinsamen Datenbasis und Stoffflussmodelle anbietet und für die Unternehmen einen entsprechend hohen Nutzen bieten kann, bisher nicht realisiert.**

Hier setzte das vorliegende Projekt SynARCO an mit dem Ziel, ein Software-Tool zu entwickeln, mit dem beide Funktionen in einfacher Weise erfüllt werden können. Etwas plakativ formuliert galt es, ein Werkzeug zu schaffen, mit dem KMU einerseits die gesetzlichen Anforderungen beim Einsatz gefährlicher Chemikalien sicher erfüllen bzw. den Stand der Technik an dieser Stelle sogar deutlich übertreffen können und dabei gleichzeitig durch eine Verbesserung ihrer Ressourceneffizienz Kosten reduzieren können.

Bei der Entwicklung des SynARCO-Tools setzten die Partner auf eigenen Vorentwicklungen auf, insbesondere arbeiteten beide Partner gemeinsam bereits in einem EU-geförderten Projekt MEMAN (2015 – 2018) an der ressourceneffizienten Gestaltung von betrieblichen und unternehmensübergreifenden Prozessketten im metallverarbeitenden Gewerbe. Im Rahmen des Projektes wurde unter Führung des IWF eine Analysetoolbox entwickelt, die detaillierte Material- und Energieflussmodelle der gesamten Wertschöpfungskette beinhaltet und dem Nutzer Funktionen zur Entscheidungsunterstützung bereitstellt. Die eiffo eG hat dabei Möglichkeiten zur praktischen Umsetzung evaluiert und weiterentwickelt. Das Softwaretool kombiniert etablierte Methoden wie Materialflusssimulation, Wertstromanalyse, Life Cycle Assessment (LCA) und Life Cycle Costing (LCC). In einem gemeinsamen weiteren, ZIM-geförderten Projekt [XV] wurde eine Softwareumgebung zur Simulation der multiplen (dynamischen) Abhängigkeiten von Parametern in Beschichtungsprozessen entwickelt, sodass diese als Prozesssteuergrößen verwendet werden können.

Die in MEMAN erarbeitete Methodik sowie die Analysetoolbox bildete die Basis, auf der durch Verknüpfung mit neuen Simulationsmodellen zum Chemikalienmanagement ein marktfähiges Produkt mit hohem Anwendernutzen entwickelt werden konnte. Dabei konnte auch auf die in dem vorgenannten ZIM-Projekt entwickelte Simulationsumgebung für Stoffströme in Oberflächenbeschichtungsprozessen zurückgegriffen werden.

3. Zielsetzung und Aufgabenstellung

Wie eingangs bereits kurz skizziert, war das Ziel des Projekts die Entwicklung einer neuartigen und innovativen Kombination von Ressourceneffizienzanalysen und Chemikalienmanagement im Bereich der Oberflächentechnik. Abbildung 1 zeigt die Konzeption für das Software-Tool, in der auch die wesentlichen Komponenten und Module erkennbar sind.

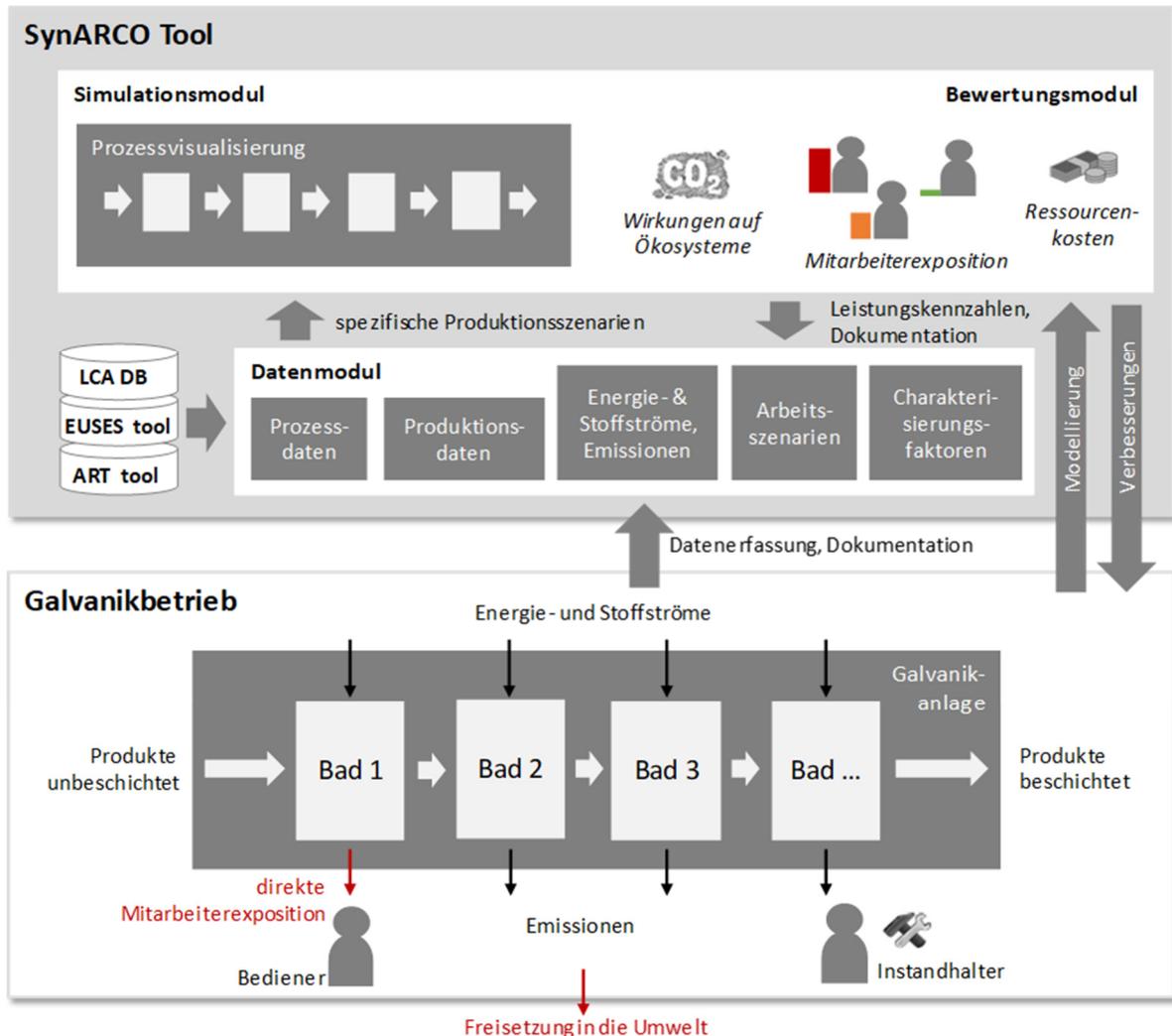


Abbildung 1: Konzeption für die Kombination von Ressourceneffizienzanalyse und Chemikalienmanagement in Galvanikbetrieben

Die Lösung geht dabei von einer detaillierten Material- und Energieflusssimulation aus, welche die Fertigungsprozesse eines galvanotechnischen Betriebes dynamisch abbildet. Darauf aufbauend lassen sich sowohl fundierte Analysen hinsichtlich des Ressourceneinsatzes als auch Analysen hinsichtlich spezifischer Chemikalienexposition von Mitarbeitern sowie weitergehende ökologische und ökonomische Analysen durchführen. Der Lösungsansatz zielte dabei insbesondere auf:

- Schaffung von Transparenz hinsichtlich Energie- und Stoffflüssen in oberflächentechnischen Prozessketten durch Nutzung von Modellierungs- und Simulationstechniken, mit besonderem Fokus auf dem Einsatz kritischer Chemikalien. Eine Visualisierung der Produktionsprozesse und Material-/Energieflüsse sollte das Verständnis für (nicht sichtbare) Umweltwirkungen und Mitarbeiterbelastungen erhöhen und somit die Motivation steigern, entsprechende Verbesserungsmaßnahmen zu ergreifen.

- Individuelle Bewertung der Chemikalienexposition von Mitarbeitern in Abhängigkeit spezifischer Arbeitsszenarien und Prozessparameter in der galvanischen Prozesskette.
- Synergetische Verbesserung der Ressourceneffizienz und Reduktion der Chemikalienexposition von Mitarbeitern, daraus resultierend besserer Arbeitsschutz, geringere Emissionen und Umweltwirkungen, Kostenreduktion und gesteigerte Wettbewerbsfähigkeit.

Im Ergebnis zielte das Projekt auf die Entwicklung eines Software-Tools zur Kombination von Ressourceneffizienzanalyse und Chemikalienmanagement, das aufgrund seines Nutzens und seiner Anwenderfreundlichkeit insbesondere die Bedürfnisse von KMU adressiert. Dahinter stand u.a. die Erfahrung, dass Ressourceneffizienzsteigerung allein – trotz signifikanten Einsparpotenzials auch bei den Kosten – für die Betriebe keinen ausreichenden Nutzen bietet. Chemikalienmanagement andererseits wird für sich genommen im Wesentlichen als Kostenfaktor gesehen, der trotz gesetzlicher Anforderungen so weit wie möglich vermieden wird. Die Integration beider Funktionen in einem nutzerfreundlichen Produkt verspricht daher ein erhebliches Marktpotenzial.

Insbesondere bestanden folgende Hauptanforderungen an das zu entwickelnde Tool:

- Analyse und Bewertbarkeit des Status Quo sowie zukünftiger Systemzustände im Hinblick auf Ressourceneffizienz und Risiko für Mensch und Umwelt inkl. Berücksichtigung von dynamischen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen im Produktionsablauf
- Nachvollziehbare Visualisierung der Produktionsabläufe zur Erreichung einer größeren Prozesstransparenz und eines besseren Systemverständnisses
- Bewertbarkeit von Handlungsalternativen im Rahmen unterschiedlicher Produktionsszenarien
- Darstellung von Analyseergebnissen anhand weniger, prägnanter Kennzahlen zur Ableitung von Handlungsempfehlungen
- Hohe Nutzerfreundlichkeit und geringe Einstiegsbarrieren insbesondere bei der Nutzung der Basisfunktionen, z. B. durch hohen Automatisierungsgrad des Workflows, Intuitive Gestaltung der Nutzerführung, Vermeidung eines „Information Overload“, Vorkonfiguration typischer Modellbausteine sowie Bereitstellung etablierter Verbesserungsmaßnahmen
- Bereitstellung von Schnittstellen oder Integration von Informationen aus anderen relevanten Tools und Datenbanken, um (optional) weiterführende Analysen zu ermöglichen

Weitere Anforderungen sollten gegebenenfalls im Rahmen des Projektes gemeinsam mit assoziierten Industriepartnern erarbeitet werden.

Geeignete Werkzeuge zur Dokumentation („Datenmodul“), zur dynamischen Simulation und zur Bewertung von Handlungsoptionen („Simulationsmodul und Bewertungsmodul“) sollten dabei ebenfalls entwickelt und an die spezifische Situation der Betriebe angepasst werden. Dabei sollte soweit möglich auf bereits vorhandene Werkzeuge aus Vorprojekten (vgl. Kap. 2) zurückgegriffen.

4. Durchgeführte Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

Nachfolgend werden im ersten Abschnitt die Vorhabensdurchführung und die Projektergebnisse detailliert wiedergegeben, dabei folgt die Darstellung im Wesentlichen der Vorhabensstruktur. In weiteren Abschnitten werden die Ergebnisse im Vergleich zur Zielstellung diskutiert und im Hinblick ihren ökologischen und ökonomischen Nutzen bewertet. Abschließend werden die Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse dargelegt.

4.1 Durchführung des Vorhabens

Die Entwicklungsarbeiten wurden in sechs Arbeitspakete durchgeführt. In *Arbeitspaket 1 – Spezifizierung und Strukturierung von Anforderungen* wurden Anforderungen an die zu entwickelnden Lösungen aus Unternehmensperspektive erhoben. Außerdem wurden rechtliche Rahmenbedingungen ermittelt, die weitere Anforderungen an die Lösung begründen. Darauf aufbauend wurde in *Arbeitspaket 2 – Methoden- und Softwareentwicklung für eine Kombination von Ressourceneffizienzanalyse und Chemikalienmanagement* eine Gesamtmethodik entwickelt, welche beide Themenkomplexe in beschriebener Weise synergetisch verknüpft. Als Ergebnis dieses zentralen Arbeitspaketes steht neben der entwickelten Methodik ein für KMU geeignetes, modulares Softwaretool für die ganzheitliche Datenhaltung, Modellbildung, Simulation und Bewertung zur Verfügung. Parallel wurden in *Arbeitspaket 3 – Datenerhebung bei assoziierten Anwendungspartnern* Unternehmensdaten erhoben (u.a. Produktionsdaten, Prozessdaten, Stoffstromdaten, Arbeitsszenarien). Diese flossen in die Entwicklung des Tools sowie in die zugrundeliegenden Modelle (z. B. empirische Emissions-/Expositionsmodelle) ein. Außerdem dienten sie als Grundlage für die Modellierung spezifischer Detailmodelle für Prozessketten der assoziierten Unternehmen. Diese wurden in *Arbeitspaket 4 – Modellierung einer spezifischen Prozesskette* erstellt und parametrisiert sowie in *Arbeitspaket 5 – Bewertung von realen und alternativen Produktionsszenarien* für die Untersuchung von Handlungsalternativen genutzt. Schließlich wurden in *Arbeitspaket 6 – Ergebnistransfer* die gewonnenen Erkenntnisse verallgemeinert und die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle untersucht.

Nachfolgend werden die Arbeiten und Ergebnisse je Arbeitspaket ausführlich erläutert.

AP 1: Spezifizierung und Strukturierung von Anforderungen

Die Unternehmen der Oberflächentechnik sind überwiegend kleine und mittlere Betriebe. Sie reagieren auf Anforderungen der Kunden und der Behörden aufgrund von Standardprozeduren, wobei die Abwägung von Aufwand und Nutzen im Vordergrund steht. Für eine geeignete Planung von Maßnahmen (wie geforderte Innovationen, Erfüllung von Auflagen usw.) sind dabei verstärkt Kenntnisse über die durch diese Maßnahmen zu erwartenden Ergebnisse notwendig, die zuverlässig jedoch nur durch anspruchsvolle Simulationsverfahren generiert werden können. Insbesondere im Hinblick auf die im vorliegenden Projekt betrachteten Themenfelder gibt es bisher folgende **wesentliche Hemmschwellen**:

- a. Datenanalyse Ressourceneffizienz:
 - Die spezifischen Ressourcendaten liegen nicht vor. Dies ist häufig darauf zurückzuführen, dass die einflussnehmenden produktionstechnischen Parameter nicht eindeutig definiert sind.
 - Die Folgen möglicher Umstellungen lassen sich nur bedingt planen. Da sich die Betriebe Fehlmstellungen nicht leisten können, wird häufig auf vielversprechende Innovationen verzichtet.
- b. Datenanalyse Risiko- und Umweltmanagement:
 - Viele Bewertungen des Risikos beruhen auf alten und hohen Daten
 - Der Abgleich zwischen den Analyseverfahren ist nicht ausreichend. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die einflussnehmenden Parameter nicht eindeutig definiert sind.
 - Die Konsequenzen von Umstellungen sind häufig nicht absehbar. Deshalb sind Betriebe häufig sehr zurückhaltend in Neuinvestitionen, wenn diese nicht gleichzeitig einen wirtschaftlichen Gewinn versprechen.

- c. Mögliche technische Veränderungen durch Best Practice Beispiele
- Mögliche technische Veränderungen beruhen wesentlich auf beispielhaften Zusammenstellungen von Best Practice Beispielen. Diese sind jedoch sehr allgemein gehalten und können die spezifischen Bedingungen der Betriebe nur bedingt abbilden.
 - Gleichzeitig sind die Beispiele zur allgemeinen Bewertung geeignet. Eine Nutzung für die Betriebe scheitert häufig daran, dass die technischen Parameter zur erfolgreichen Umstellung nicht eindeutig bekannt sind.
 - Allerdings stehen spezifische Modellierung für Spezialfälle wie Chemikalienmanagement oder Luftströmungen zur Verfügung. Diese sind aber nur bedingt kombinierbar, da sie auf unterschiedlichen Parametern beruhen.
- d. Einflussgrößen Arbeitsschutz (TRGS) und Umweltschutz (BREF)
- i. BREF - Best Available Technique Reference Documents
- Die Basis der IVU-Richtlinie (Richtlinie 96/61EG) hat insgesamt eine nachhaltige Produktion mit einem hohen Schutzniveau für die Umwelt zum Ziel. Die entwickelten Dokumente verbinden bereits die Techniken und Anlagenarten mit Umwelteinflüssen. Es werden Techniken unter Berücksichtigung des Kosten/Nutzen-Verhältnisses der Anwendung bzw. den Bedingungen des betreffenden industriellen Sektor wirtschaftlich und technisch definiert, die unter „vertretbaren“ Verhältnissen angewendet werden kann und damit als Standard bezeichnet werden können. Es sind Techniken, die am wirksamsten zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt geeignet sind.
- ii. Arbeitsschutz nach TRGS
- Ähnlich wie die BREF für den Umweltschutz definieren die TRGS technische Maßnahmen hinsichtlich ihre Anwendbarkeit zur Mitarbeitersicherung. Hier liegen teilweise sehr detaillierte Vorschläge vor, die allerdings häufig nicht auf Messungen bzw. physikalischen Parametern beruhen sondern auf Erfahrungen von Experten. Da diese auch sehr umfangreich sind, ist eine Nutzung durch die Betriebe nur bedingt möglich:
- Einflussgrößen Serienbauteile nach TRGS:
 - T1 Geschlossene Beschichtungsanlagen mit einer mechanischen Abdeckung und Absaugung (Wirksamkeit nachgewiesen, z. B. nach DIN EN 12599)
 - T2 Quasi-geschlossene Anlage: Prozessbehälter mit mechanischer Abdeckung und abgesaugtem Transportwagen
 - T3 Festverlegte Rohrleitungen zu den Beschichtungsanlagen
 - T4 Technische Funktionsüberwachung der Absauganlage mit Rückkopplung zum Elektrolyten
 - T5 Ausreichende technische Raumbelüftung
 - T6 Beschickungsanlage mit Aushängsicherung und Tropfschutz
 - T7 Überwachung der technischen Lüftung durch Vorrichtungen nach TRGS 722 2.3.1 (3)
 - O2 Regelmäßige Kontrolle und Funktionsprüfung der Absauganlage
 - O3 Regelmäßige Prüfung der Lüftungstechnischen Einrichtung durch eine befähigte Person
 - O4 Regelmäßige Reinigung der Lüftungskanäle und der Umgebung der Beschichtungs-Prozessbehälter von Elektrolytanhaftungen oder Verkrustungen
 - Einflussgrößen Einzelbauteile nach TRGS:
 - T1 Emissionsmindernde Maßnahmen (z. B. der Einsatz von Netzmittel)
 - T2 Absaugung am Elektrolyten (Rand- oder Wandabsaugung)
 - T3 Überwachung der techn. Lüftung durch Vorrichtungen nach TRGS 722 2.3.1 (3)
 - T5 Lüftungskabine am Beschickungswagen
 - T6 Abdeckung der Elektrolytbehälter
 - T7 Raumluftechnische Anlage

Das daraus resultierende Ziel ist in Abbildung 2 zusammengefasst:



Abbildung 2: Schematische Verbindung der technischen Parameter mit den Risikowerten

Unter Nutzung der vorhandenen Informationen zu den Auswirkungen der technischen Maßnahmen können Bedingungen und Szenarien definiert werden, welche die Auswirkungen einer Installation bei den Betrieben beschreiben können. Durch gezielte Modifikation können die physikalischen und produktionstechnischen Parameter in dem resultierenden Kennfeld modelliert und die besten technischen Maßnahmen definiert werden. Dafür sind folgende Kernpunkte zu berücksichtigen:

- **Kombination:** Verbindung Gefährdungs-/ Arbeitsschutzansatz (TRGS) und Umweltschutzansatz (BREF). Insbesondere der Ansatz der Bewertung von Best-Practice-Techniken ist hilfreich und sollte intensiviert werden.
- **Entwicklung von Szenarien zur Modellierung:** Bewertungsmaßstäbe der Grenzwerte / Beurteilungswerte aufgrund der geringen Konzentrationen nicht als fester Wert, sondern als Bereich verwenden, der durch die Messbedingungen dargestellt wird. Hierdurch werden nicht Einzelwerte, sondern Entwicklungen und Abhängigkeiten in den Vordergrund gestellt.
- **Technische Machbarkeit:** Die technischen Bedingungen in den Vordergrund zu stellen. Dazu sollten die Messbedingungen angepasst werden.
- **Vergleichbarkeit:** Durchführung von langfristigen Messkampagnen durchzuführen. Hierzu könnten regelmäßige Monitoring-Programme genutzt werden, welche auf den von den Betrieben sowieso durchzuführenden Untersuchungen basieren.
- **Relevante Werte:** Die Zugriffsmöglichkeiten auf die relevanten Werte zu begrenzen, welche durch die Szenarien definiert sind.

Weiterhin sind für eine erfolgreiche Umsetzung in den Betrieben folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Konkretisierung der erforderlichen Arbeitsprozesse
- Bewertung des Risikos der Arbeitsszenarien durch
 - technische Best-Practice-Vergleiche
 - gemeinsames Monitoring
 - Abgleich mit anderen Betrieben
- Technische Modifikationen durch Konkretisierung der Leitlinien von z.B. der DGUV
- Im europäischen Kontext: Abgleich der Messbedingungen und Bewertungsmaßstäbe
- Mittelfristig:
 - Nutzung von vergleichbaren Kriterien zur Innovation (REACH: Substanzsubstitution oder technologische Substitution)
 - Durchführung von "Compliance Checks" gemeinsam mit den direkten Kunden.

Die nachfolgende Abbildung 3 stellt die Verbindung der Ansätze zur dar. Zwingend ist die Harmonisierung der relevanten Parameter durch ein IT Modell. Dieses muss zum einen eine Modellierung der Abhängigkeiten und zum anderen eine einfache visuelle Bewertung der Auswirkungen möglicher Maßnahmen erlauben.

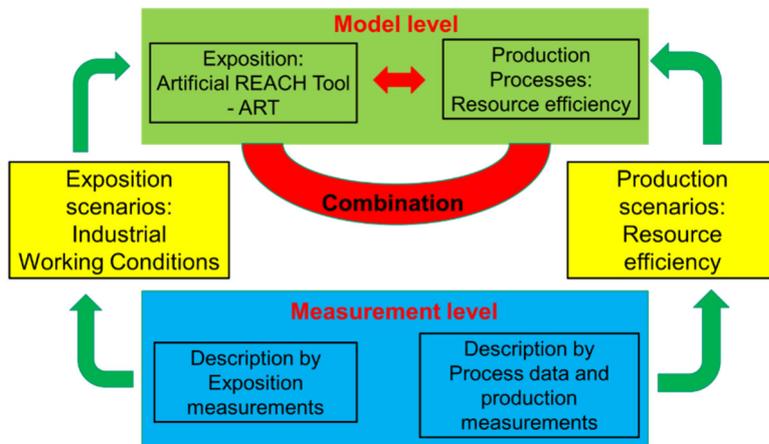


Abbildung 3: Bedingungen zur Analyse und Bewertung der Auswirkungen von technischen Maßnahmen

Der kombinierte Ansatz zur gemeinsamen Optimierung von Umwelt- und Arbeitsschutz stellt somit erhebliche Anforderungen an Datenerfassung und -auswertung:

1. Zunehmende Digitalisierung bei der Erfassung von Prozessdaten entlang der gesamten Wertschöpfungskette; daraus Entwicklung von Szenarien und Bildung von Kennfeldern
2. Aus der Analyse der Prozessdaten muss eine gezieltere Beschreibung der Expositionsrisiko-Szenarien möglich sein
3. Das IT-Verfahren erfordert eine effiziente Verarbeitung großer Datenmengen

Anwendungspotenziale und weitere Anforderungen

1. Der Nutzen der Kombination von Ressourceneffizienzanalysen (Ziel: nachhaltige Nutzung von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie Energie) und Chemikalienmanagement (Ziel: minimale Belastung und Risiken für die Umwelt und den Menschen) muss dem Aufwand angemessen sein.
2. Synergien bestehen bei der Datenerhebung, Modellierung und Auswertung; beide Arten von Analysen basieren auf einer umfassenden Erfassung produktionsbezogener Daten sowie der Abstraktion des realen Systems in ein digitales Modell. Wichtig war hierbei auch die Gewährleistung folgender Bedingungen:
 - Möglichst einfache Datenerfassung und weitgehende Nutzung von Daten, die in vielen Betrieben bereits regelmäßig erfasst werden
 - Breite Anwendbarkeit in der Oberflächentechnik d. h. möglichst weitgehende Nutzung allgemeingültiger Prozessmerkmale
 - Eindeutige funktionale Zusammenhänge zwischen erfassten Daten und Parametrierung für Ressourcenoptimierung einerseits und Chemikalienmanagement andererseits
3. Basierend auf den Erfahrungen aus der Diskussion über Chrom(VI)-Technologien können sowohl Risikomanagement als auch Innovationsprozesse mit geeigneten Expositionsszenarien entwickelt werden.

Vor diesem Hintergrund wurden gemeinsam mit den assoziierten Anwendungspartnern und weiteren Mitgliedern des Vecco e.V. folgende relevante Anforderungen an ein Werkzeug zur Optimierung der Ressourceneffizienz und des Chemikalienmanagements ermittelt, und zwar zunächst für jede dieser Funktionalitäten unabhängig von der geplanten Verknüpfung.

1) Anforderungen an die Ressourceneffizienz-Optimierung aus Unternehmenssicht:

- Aufdeckung Einsparpotenziale

- Energieeinsparung
 - Reduzierung Abwärme
 - Reduzierung von Verdunstungsverlusten
 - Wärmeisolierung
 - Nutzung von Abwärme in der Abluft
 - Energieeffiziente Prozesse
 - Warentransport
 - Gleichrichter
 - Elektrolyte
- Materialeinsparung
 - Reduzierung der anfallenden Abfälle
 - Reduzierung der Neuansätze für Prozesslösungen durch Überwachung der Badparameter
 - Reduzierung von Abwasser
 - Rückführung von ausgeschleppten Prozesslösungen
 - Reduzierung der Menge des erforderlichen Spülwassers
 - Mehrfachnutzung von Spülwasser

2) Anforderungen an das Chemikalienmanagement aus Unternehmenssicht:

- Anpassung der Ausgangsdaten für die Toxizitätsbestimmung bei geänderter rechtlicher Einstufungen einzelner Stoffe.
- Schnelle Bestimmung der Änderung der Toxizität bei unterschiedlichen Zusammensetzungen und Konzentrationen der Prozessbäder.
- Rechtskonformität bezüglich REACH und GHS.
- Basis für die Unterrichtung der Mitarbeiter über den Umgang Gefahrstoffen aufgrund geänderter Einstufungen.

Weiterhin wurden Kernanforderungen für die Umsetzung in ein integriertes Optimierungstool definiert:

3) Anforderungen an Planungs- und Bewertungs-Tool:

- Soll für Beratungseinsatz durch eiffo eG geeignet sein
- Parametrierung in Excel + Simulation/Visualisierung in Anylogic
- Parametrierbare generische Linie soll repräsentativ für Branche sein
- Integration Bewertung Ressourceneffizienz / Chemikalienmanagement

Als weiterer wesentlicher Arbeitsschritt wurden anschließend geeignete Parameter und entsprechende Datenquellen identifiziert, die für beide Optimierungsaufgaben aussagekräftige Analysen ermöglichen. Die analysierten Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Optimierungszielen wurden zur Übersichtlichkeit graphisch erfasst, wie in der folgenden Abbildung 2 dargestellt (bereinigt um nicht relevante Zusammenhänge wie z. B. Parameter mit geringem Einfluss oder nur für Sonderfälle relevant etc.).

Abschließend wurden die aufgeschlüsselten Optimierungsziele für die integrierte Ressourceneffizienzanalyse und Chemikalienmanagement, die dazu festgelegten Parameter mit den jeweiligen Datenquellen in einer detaillierte Übersicht zusammengestellt (Abbildung 3). Ausgehend von den technischen Parametern als Einflussfaktoren zur Bestimmung der Ressourceneffizienz und der Risikoanalyse werden für die einzelnen Einflussgrößen (Gebäude, Anlage ...) die Wirkungen dargestellt.

Die Messung für Ressourceneffizienz und Risikoanalyse erfolgen dabei bei möglichst gleichen Umgebungsbedingungen. Das Problem bei den Messung besteht darin, dass die Risikoanalyse durch Kurzmessungen erfolgen kann, die Ressourceneffizienzanalyse aufgrund der langsamen Veränderung der Parameter auf Messungen in einem längeren Zeitraum (Woche) zurückgreifen muss.

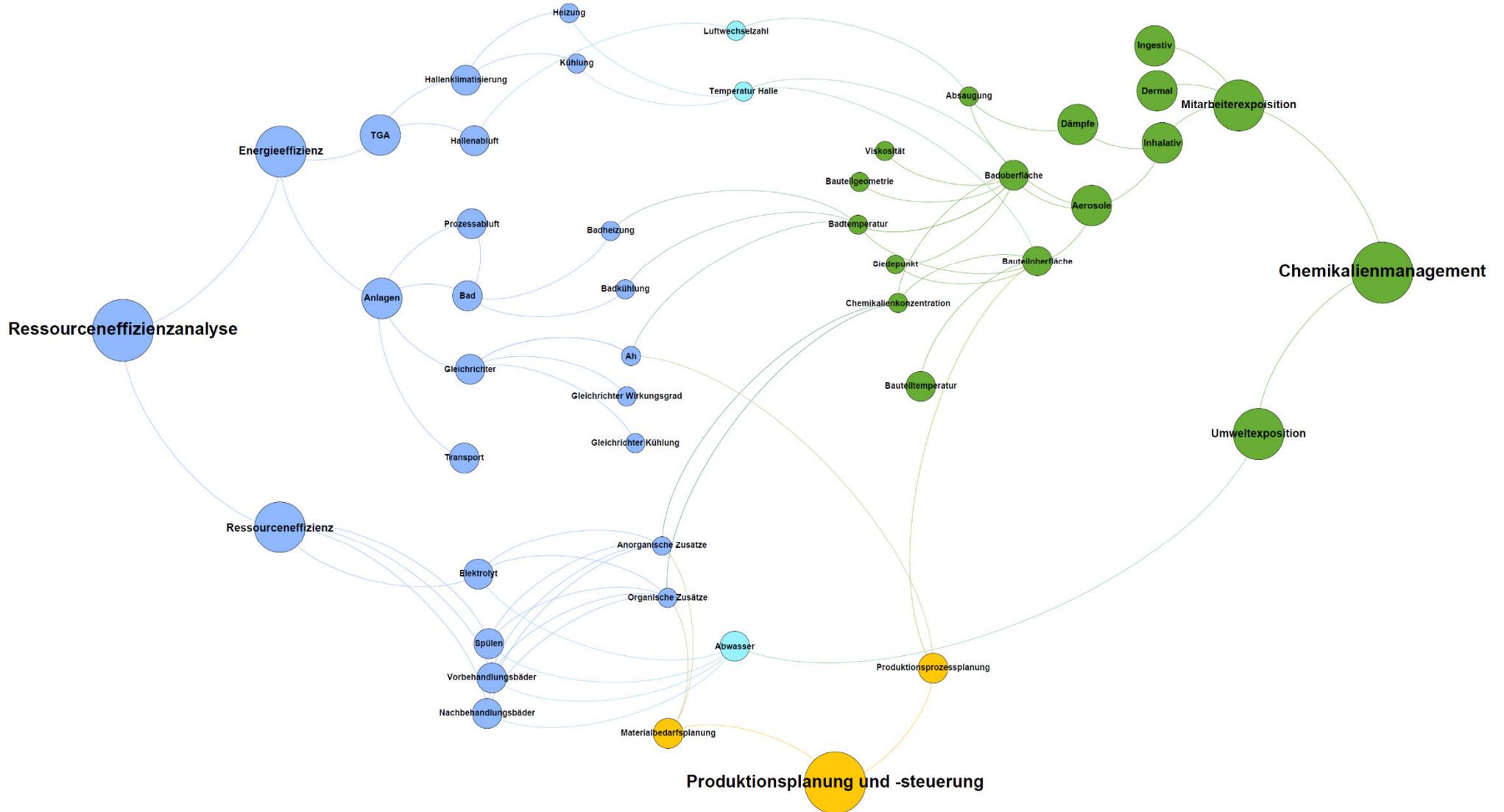


Abbildung 4: Identifikation von gemeinsamen Parametern und Datenquellen für Ressourceneffizienzanalyse und Chemikalienmanagement

Kosten / Ressourceneinsparung				Quelle: Technische Parameter		Chemikalienmanagement / Risikominimierung									
Ziel Ressourceneffizienz	Methode / Angaben zur Beschreibung	Einsparung	Kosten	Quelle Parametererfassung (überwiegend kontinuierliche Erfassung und Auswertung)	Technik	Parameter	Quelle Parametererfassung (keine kontinuierliche Auswertung vorhandener Daten)	Risiko-szenario	Beschreibung	Methode zur Beschreibung	Ziel Risikominimierung				
Energieeinsparung	MEMAN Tool	Energie und Abluft			Gebäude					Nutzung von ART	Umwelt-emission CO2-Footprint				
	Technikdaten				Grund und Boden	Haustechnik						Raumaufteilung		Dämpfe / Aerosole	Dosis - Wirkung
	Technikdaten				Heizung	Haustechnik siehe auch Absaugung						Zuluft / Abluft / Luftwechsel	Luftmenge Temperatur Vorheizung	Dämpfe / Aerosole	Dosis - Wirkung
Technikdaten	Kühlung	Haustechnik	Klimatisierung / Temperatur	Klimaanlage: ja/nein Hallentemperatur Rückführung	Dämpfe / Aerosole	Dosis - Wirkung									
Energieeinsparung	MEMAN Tool	Energie			Anlage		Übernahme von technischem und Prozessmanagement		Arbeits-szenarien	z. T. Nutzung von ART	Umwelt- u. Mitarbeiterexposition				
	Leistungsbeschreibung oder Einstellung				Leistung	Anlagenteuerung (Gleichrichter)						Gleichrichter	Effizienz Einschaltzeit Spannung Stromstärke	nicht relevant	nicht relevant
					Wirkungsgrad	Anlagenteuerung (Gleichrichter)						Pumpen	Einschaltzeit	nicht relevant	nicht relevant
					Dimensionierung	Anlagenteuerung (Pumpen)						Transportwagen	Transportwagen Staplerverkehr Lieferverkehr	nicht relevant	nicht relevant
					Dimensionierung	Anlagenteuerung						Gestell/Trommel	Gestell / Trommel	Dämpfe / Aerosole	Dosis - Wirkung
					Leistung	Anlagenteuerung (Absaugung Anlage, z.B. Rand)						Absaugung	Luftmenge Temperatur Feuchtegehalt Konzentrationen	Dämpfe / Aerosole	Dosis - Wirkung
Management-systeme	Arbeitszeit	Personal			Organisation			Dämpfe / Aerosole	Nutzung von ART	Mitarbeiterexposition					
Arbeitsplanungen					Betriebsorganisation	Anzahl Mitarbeiter					Jobrotation Ablaufprozess	zeitliche Belastung			
					Zeit	Aufenthaltsdauer					Jobrotation Ablaufprozess	zeitliche Belastung			
					Kriterium: Armlänge	Entfernung von Bad					Armlänge	lokale Belastung			
					Kriterium: Schutzklassen	PSA					Effizienz je PSA	lokale Belastung			
Arbeitsablauf	Jobfolge Optimierung je Schicht/AT	zeitliche Belastung													
Bauteil allgemein Substrat/ Design	MEMAN Tool	unpezifisch	Taktzeit	Taktzeit	Prozesschemie	Bauteil			Schöpfanteil	Nutzung von ART	Mitarbeiterexposition				
	Energie / Zeit					unspezifisch	Prozesschemie					Bauteil allgemein	Klasseneinteilung?	Verschleppung	Verschleppung
	Qualitätsverbesserung					Ausschussminimierung	Streuung (Verteilung) / Schichtdicke					Qualitätsmanagement	Gewicht	aus ERP --> Energie Aufheizen	Verschleppung
Kosten-einsparung und Qualitätsverbesserung	MEMAN Tool	Prozess-optimierung				Prozess			Aerosolbildung	Nutzung von ART					
						Gewählte Prozessdaten	Materialverbrauch					Anlagenteuerung Verschmutzung Prozess-chemie	Vorbehandlung / Reinigung	Temperatur Chemikalien Spülwasser Prozesswärme (GR)	
													Wirkbad (Details bei Ressourcen)	Temperatur Abdeckung Absaugleistung Badvolumen Badoberfläche Spülsystem Spülkriterium (?)	
													Spülen	Temperatur Chemikalien Spülwasser Prozesswärme (GR)	
Energieverbrauch	Anlagenteuerung	Temperatur (Heizung / Kühlung)	Badtemperatur Heizart Kühlmenge												
		Badumwälzung / -bewegung	Volumenstrom Motorleistung Oberflächenbewegung Filtration												
Kosten-einsparung Recycling (Rückführung)	MEMAN Tool	Minimierung	Materialverbrauch		Einkauf Prozesssteuerung Badanlyse	Ressourcen			Konzentration Chemismus	Nutzung von ART	Umwelt-emission				
						Bilanzen	Chemikalien (Konzentration, Dampfdruck, Viskosität) Zusätze					Dosis - Wirkung regelmäßige Badanlyse			
Kosten-einsparung Recycling (Rückführung)	MEMAN Tool	Minimierung	Materialverbrauch		Einkauf Prozesssteuerung	Abfall			Konzentration Chemismus	Nutzung von ART	Umwelt-emission				
						Bilanzen	Allgemeine Wartung					Wartung (Häufigkeit)	zeitliche Belastung		
							Chemikalien Zusätze					Menge aus ERP Verwurf	Bewertung nur qualitativ		
							Feststoffe						sporadische Messungen		
							Anoden								
Abwasser	Menge aus ERP														

Abbildung 5: Detaillierte Übersicht zu Optimierungszielen, entsprechenden Parametern und jeweiligen Datenquellen für integrierte Ressourceneffizienzanalyse und Chemikalienmanagement

AP 2: Methoden- und Softwareentwicklung für eine Kombination von Ressourceneffizienzanalyse und Chemikalienmanagement

Entwicklung der Gesamtmethodik basierend auf Anforderungskatalog

Auf Basis der Anforderungen aus dem vorherigen Arbeitspaket galt es die Gesamtmethodik zu entwickeln, welche hinreichend generisch aufgestellt sein muss, um eine einfache Anpassung an zukünftige Betriebe zu ermöglichen und zugleich spezifisch genug, um die Anwendungsfälle mit einer ausreichenden Genauigkeit abzubilden (siehe auch Abbildung 6).

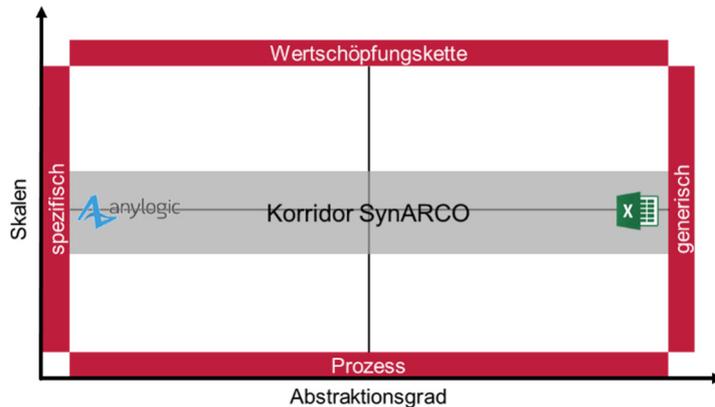


Abbildung 6: Verortung der zu entwickelnden Softwareumgebung

Die Gesamtmethodik ist der Abbildung 29 im Kapitel 4.3 sowie vereinfacht der Abbildung 7 zu entnehmen. Aus der Anlage heraus werden Betriebs- und Szenario-spezifische Daten erfasst. Parallel erfolgt eine Anbindung an Umweltdatenbanken, um entsprechende Umweltwirkungsindikatoren in die Simulation und anschließende Bewertung einfließen zu lassen. Eine direkte Anbindung von Tools aus dem Bereich Risikomanagement, z.B. das ART Tool oder EUSES, ist nicht sinnvoll möglich, daher wurde die Möglichkeit geschaffen Surrogatmodelle aus diesen zu erzeugen. Diese können anschließend direkt in der Simulation zur Berechnung genutzt werden. Kern des Ansatzes ist die dynamische agentenbasierte Simulation, welche sowohl die entsprechenden Energie- und Stoffströme als auch die Risikosituation berechnet. Die Ergebnisse der Simulation können in einem integrierten Auswertungsmodul hinsichtlich der Umweltwirkungen, der Risikosituation und finanziellen Aspekten ausgewertet werden. Parallel ist auch eine direkte Visualisierung aus der Simulationsumgebung heraus möglich.

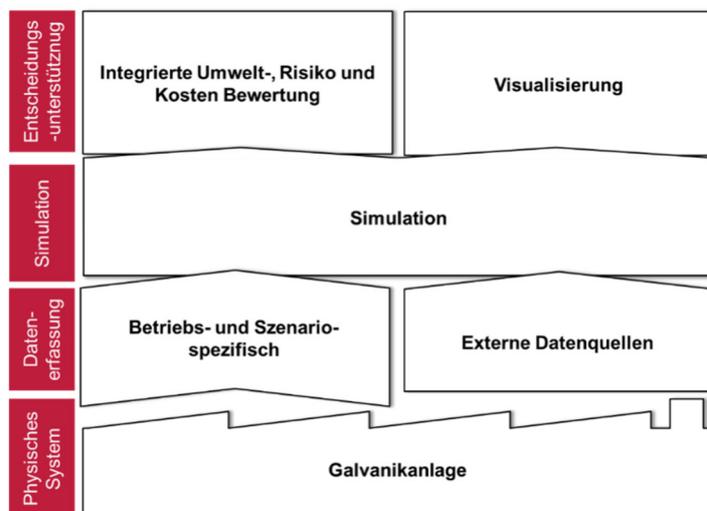


Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung der entwickelten Gesamtmethodik

Zur möglichst einfachen generischen Datenerfassung wird das Datenmodul in Excel bereitgestellt, welches für Anwender aus dem Fachbereich weitestgehend selbsterklärend ist. Falls spezifischere Fälle

abgebildet werden sollen, ist eine direkt Anpassung in der Anylogic Softwareumgebung möglich. Diese erfordert jedoch vertiefte Kenntnisse im Bereich der Simulation, um auch die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Modulen entsprechend zu berücksichtigen.

Die zu entwickelnde Simulationsumgebung wurde mit Hilfe der Programme Excel und Anylogic realisiert werden. Die Kombination aus einer statischen Modellierung in Excel und einer dynamischen Modellierung in Anylogic soll eine einfache und effiziente Parametrierbarkeit gewährleisten, um spezifische Anwendungsfälle möglichst gut abzubilden (siehe auch Abbildung 6). Der Fokus bei dem Abstraktionsgrad liegt auf der Prozesskette in dem Galvanobetrieb, welche sich zwischen detaillierten Prozessbetrachtungen und einer betriebsübergreifenden Betrachtung der gesamten Wertchöpfungskette einordnet. Die zu modellierenden Elemente einer Galvaniklinie sind in Abbildung 22 dargestellt.

Datenmodul zur Dokumentation von Produktionsdaten, Energie- und Stoffströmen, Definition von Arbeitsszenarien, etc.

Die zuvor eingeführten Elemente einer Galvaniklinie müssen nun strukturiert erfasst werden und für die Simulation aufbereitet werden. Das entwickelte Excel-basierte Datenerfassungsmodul ermöglicht eine strukturierte Erfassung aller benötigten Daten aus dem Betrieb und dient als unmittelbare Schnittstelle zum dynamischen Simulationsmodell. Sowohl die Daten für die Ressourceneffizienzanalyse als auch für die Risikobetrachtungen können mit einem gemeinsamen Modul erfasst werden. Das Datenerfassungsmodul dient einem generischen dynamischen Stoffstrommodell, welches dem Aufbau der meisten Galvanotechnischen Anlagen sehr nahe kommt. Falls eine spezifischere Modellierung erforderlich ist, können die Daten ebenfalls mit dem Datenerfassungsmodul erfasst werden, jedoch sind dann ggf. Anpassungen in dem Simulationsmodul erforderlich.

Das Datenerfassungsmodul teilt sich in die folgenden Bereiche auf:

- Produkt- und Produktionsprogramm
- Anlage und Gleichrichter
- Prozessmedien
- Mitarbeiter und Tätigkeiten
- Tätigkeiten / Surrogatmodelle für Tätigkeiten
- Gebäude und Raumlauft
- (Konstanten für das Simulationsmodell)

Produkt und Gestell

In diesem Fenster werden die Eigenschaften des Produktes konfiguriert.

Produkt (Substrat)		Beschichtung 1		Beschichtung 2		Materialien				
Berechnung	Würfel mit Kantenlänge 30	Material	Nickel	Material	Chrom	Material	Dichte [g/dm³]	spez. Wärmekapa. [J/kgK]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wärmeübergangskoeffizient [1/K]
Oberfläche [mm²]	5.400	Dicke [µm]	12.0	Dicke [µm]	0.5	Cr53	7690	470	42.6	11.5
Volumen [mm³]	27.000	Volumen [mm³]	64.80	Volumen [mm³]	2.70	42CrMo4	7720	470	42.6	14.475
Material	Cr53	Gewicht [g]	0.5772384	Gewicht [g]	0.019278	EN AW 6060 (AlMgSi)	2700	898	210	
Gewicht [g]	207.63	Wärmekapazität [kJ/K]	256.2938496	Wärmekapazität [kJ/K]	0	Chrom	7140			
Wärmekapazität [J/K]	97586.1					Nickel	8908	444	91	
Verschleppfaktor [g/dm²]	1.5									

Gestell	
Anzahl der Produkte pro Gestell	66
Oberfläche aller Produkte [m²]	0.4
Gewicht aller Produkte [kg]	13.7
Verschleppung pro Trommel [l]	0.5

Produktionsprogramm			
Schritt	Bad	Sozialzeit in [s]	Beschreibung
0	tank1		0 Speicher 1
1	loading	180	Beladestation
2	tank7		300 Chem. Entfettung
3	tank9		15 Spülkaskade 1
4	tank10		15 Spülkaskade 1
5	tank11		15 Spülkaskade 1
6	tank6		300 Elektroentfettung
7	tank9		10 Spülkaskade 1
8	tank10		10 Spülkaskade 1
9	tank11		10 Spülkaskade 1
10	tank13		180 Beize
11	tank14		10 Spülkaskade 2
12	tank15		10 Spülkaskade 2
13	tank16		10 Spülkaskade 2
14	tank18		600 Galvanik Ni
15	tank24		10 Spülkaskade 3
16	tank25		10 Spülkaskade 3
17	tank26		10 Spülkaskade 3
18	tank23		120 Galvanik Cr
19	tank27		10 Spülkaskade 4
20	tank28		10 Spülkaskade 4
21	tank29		10 Spülkaskade 4
22	unloading		360 Entladestation
23	tank1		0 Speicher 1

Prozessparameter Galvanik			
Strom [A]	Spannung [V]	Leistung [W]	
800	8	6400	
1000	12	12000	

Abbildung 8: Ausschnitt aus Datenerfassungsmodul für das Produkt mit dem Produktionsprogramm

In Abbildung 8 ist ein Ausschnitt aus dem Datenerfassungsmodul zu sehen. Die gelb hinterlegten Felder sind vom Anwender auszufüllen, während die grauen Felder konstant sind/bzw. vom Datenerfassungsmodul berechnet werden. Diese berechnen einzelne ausgewählte statische Kenngrößen vorab, um den Anwender beim Ausfüllen zu unterstützen und stellen diese anschließend auch der dynamischen Simulationsumgebung bereit.

Simulationsmodul zur dynamischen Nachbildung und Visualisierung der Fertigungsprozesse

Kern der dynamischen Simulationsumgebung ist eine Energie- und Stoffstrommodellierung der gesamten Galvaniklinie. Eine einfache statische Energie- und Stoffstrommodellierung würde jedoch nur sehr unzureichend die dynamischen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen in der Galvanoprozesskette berücksichtigen. Daher wurde ein agentenbasierter dynamischer Simulationansatz gewählt, um diesem Aspekt besser gerecht zu werden. In einer Agentenbasierten Simulation werden die einzelnen Elemente der Galvanoprozesskette als einzelne Agenten/Module abgebildet, welche zunächst für sich unabhängig ihre Energie- und Stoffströme berechnen. Die Agenten stehen jedoch untereinander im Kontakt und können so auch die dynamischen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen abbilden. Zusätzlich gibt es eine übergeordnete Modellebene, welche globale Aktivitäten und Kennzahlen abbildet.

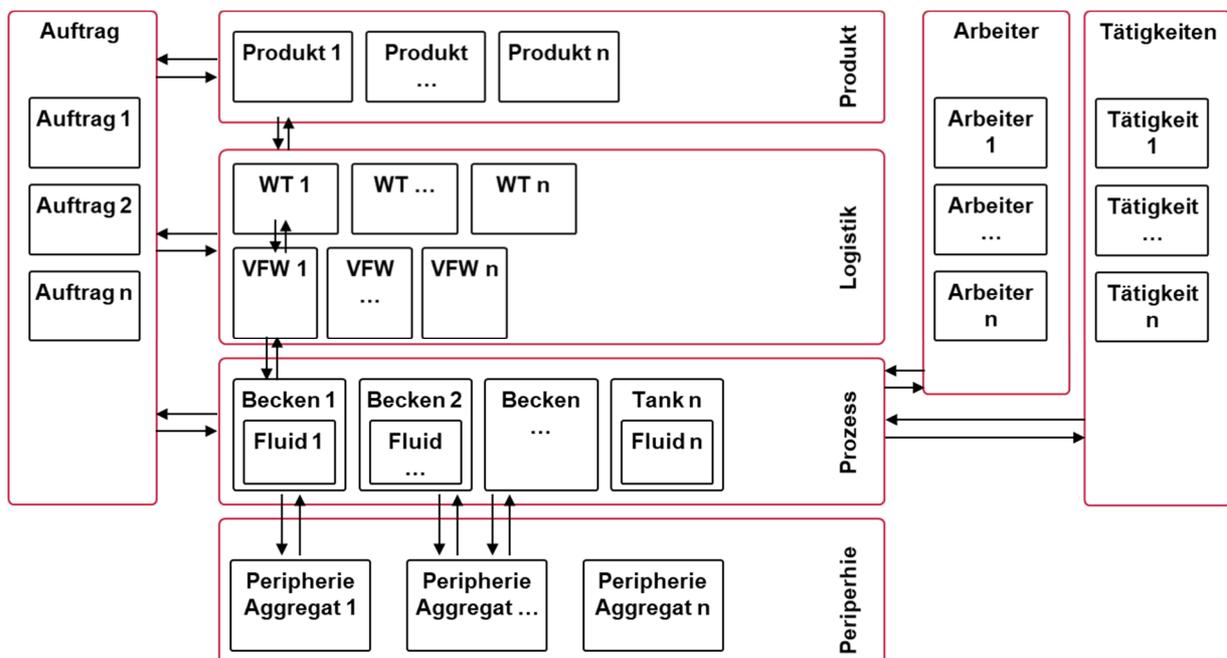


Abbildung 9: Einzelmodelle aus der Simulation

Der Agententyp Produkt stellt das zu beschichtende Produkt dar und enthält die Produkteigenschaften wie Oberfläche, Volumen, Gewicht, Material oder Abtropfverhalten. Diese Eigenschaften sind erforderlich, um den Energiebedarf und die Ausschleppung bestimmter Produkte zu berechnen. Warenträger (WT) werden mit einer definierten Anzahl von Produkten gefüllt und dienen zum Transport der Produkte zu verschiedenen Becken. Verfahrwagen (VFW) transportieren die Träger zwischen den Becken. Der Betriebsbereich von Verfahrwagen ist eingeschränkt und enthält ein zustandsbasiertes Modell, mit dem auch der Energiebedarf modelliert werden kann.

Die Agenten Becken repräsentieren die Fluidtanks zum Aufbau der Beschichtungsprozesskette. Wiederum repräsentiert ein zustandsbasiertes Modell die aktuelle Situation (leer, besetzt, in Bearbeitung und wartet auf RMH) und ist die Grundlage für das Energiemodell des Becken. In diesem Agent wird der Energiebedarf lokaler Energieverbraucher modelliert, beispielsweise die Antriebe zum Drehen der Warenträger während des Beschichtens oder Gleichrichter für den Galvanisierprozess. Becken können mit einer Flüssigkeit gefüllt werden oder leer bleiben, wenn ein Tank als Speicher für

Warenträger verwendet wird. Es ist möglich, eine Flüssigkeit für mehrere Becken zu verwenden, wenn die Becken mit einem Rohrleitungssystem verbunden sind. Zusätzliche Peripherie kann an die Fluide (z. B. bei Umwälzpumpen für mehrere Bäder), an mehrere Becken (z. B. bei zustandsgesteuerten Abluftsystemen) oder abhängig von Faktoren außerhalb der Prozesskette (z. B. bei Kühleinheiten für Steuerungssysteme).

Der Agententyp Auftrag enthält alle relevanten Informationen, um ein Produkt durch die Beschichtungsprozesskette zu führen, wie z. B. Prozessschritte, Zeiten und Parameter. Diese Informationen bilden die Grundlage für einen Simulationslauf, und dieser Agententyp empfängt. Der Arbeiter repräsentiert Personen, die innerhalb der Beschichtungslinie arbeiten. Jeder Mitarbeiter hat eine bestimmte Aufgabenreihenfolge, die sich auf Arbeitsschutzdaten bezieht. Bei Verchromungslinien stehen die CrVI-Luftemissionen im Fokus der Arbeitsschutzbehörden und sollten überwacht werden

Surrogatmodelle für Risikobewertung durch Chemikalienexposition

Die Prozesskettensimulation bildet die gesamte Galvanoprocesskette im Betrieb ab und ermöglicht eine Berechnung der Energie- und Stoffströme. Für weitergehende Betrachtungen, wie z.B. eine Einschätzung der Risikosituation durch Chemikalienexpositionen erfordern die Einbeziehung weiterer Detailmodelle. Daher wurde in der Simulation die Möglichkeit vereinfachte Surrogatmodelle von Detailmodellen zu hinterlegen integriert. Vorteil dieses Ansatzes ist, dass sich Surrogatmodelle vollständig in die Simulationsumgebung integrieren lassen und somit es nicht zu zeitlichen Verzögerungen aufgrund unterschiedlicher Simulationslaufzeiten oder weiteren Abhängigkeiten kommt.

Das Advanced Reach Tool 1.5 ermöglicht eine modellbasierte Bewertung für verschiedene einzelne Arbeitsszenarien eine parameterabhängige Risikobewertung. Dies soll genutzt werden um das Risiko der Mitarbeiter durch eine inhalative Belastung zu quantifizieren in Abhängigkeit von dem tatsächlichen Geschehen in der Galvanoprocesskette.

Eine direkte Anbindung des Advanced Reach Tools 1.5 über eine direkte Schnittstelle ist aufgrund der völlig anderen Grundkonzeption als online Tool nicht sinnvoll möglich. Ferner wäre hier ein weitergehender Zugriff auf das Tool notwendig, welcher im Rahmen des Projektes nicht gegeben war. Daher wurde das Advanced Reach Tool genutzt wurde, um parameterabhängige Surrogatmodelle zu entwickeln, welche in die Simulationsumgebung eingebunden werden.

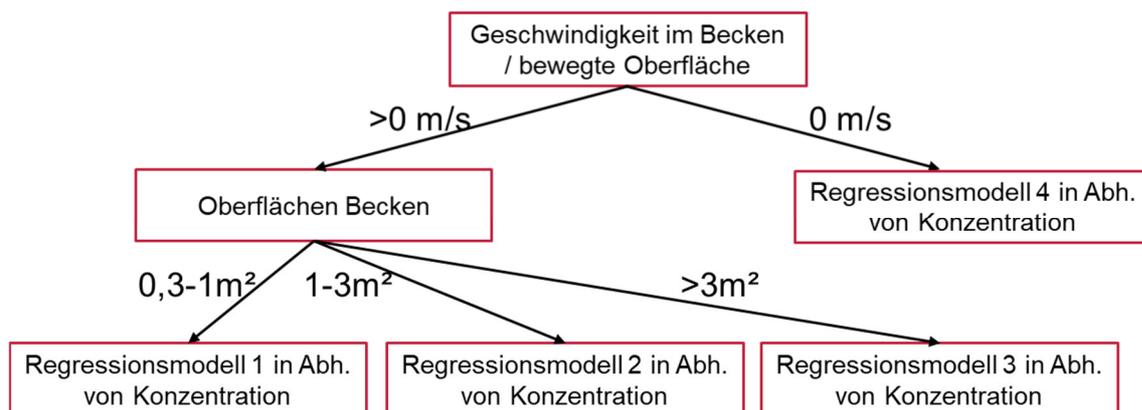


Abbildung 10: Parameterabhängige Fallunterscheidung zur Surrogatmodellauswahl

Beispielhaft wird im Folgenden für Tätigkeiten direkt an Wirkbädern mit Chromtrioxid die Berechnung der Expositionsbelastung mittels Surrogatmodell vorgestellt. In Abhängigkeit davon, ob das Fluid im Becken bewegt wurde, der Oberflächen von diesen und der Chromtrioxid Konzentration im Becken wurden lineare Surrogatmodelle für einzelne Arbeitsszenarien entwickelt (siehe nachfolgende Abbildung 11).

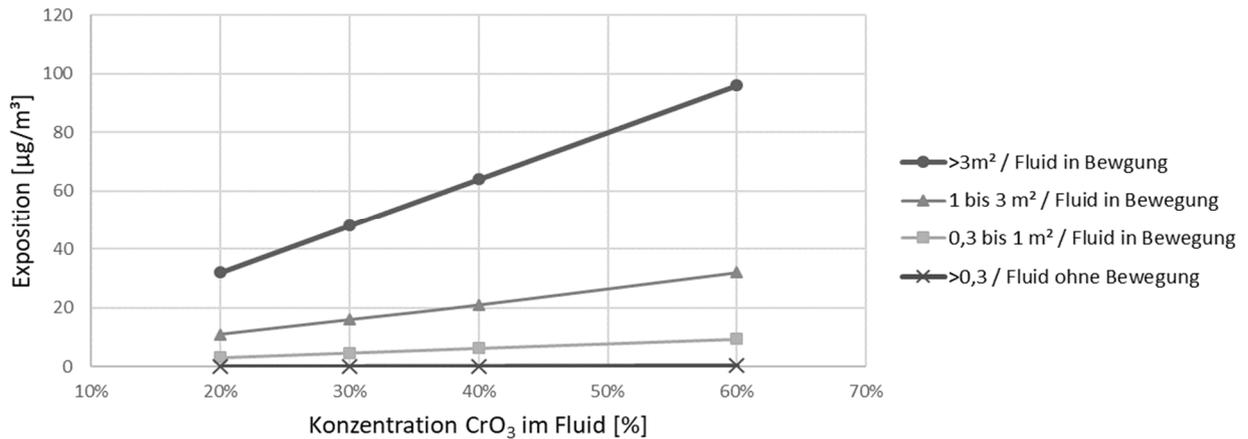


Abbildung 11: Lineare Surrogatmodelle in Abhängigkeit von Beckengröße und Fluidbewegung

Visualisierung

Das dynamische Stoffstrommodell ermöglicht eine direkte 3D Visualisierung innerhalb der Java-basierten Anylogic Umgebung. Die 3D Visualisierung ermöglicht eine einfache Kontrolle des Ablaufgeschehen und kann sowohl in Echtzeit als auch beliebig schneller (in Abhängigkeit von der Rechenleistung des ausführenden Rechners) laufen. In der Abbildung 12 ist ein Überblick über die generische Linie zu sehen.

Um die Belastung der einzelnen Mitarbeiter anzuzeigen befinden sich eingefärbte Kugeln über ihren Köpfen deren Farbe von ihrer aktuellen Belastung durch gefährdende Aerosole abhängt (siehe Abbildung 12 und Abbildung 13).

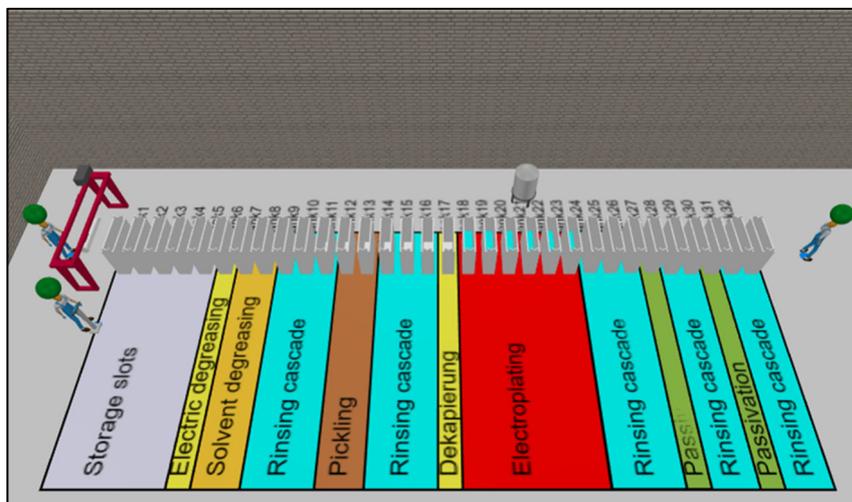


Abbildung 12: Überblick über Visualisierung eine Galvaniklinie [Lei19]

Grün zeigt eine unkritische Belastung deutlich unterhalb der Grenzwerte. Gelb zeigt eine Belastung nahe dem Grenzwert an, welche in der Praxis durch Modellabweichungen unter Umständen schon leicht überschritten werden können. Rot hingegen zeigt eine klare Grenzwertüberschreitung an und erfordert im Sinne des Risikomanagements ein Eingreifen.

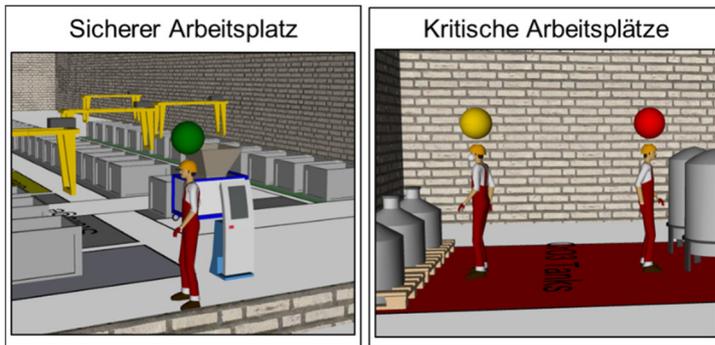


Abbildung 13: 3D Visualisierung einzelner Arbeitsplätze mit Anzeige der Mitarbeiterbelastung [Lei19]

Eine weitere integrierte 2D Visualisierungsmöglichkeit ist die Shopfloor Heatmap (siehe Abbildung 14). Hierbei werden die Wege der Arbeiter Visualisierung und Bereiche in denen sich besonders viele Mitarbeiter aufhalten erscheinen entsprechend rot. Es erfolgt hier jedoch noch keine Verbindung zu den Expositionsdaten, sodass diese Visualisierung weiterer Beurteilungsansätze benötigt werden.

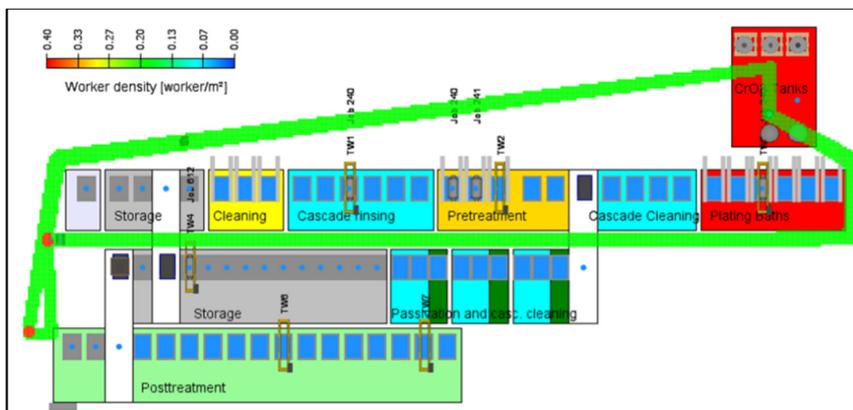
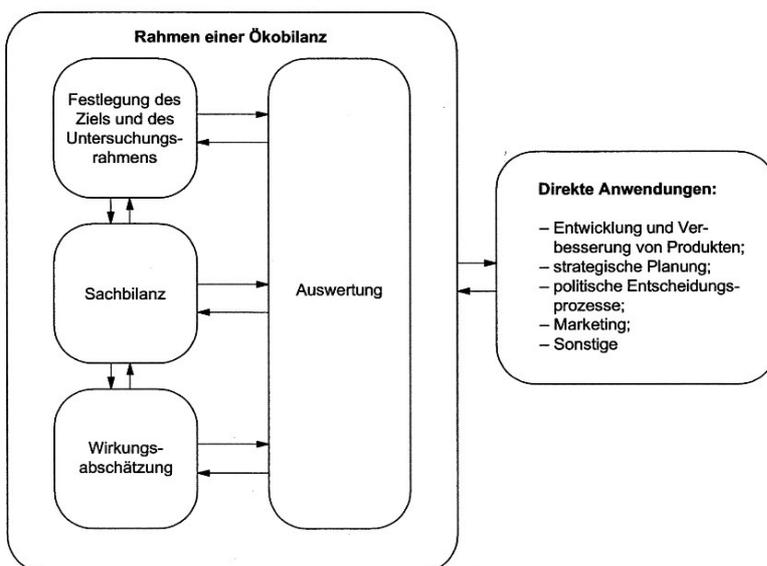


Abbildung 14: Shopfloor Heatmap für Mitarbeiterwege und -verteilung im Produktionsbereich [Lei19]

Bewertungsmodul für eine integrierte Umwelt-, Kosten- und Risikobewertung

Zur Umweltbewertung wird das grundsätzliche methodische Vorgehen aus der Ökobilanzierung angewendet [VI]. Die einzelnen Teilschritte sind in der Abbildung 15 zusehen. Die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens fand bereits in den vorherigen Arbeitspaketen statt und ergibt sich aus dem



Projektkontext. Durch den Fokus auf einzelne Betriebe werden die Bilanzgrenzen auf eine Gate-to-Gate Betrachtung festgelegt. Die funktionelle Einheit ergibt sich aus dem zu beschichtenden Teilespektrum und kann sowohl auf einem Teil/einen Warenträger als auch auf ein bestimmtes Produktionsprogramm gelegt werden. Ferner sind Teilbetrachtungen möglich welche sich z.B. auf einzelne Aggregate wie die Abluffeinrichtung der Anlage beziehen.

Abbildung 15: Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040

Das dynamische Simulationsmodell dient als Sachbilanzierungsmodell, welches die Stoff- und Energieströme in der Anlage abbildet. Die in diesem Modell ermittelten Energie- und Stoffströme werden mit ausgewählten Wirkungsindikatoren einzelnen Wirkungskategorien zugeordnet. Bei globalen Wirkungskategorien, wie ist eine direkte Verknüpfung mit Werten aus Datenbanken wie der Ecoinvent Datenbank möglich und sinnvoll. Ein prominentes Beispiel ist das globale Erderwärmungspotential, welche so mit hoher Zuverlässigkeit abgeschätzt werden kann. Lokale Umweltwirkungen durch den Eintrag von Chemikalien in die direkte Umwelt lassen sich deutlich schlechter abbilden, da hierzu bislang die Datenbasis nicht ausreichend war. Durch die Verbindung mit dem Chemikalienmanagement stehen jedoch nun auch Daten zu den Chemikalien Aerosolen zur Verfügung, sodass die Wirkungen auf die Mitarbeiter konkretisiert werden können.

Für die Kostenbewertung kann wieder das Stoffstrommodell genutzt werden und für die einzelnen Stoffströme können spezifische Kosten hinterlegt werden. Das Vorgehen hierzu erfolgt analog zu der Ökobilanzierung, sodass eine hoher Vergleichbarkeit gegeben ist.

Die Risikobewertung findet innerhalb der gleichen dynamischen Stoffstrombilanzierung statt. Die Aerosolbelastungen können für einzelne Mitarbeiter ausgegeben werden oder auch für bestimmte Tätigkeiten und Bereiche in dem Produktionsbetrieb.

Dadurch, dass alle drei Bewertungen im Rahmen einer Gesamtmodellierung erfolgen, lassen sich die Ergebnisse direkt vergleichen und integriert betrachten.

AP 3: Datenerhebung bei assoziierten Anwendungspartnern

1. Generelle Entwicklung von Risikodaten am Beispiel Verchromung

Zur Beurteilung des Bewertungsmaßstabs von Expositionsmessungen wurden vorliegende Werte der Betriebe der galvanischen Verchromung ausgewertet. Die zeitliche Entwicklung zeigt die nachfolgende Abbildung 16. Ausgewertet wurden 130 Datensätze von 62 Betrieben im Zeitraum 1990 bis 2007.

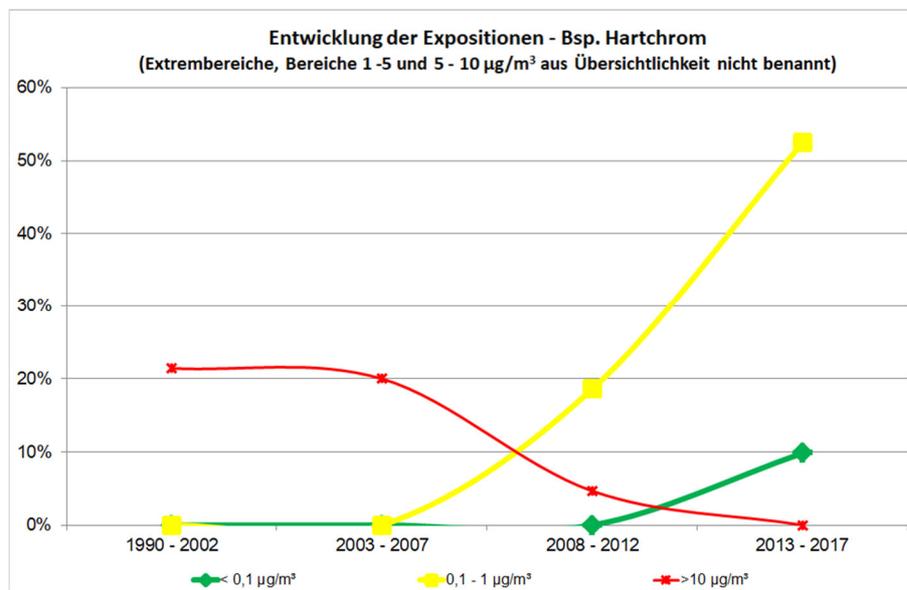


Abbildung 16: Entwicklung der betrieblichen Expositionen

Die Maßnahmen der Betriebe beruhen dabei auf den Erfahrungswerten anderer Betriebe und Empfehlungen der Aufsichtsbehörden. Gleichzeitig wurden die Messmethoden präziser, so dass es nur bedingt möglich ist, den Einfluss von getroffenen technischen Maßnahmen eindeutig zu benennen. Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass die Messungen nur an den Produktionsstandorten und nicht an anderen Stellen des Betriebes durchgeführt wurden.

Im Rahmen der Diskussionen über die Auswirkungen der Chemikaliensicherheit wurde die Notwendigkeit deutlich, die Messungen in unterschiedliche Szenarien zu erweitern. Hier wird auf die Entwicklungen der Anträge zur Autorisierung von Chromaten zurückgegriffen, im Wesentlichen auf die Ausarbeitungen des VECCO.

Die folgende Tabelle 1 zeigt die entwickelten, als typisch eingestuft Szenarien:

Arbeits-Szenario	Bezeichnung	Kategorie	Prozessbedingungen	Belastung
WCS1	Storage raw material	PROC 1	closed system	<30 min (weekly) - Persönliche Schutzausrüstung
WCS2	Transport	PROC 8b	closed container	<1h (5 days a week) - regular instructions
WCS3	Loading of jigs	PROC 4	Separated areas with own ventilation	<8h (daily) - operationg instructions
WCS4	Funktional plating - automatic line	PROC 2 PROC 3 PROC 4 PROC 13	General ventilation edge air extraction in both lines 100000 m3/h foam agents to minimize aerosoles	30min/day - strict separation of lounge and production
WCS5	Sampling	PROC 8b	edge extraction	<30min (daily)
WCS 6	Re-filling liquids	PROC 8b	edge extraction	<20min (daily)
WCS 7	Decanting solids	PROC 8b	edge extraction	<5min (weekly)
WCS 8	Re-filling solids	PROC 8b	edge extraction	<10min (weekly)
WCS 9	Regular maintenance	PROC 8b	edge extraction	<2h (weekly)
WCS 10	Rare maintenance	PROC 8b	edge extraction	<8h (year)
WCS11	Removing parts from bath	PROC 8b	edge extraction	<20 min(daily)
WCS12	Maintenance filter	PROC 8b	edge extraction	<30min (daily)
WCS13	Quality control	PROC 8b	edge extraction	<30min (weekly)
WCS14	etching - automatic line	PROC 2 PROC 3 PROC 4 PROC 13	General ventilation edge air extraction in both lines 100000 m3/h foam agents to minimize aerosoles	15min/day
WCS 15	Waste water management	PROC 8b	General ventilation	<30min (monthly)

Tabelle 1: Arbeitsszenarien einer galvanischen Anlage am Beispiel Verchromung

Chemical details		WCS 4 Hartverchromung	
	Chemical	Chromiumtrioxide	
	CAS No.	1333-82-0	
Scenarion Details		Risiko	Ressourceneffizienz
	Total duration (mins)	480	
	Nonexposure period (mins)	420	
Details for Activity			
	Emission sources:	near field (1m von Bad)	
	Duration (mins):	60	
Operational Conditions - Risiko			
Substance emission potential	Substance product type	Liquids	
	Dustiness		
	Moisture content		
	Powder weight fraction		Verbrauch
	Process temperature (K)	338	Temperatur
	Vapour pressure (Pa)	1,00E-05	
	Liquid weight fraction	0,2	Verbrauch
	Liquid matrix weight fraction		Verbrauch
Viscosity	Low		
Activity emission potential	Activity class	Activities with agitated surfaces	Strömungsprofil Luftreinblasung
	Situation	Open surface 1 - 3 m ²	Oberfläche Badvolumen
	Handling type		Organisation?
	Agitation level		Organisation?
	Containment level		
	Contamination level		
	Loading Type		
Surface contamination	Process fully enclosed?	No	
	Effective housekeeping practices?	Yes	
Dispersion	Work area	Indoors	
	Room size (m ³)	1000	
	ACH	3	
Operational Conditions - Ressourcen			
	Spülkriterium		
	Elektrodenmanagement		
	Art des Bauteils		
	zeitlicher Aufwand (Unterscheidet sich von Aufenthalt Person)		
	Energieaufwand		
	Chemikalienverbrauch / Abfall		
Risk Management Measures			
Localised controls	Primary	Fixed capturing hood (90.00 % reduction)	Lüftungsleistung
	Secondary	No localized controls (0.00 % reduction)	
	Segregation	No segregation (0.00 % reduction)	
	Personal enclosure	No personal enclosure (0.00 % reduction)	
Dispersion	Ventilation rate (air changes per hour (ACH))	3	Lüftungsleistung
Mechanistic model results			
Ergebnis ART	The predicted 90th percentile full-shift exposure is ... /µg/m ³	0,93	
	The inter-quartile confidence interval is from ... to .../µg/m ³	0,42 to 2,1	
Kontrollmessungen			
Results Ressourceneffizienz			
Indikatoren	Kosteneinsparung		
	CO2 Footprint		
	Materialverbrauch		
	Energieverbrauch		

Tabelle 2: Einflussnehmende technische Parameter

2. Datenerfassung und Auswertung Risikoanalyse

Zur weiteren Untersuchung wurden ausgewählt:

1. Konzentration
2. Temperatur
3. Absaugleistung
4. Stromdichte (nicht in ART, aber für Produktion wichtig)

Die gezielte Analyse der Daten zeigte, dass die einflussnehmenden Größen nicht eindeutig benennbar sind. Während die Simulation mit ART Tool eine mit der Konzentration zunehmende Exposition vorher-sagt zeigen die vorliegenden technischen Daten diesen Trend nicht (Abbildung 17).

Verwendet wurden die betrieblichen Daten für die Verchromung:

Prozess	Temp. / °C	Konzentration / g/l	Stromdichte / A/dm ²	Wirkungs-grad	Gasent-wicklung	Risiko durch Aerosole
Hart-verchromen	55 – 80	240 – 300 (13% - 16%)	40 – 50, teil-weise bis 100	<=30%	hoch	Hoch
Glanz-verchromen	40°C	380 – 430 (20% - 23%)	10 - 15	20 – 30%	geringer	Geringer

Tabelle 3: Technische Parameter Verchromung

Gleichzeitig ergibt die Modellierung mit dem ART Tool, dass kein Einfluss der Temperatur gegeben ist (Abb. 18). Dieses Ergebnis bestätigt, dass nur ein ganzheitliches Bild genutzt werden kann.

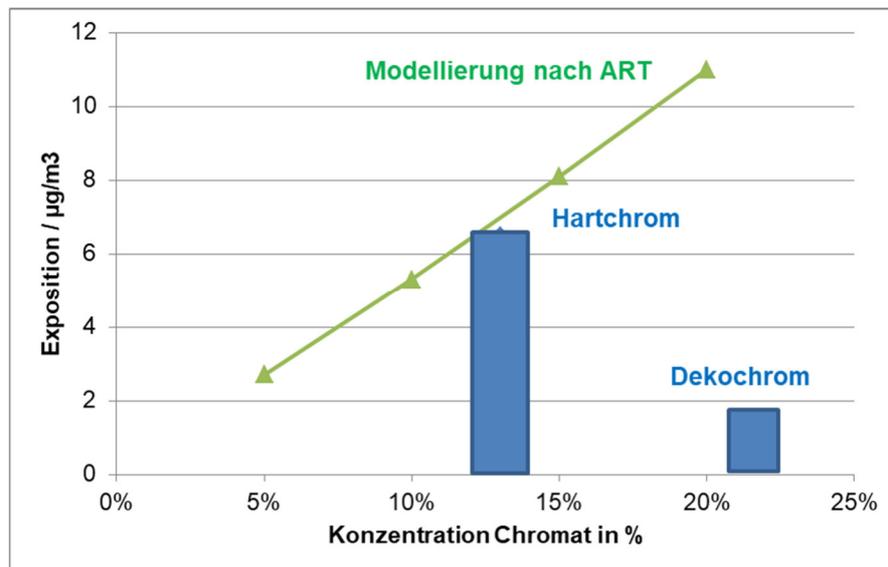


Abbildung 18:: Exposition in Abhängigkeit der Konzentration: Simuliert nach ART und technische Daten

Die erste Analyse zeigt bereits die Notwendigkeit, die Einzelprozesse gezielt zu untersuchen. Im vorliegenden Fall ist als letzter technischer Parameter die Stromdichte verblieben. Diese ist aber im Produktionsprozess abhängig von den Produkten und nur bedingt variierbar.

Um eine Verbindung mit den Ressourceneffizienzdaten zu erreichen wurde die Absaugleistung als handhabbares Kriterium gewählt. Es ist als Einzelkriterium unabhängig vom Produktionsprozess, beeinflusst aber die Risikodaten Umwelt und Exposition sowie die Nutzung der Ressourcen.

3. Datenerfassung und Auswertung zur Ressourceneffizienz

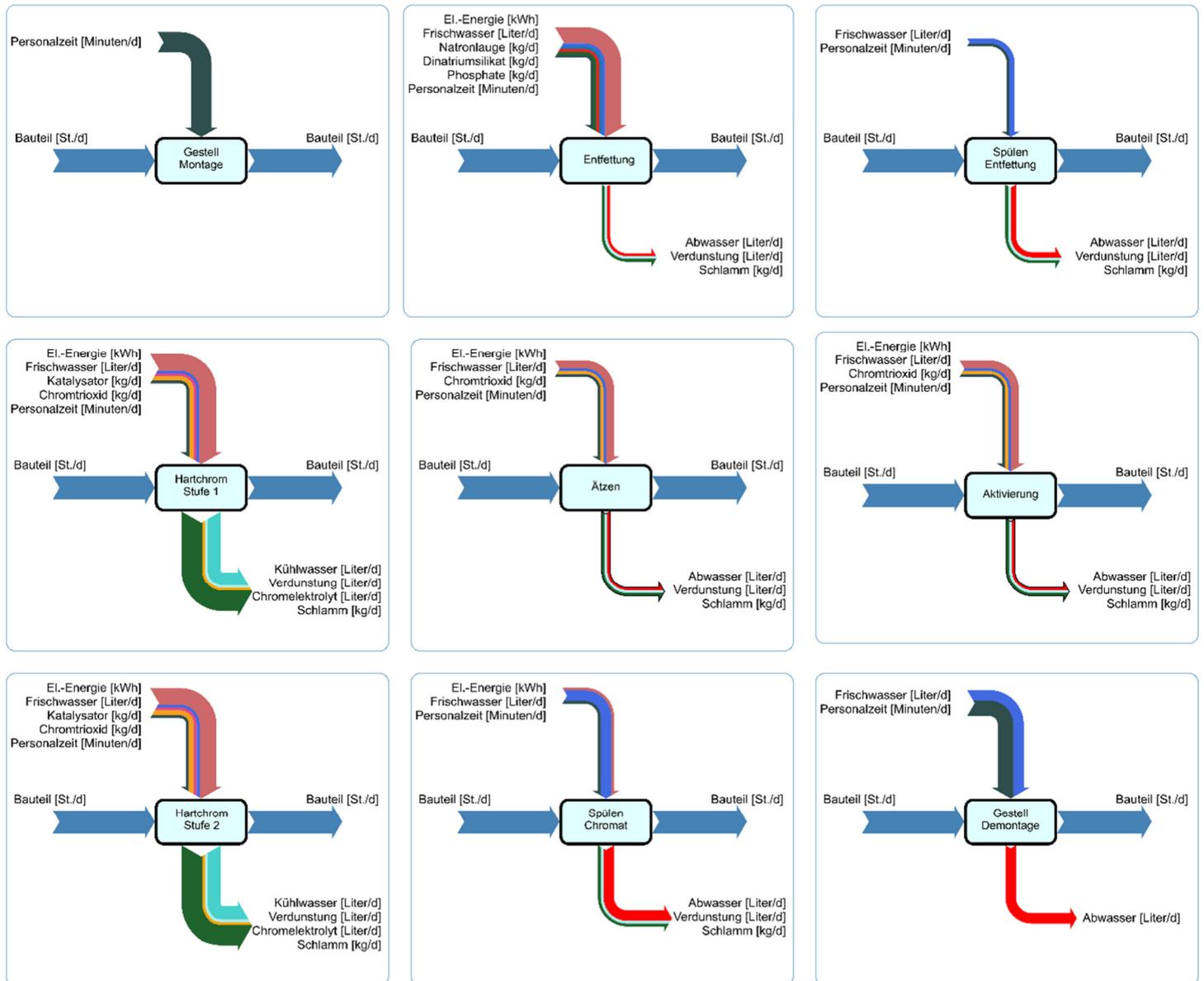
Die Erhebung von Daten bei assoziierten Anwendungspartnern musste während des laufenden Betriebes erfolgen. Die Datenerhebung für die Risikobewertung erfolgte hierbei bei Parameteränderungen nach Einstellung eines Gleichgewichtszustandes für die Luftkonzentrationen in der Umgebung. Für die Erhebung von Daten für die Ressourcenanalyse waren aufgrund der sich träge einstellenden Änderungen wesentlich längere Zeiträume anzusetzen. Ein direkter Vergleich ist daher nicht immer gegeben.

Ressourcen-Datenerhebung bei assoziierten Anwendungspartnern:

- Firmenprofil
 - Energieversorgung (Art, Menge, Preis)
 - Stromversorgung
 - Öl und Gas
 - Wasser
 - Materialeinkauf (Art, Menge, Preis)
 - Chemikalien
 - Anoden
 - Hilfsstoffe
- Produktionsdaten
 - Anlagen Design (Aufstellung, Fläche, Zuluft, Abluft)
 - Artikel Design (Form, Fläche, Gewicht, Funktion, Schichtenanforderungen)
 - Durchsatzmengen (pro Tag – pro Jahr)
 - Arbeitszeit (Tag, Jahr, Anzahl Schichten)
- Prozessdaten
 - Versorgungsprozesse
 - Kompressoren
 - Wärmeerzeugung
 - Kühlung
 - Entsorgungsprozesse
 - Abwasserbehandlung
 - Abluft (inklusive Wärmerückgewinnung)
 - Lage/Transport
 - Maschinendaten (Einzelprozesse)
 - Temperaturen
 - Mitarbeiter pro Anlage
 - Produktdurchsatz (Fläche, Gewicht)
 - Stand-by-Verbrauch (Energie, Druckluft)
 - Anfahrtszeit /Ausfahrtszeit
- Stoffströme (Einzelprozesse)
 - Ressourceneingänge
 - Rohprodukt
 - Strom, Gas, Druckluft, Kühlung, Wasser)
 - Materialeingang (Chemie, Anoden, Hilfsstoffe)
 - Personaleinsatz Prozess
 - Ressourcenausgänge
 - fertiges Produkt
 - Abfälle
 - Abwasser
 - Luftemissionen
 - Rückführung in Elektrolyt

Die Daten für Ressourcenflüsse sind in *Abbildung 19: Ressourcenflüsse bei der Hartverchromung* am Beispiel Hartverchromung dargestellt. Die Auswertung der Daten ergibt Grundlagen für Maßnahmen, mit denen Potenziale für Effizienzmaßnahmen aufgedeckt werden. Die Ressourcenflüsse sind für gleiche Einheiten proportional dargestellt.

Energie- / Materialflüsse Hartchrom



Legende

- █ Frischwasser [Liter/d]
- █ El.-Energie [kWh]
- █ Natronlauge [kg/d]
- █ Dinatriumsilikat [kg/d]
- █ Phosphate [kg/d]
- █ Chromtrioxid [kg/d]
- █ Katalysator [kg/d]
- █ Abwasser [Liter/d]
- █ Kühlwasser [Liter/d]
- █ Verdunstung [Liter/d]
- █ Schlamm [kg/d]
- █ Chromelektrolyt [Liter/d]
- █ Personalzeit [Minuten/d]

Abbildung 19: Ressourcenflüsse bei der Hartverchromung

4. Betriebliche Datenerfassung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde bei den assoziierten Anwendungspartner mit Hilfe des Datenerhebungsmodul die notwendigen Daten zu Modellierung der Zusammenhänge zwischen Energie- und Ressourceneffizienz sowie dem Risiko durch Cr(VI) Expositionen aufgenommen.

Zusätzlich wurden in Zusammenarbeit mit einem Messlabor bei zwei ausgewählten Betrieben bei spezifischen Szenarien mit variabler Abluftleistung und Stromstärke Luftproben über eine Stunde hinweg entnommen. Dabei wurden an zwei unterschiedlichen Orten zeitgleich Messungen durchgeführt. Hierdurch sollte die Aussagemöglichkeit der Ergebnisse bewertet werden.

Abbildung zeigt zunächst die Abhängigkeit der Exposition von der Stromstärke bei konstanter Absaugleistung, Konzentration und Temperatur. Das Ergebnis zeigt die dargestellte Abhängigkeit. Der Verlauf der Kurve selbst wird bestimmt durch die Art des Produktes. Erwartet wird hauptsächlich eine Abhängigkeit von der Geometrie.

Von wesentlicher Bedeutung für das weitere Vorgehen ist allerdings der Unterschied der beiden Kurven an den ausgewählten Messorten. Obwohl der grundsätzliche Verlauf innerhalb der Fehlergrenze als vergleichbar angesehen wird zeigt sich in den Absolutwerten ein deutlicher Unterschied. Es wird angenommen, dass die Strömungsverhältnisse außerhalb der Produktionslinie wesentlichen Einfluss haben auf die Datenerfassung.

Damit ist für die weitere Interpretation ein einzelner Wert nicht ausreichend aussagefähig. Für eine verlässliche Bewertung ist die Abhängigkeit der Exposition von den gewählten Parametern von Relevanz. Erst wenn diese dargestellt sind können die Kontrollmessungen bei den Betrieben gezielt durchgeführt werden.

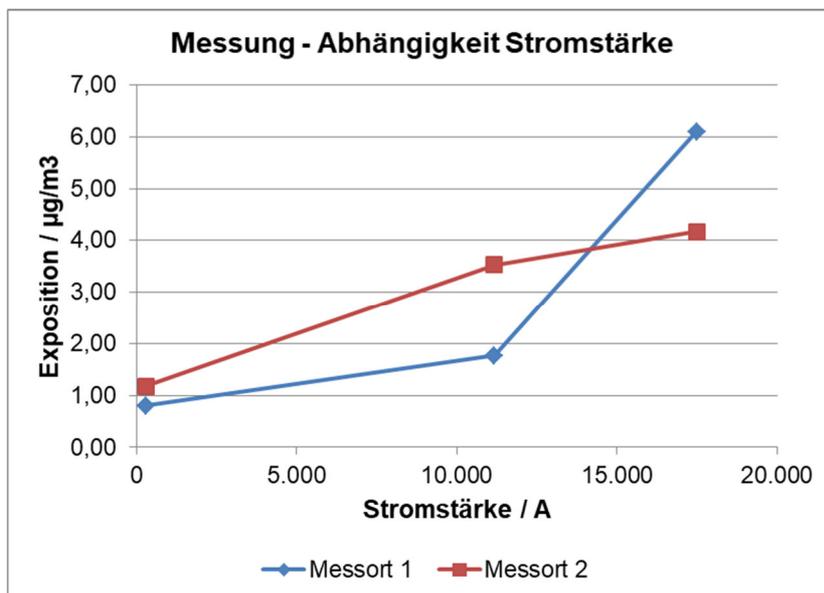


Abbildung 20: betriebliche Messung, Betrieb 1 - Abhängigkeit Exposition von Stromstärke

Die weitere Messreihe untersuchte gezielt die Abhängigkeit der Exposition von der Leistung der Absaugung entlang der Produktionslinien. Da deren Einstellung wesentlich den Energieverbrauch bestimmt kann hierdurch eine Bewertung der technischen Parameter hinsichtlich der Leistungsfähigkeit durchgeführt werden.

Ziel ist es, eine Exposition unterhalb der aktuellen Bemessungsgrenze von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu erreichen und gleichzeitig die Absaugleistung auf den geringst notwendigen Verbrauch einzustellen.

Die Experimente wurden bei beiden Betrieben bei bekannter Badkonzentration und –temperatur durchgeführt. Beide Betriebe nutzen allerdings unterschiedlich leistungsfähige Absauganlagen. Das Ergebnis ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Exposition nimmt bei beiden Betrieben mit zunehmender Absaugleistung exponentiell ab. Der grundsätzliche Verlauf ist vergleichbar.

Die Ergebnisse zeigen allerdings auch, dass die Absolutwerte unterschiedlich sind. Es wird erwartet, dass auch in diesem Fall die lokalen Bedingungen der Messorte wesentlich sind. Den größten Einfluss werden die lokalen Luftströme und –verwirbelungen haben.

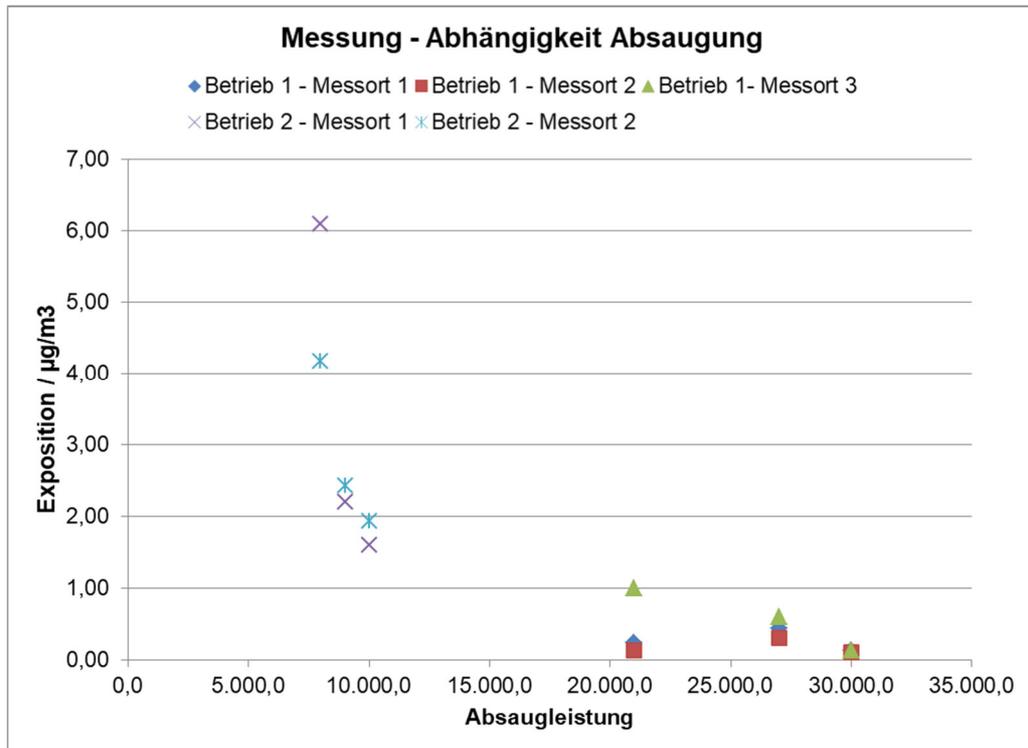


Abbildung 21: Betriebliche Messung, Betriebe 1 und 2 – Abhängigkeit der Exposition von der Leistung der Prozessbad-Absaugung

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass durch die Kenntnis des Verlaufes der Abhängigkeiten eine gezielte Steuerung der Absaugleistung möglich ist. Nach Erreichen eines stabilen Wertes ist keine wesentliche Verringerung der Exposition mit bei weiterer Steigerung der Absaugleistung mehr zu erwarten, sondern erhöht im Wesentlichen nur den elektrischen Leistungsbedarf. Die Anwendbarkeit dieser Annahme muss mit Kontrollmessungen überprüft werden, die aber bei Kenntnis der Abhängigkeiten gezielt durchgeführt werden können.

Die Messungen haben ebenfalls gezeigt, dass beim Unterschreiten einer Mindestleistung für die Abluft die Belastung in der Umgebungsluft je nach örtlichen Gegebenheiten unterschiedlich stark ansteigen. Die Einflussgrößen hierfür sind unter anderem:

- Kennfelder der Ventilatoren
- Druckverlust in der Abluftanlage bis zur Entnahmestelle bei unterschiedlichen Durchflussgeschwindigkeiten (Durchmesser Rohrleitung, eingebaute Winkel, Einbauten für Tropfenabscheidung)
- Ein- und Ausfahren von Ware im Elektrolyten
- Überfahren des Bades durch einen Transportwagen
- Unterschiedliche Stromstärken bezogen auf die Badoberfläche
- Unterschiedliche Elektrolytbewegung
- Unterschiedliche Schaumbildung durch Zugabe von Netzmittel zum Elektrolyten.

AP4: Modellierung einer spezifischen Prozesskette

Eine Galvaniklinie besteht aus hintereinandergeschalteten Becken, welche verschiedene Prozess- und Spülmedien für die Beschichtung von Werkstücken beinhalten. Begonnen wird mit Reinigungs/Entfettungsprozessen, welche die Werkstücke auf die folgende eigentliche Beschichtung vorbereiten. Je nach Prozess erfolgt noch ein Beiz- und Neutralisationsschritt. Zwischen den einzelnen Prozessschritten durchlaufen die Werkstücke eine ein- oder mehrstufige Spüle, um die Verschleppung zwischen den Prozessbädern zu verringern. Die eigentlichen Beschichtungsbäder folgen nun und tragen über Stromdurchflossene Anoden die Beschichtung durch den Elektrolyten auf die Bauteile. Dieser Prozess ist der zeit- und ressourcenintensivste Schritt in der gesamten Prozesskette. Nach der Beschichtung werden die Bauteile wieder gespült und je nach Anwendung nachbehandelt, z.B. mittels einer Passivierung. Final erfolgt das Entladen durch die Werker.

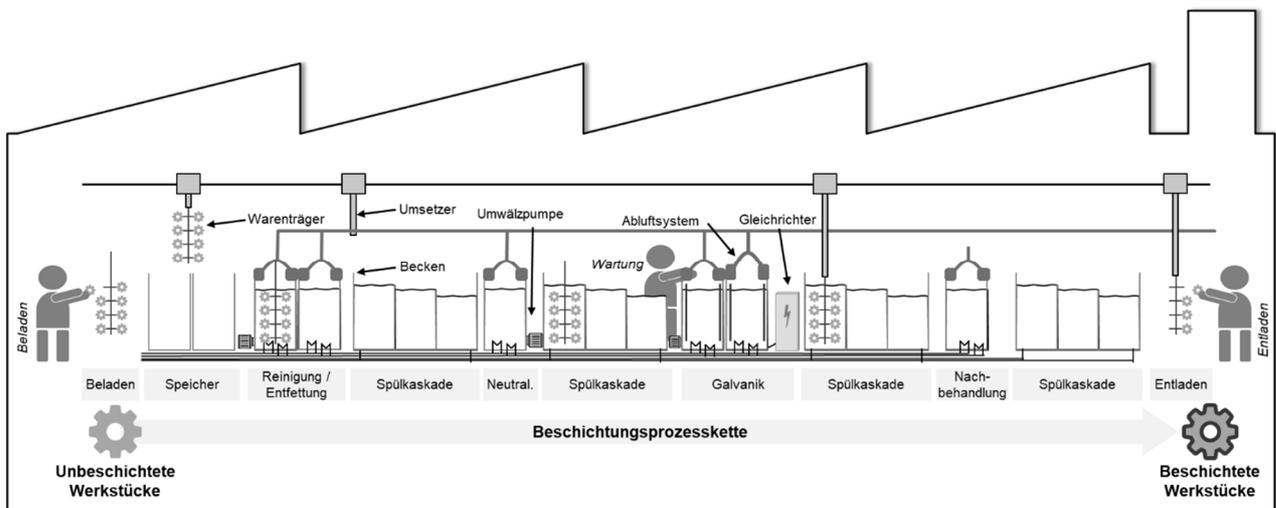


Abbildung 22: Elemente einer Galvaniklinie

Mit Hilfe der entwickelten Gesamtmethodik wurde ein parametrisiertes Gesamtmodell für eine kombinierte Nickel/Chrom Galvanoprozesskette aufgestellt (siehe Abbildung 23). Diese ermöglicht die Abbildung von spezifischen dekorativen Chrombeschichtungsprozessketten und von Hartchromschichten. Die beiden Prozessketten unterscheiden sich im Wesentlichen nur durch unterschiedliche Prozessparameter und Verweilzeiten in einzelnen Beschichtungsbädern. Grundlage für die Entwicklung dieser Prozesskette sind die von den assoziierten Anwendungspartner vertraulich zur Verfügung gestellten Prozesskettenlayouts. Obwohl diese für verschiedenste Bauteile ausgelegt sind weisen sie alle eine sehr hohe Überdeckung im grundsätzlichen Aufbau und lassen sich gut mit Hilfe einer generischen Prozesskette für die kombinierte Nickel- und Chromgalvanik beschreiben.

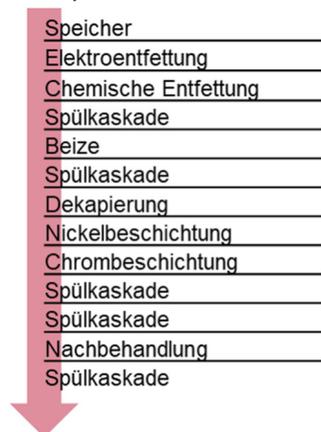


Abbildung 23: Beckenanordnung der generischen Prozesskette für die kombinierte Nickel/Chromgalvanik

Vorteil der Verwendung einer allgemeingültigen spezifischen Prozessketten für die kombinierte Nickel/Chromgalvanik ist die deutlich einfachere Anwendbarkeit als eine stete erneute Modellbildung für jede spezifische Prozesskette. Mit Hilfe des Datenerhebungsmodul lässt sich somit jede kombinierte Nickel/Chromgalvanik oder auch nur eine Nickel bzw. Chromgalvanik parametrieren. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Anlagenbetreiber sein spezifisches Prozesskettenlayout nicht veröffentlichen muss, welches als Teil des Betriebsgeheimnis zu sehen ist.

In Tabelle 4 ist der generische Standardablauf in der Galvanoprozesskette beschrieben. Mit dem Ablauf lassen sich alle dekorativen Chrombeschichtungen und Hartchrombeschichtungen beschreiben. Nach einer Vorbehandlung bestehend aus einer chemischen und elektrolytischen Entfettung sowie einer Beize, folgt der Auftrag der Nickel und der Chromschicht. Nach jedem Prozessschritt werden die Bauteile in einer bis zu dreistufigen Spülkaskade gereinigt.

Becken	Kurzbeschreibung
Beladestation	Beladung der Warenträger
Speicher 1	Speicherstation zur Zwischenlagerung von freien / belegten Warenträgern
Chem. Entfettung	Chemische Entfettung ohne Einsatz von Strom
Spülkaskade 1	1. Spülstufe nach chemischer Entfettung
Spülkaskade 1	2. Spülstufe nach chemischer Entfettung
Spülkaskade 1	3. Spülstufe nach chemischer Entfettung
Elektroentfettung	Elektrolytische Entfettung mit Strom
Spülkaskade 1	1. Spülstufe nach elektrolytischer Entfettung
Spülkaskade 1	2. Spülstufe nach elektrolytischer Entfettung
Spülkaskade 1	3. Spülstufe nach elektrolytischer Entfettung
Beize	Beizbad
Spülkaskade 2	1. Spülstufe nach Beize
Spülkaskade 2	2. Spülstufe nach Beize
Spülkaskade 2	3. Spülstufe nach Beize
Galvanik Ni	Galvanischer Nickelbeschichtungsprozess
Spülkaskade 3	1. Spülstufe nach Nickelbeschichtung
Spülkaskade 3	2. Spülstufe nach Nickelbeschichtung
Spülkaskade 3	3. Spülstufe nach Nickelbeschichtung
Galvanik Cr	Galvanischer Chrombeschichtungsprozess
Spülkaskade 4	1. Spülstufe nach Chrombeschichtung
Spülkaskade 4	2. Spülstufe nach Chrombeschichtung
Spülkaskade 4	3. Spülstufe nach Chrombeschichtung
Entladestation	Entladen der Bauteile
Speicher 1	Speicherstation zur Zwischenlagerung von freien / belegten Warenträgern

Tabelle 4: Generisches Produktionsprogramm mit Beckenkonfiguration

AP5: Bewertung von realen und alternativen Produktionsszenarien

Entwicklung von realen und alternativen Produktionsszenarien

Es wurden vier Produktionsszenarien entwickelt, welche die Bandbreite an typischen Prozessen in der Chromgalvanik abbilden. Alle diese Produktionsszenarien können in der zuvor entwickelten Prozesskettensimulation abgebildet werden. Ebenfalls möglich ist es alle Produktionsszenarien in der gleichen Anlage anzuwenden durch eine entsprechende Variation der Gestelle / Bestückung.

In der Tabelle 5 sind die verschiedenen Produktionsszenarien zusammengefasst. Als Grundlage für dekorative Chromschichten auf Kunststoffen dienen ein generischer Würfel mit der Kantenlänge 30 mm und ein Automobilisten Logo am Beispiel des Mercedes Sterns. Größere Teile werden durch Stuhlgestelle für die Möbelindustrie repräsentiert, welche ebenfalls mit einer dekorativen Chromschicht überzogen werden. Für alle dekorativen Chromschichten wird eine Nickelschicht als Grundlage aufgebracht. Als Beispiel für einen Hartverchromungsprozess wird ein Ventilstößel aus dem Automobilbau verwendet, welcher mit einer 10 µm Hartchromschicht überzogen wird.

	<i>Würfel</i>	<i>Mercedes Stern</i>	<i>Stuhlgestell</i>	<i>Ventilstößel</i>
<i>Grundmaterial</i>	Cf53	ABS	Cf53	42CrMo4
<i>Nickel Schicht [µm]</i>	12	20	8	-
<i>Chrom Schicht [µm]</i>	0,5	1	0,3	10
<i>Oberfläche [mm²]</i>	5.400	25.120	3.074.000	1.570
<i>Gewicht</i>	208	66		
<i>Anzahl pro Gestell</i>	66	40	3	200

Tabelle 5: Produkte für Produktionsszenarien

Ökonomische und ökologische Bewertung

Das Datenerhebungsmodul ermöglicht eine detaillierte Parametrierung aller Becken an Hand der drei Zustände:

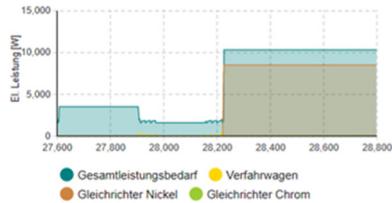
- Standby – leer
- Standby – belegt
- Im Betrieb

Im Rahmen der Vorgängerprojekte hat sich eine solche zustandsabhängige Parametrierung als ausreichend erwiesen und sie ermöglicht eine einfache messtechnische Erfassung der benötigten Parameter. Eine Ausnahme stellt der Leistungsbedarf für die Gleichrichter dar, welcher den Gesamtleistungsbedarf der Prozesskette maßgeblich bestimmt. Für diesen ist es erforderlich die benötigte Leistung mittels der Prozessparameter zu berechnen. Daher werden diese mit dem Datenerhebungsmodul abgefragt und in der dynamischen Simulation zur Berechnung des Leistungsbedarfs berücksichtigt.

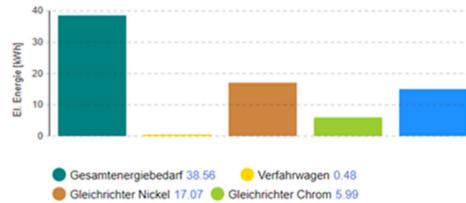
Für die vier entwickelten Produktionsszenarien wurde die Prozesskette entsprechend parametrierung und der Leistungsbedarf über eine Schicht von 8 Stunden berechnen. In Abbildung 24 sind die Ergebnisse aus der Berechnung des Leistungsbedarf gezeigt.

Dekochrom - Würfel

Aktueller Leistungsbedarf



Kumulierter Strombedarf nach Aggregat

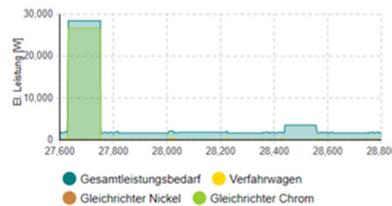


Strombedarf pro Charge

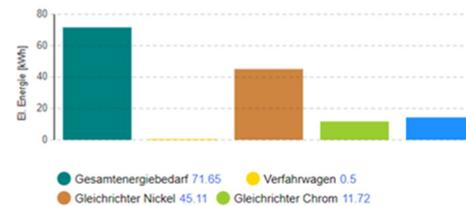


Dekochrom - Mercedesst.

Aktueller Leistungsbedarf



Kumulierter Strombedarf nach Aggregat

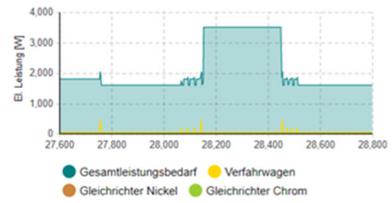


Strombedarf pro Charge

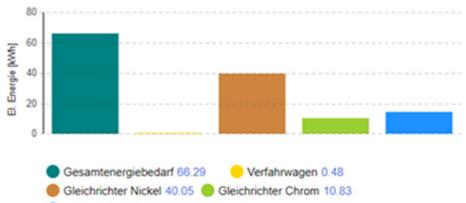


Dekochrom - Stühle

Aktueller Leistungsbedarf



Kumulierter Strombedarf nach Aggregat

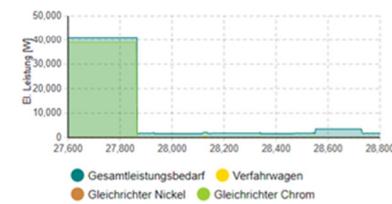


Strombedarf pro Charge

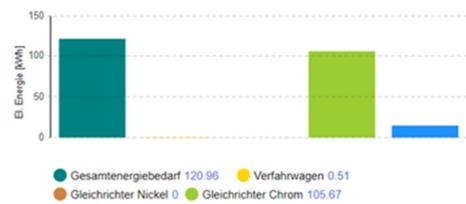


Hartchrom - Ventilstößel

Aktueller Leistungsbedarf



Kumulierter Strombedarf nach Aggregat



Strombedarf pro Charge



Abbildung 24: Ergebnisvisualisierung in der entwickelten Applikation

Auffällig ist, dass trotz des höheren spezifischen Leistungsbedarf der Gleichrichter für den Verchromungsprozess diese in Summe oft deutlich weniger relevant für den Gesamtenergiebedarf sind. Grund hierfür ist die geringe Chromschichtdicke im Vergleich zu den Nickelschichten.

Kombinierte Betrachtung von Ressourceneffizienz und Risiko am Beispiel des Chrom(VI)-Elektrolyten

Alle betrachtete Produktionsszenarien haben gemeinsam, dass sie einen Chrom(VI)-Elektrolyten zur Abscheidung des Chroms einsetzen. Chromtrioxid steht z.Z. unter besonderer Beobachtung der nationalen und europäischen Behörden und eignet sich auch aufgrund seiner hohen Giftigkeit gut, um Auswirkungen auf die Ressourceneffizienz und die Mitarbeiterbelastung im Betrieb abzuschätzen, vergleiche Abbildung 25.



Abbildung 25: Entwicklung der modellierten Cr(VI) Konzentration im Elektrolyten und der Mitarbeiterbelastung bei verschiedenen Bauteilen und Fluidgeschwindigkeiten

Ein entscheidender Einflussfaktor ist die Cr(VI) Konzentration im Elektrolyten. Damit und sowie einigen weiteren Prozessparametern lässt sich die Luftkonzentration mit Hilfe der Surrogatmodelle näherungsweise gut abschätzen. Diese stellen wiederum die Basis für die Abschätzung der Mitarbeiterbelastung bei bestimmten Aufgaben dar. Wesentlichen Einfluss auf die Ressourceneffizienz hat die verschleppte Elektrolytmenge. Daher wurde ein Kategorisierungsansatz gewählt, um die Verschleppung zu berechnen. Dieser wurde bereits in einem Vorprojekt erfolgreich validiert und hier eingesetzt zur Berechnung der Verschleppung. In Abbildung 25 ist der Cr(VI) Konzentrationsverlauf im Elektrolyten dargestellt, unter der Bedingung, dass lediglich so viel Cr(VI) nachgegeben wird, um das elektrochemisch abgebaute Cr(VI) zu ersetzen.

Insbesondere bei den stark verschleppenden Stuhlgestellen kommt es zu einer merklichen Abnahme der Cr(VI) Konzentration. Insbesondere zum Ende hin mit Cr(VI) Konzentrationen nahe von 20 g/l bessert sich jedoch deutlich die Expositionssituation bei den Mitarbeitern. Zwar liegen die Werte im Falle eines bewegten Fluids immer noch außerhalb der gesetzlichen Grenzwerte, jedoch nähern sie sich diesen an. Wenn der Elektrolyt nicht in Bewegung ist, sind die modellierten Emissionswerte deutlich unterhalb der Grenzwerte. In jedem Fall sind Atemschutzmaßnahmen bei Arbeiten an stark bewegtem Elektrolyten notwendig.

Zu beachten ist jedoch, dass diese Werte nur gelten, wenn in den entsprechenden Becken aktiv Schichten abgeschieden werden und die Oberfläche der Elektrolyten entsprechend stark in Bewegung ist. Falls diese gerade nicht aktiv arbeiten und die Oberfläche sich nicht bewegt liegen die Werte erheblich unter den Grenzwerten (siehe auch Abbildung 11).

Kombinierte Betrachtung der Spülen

Durch das Ressourcenstrommodell lassen sich die benötigten Spülwassermengen für verschiedene Spülkriterien berechnen. Zur Risikobewertung werden für den Spülprozess wieder Surrogat Modelle aus dem ART Tools heraus entwickelt. Die nachfolgende Tabelle beschreibt die Möglichkeit das entsprechende Surrogat Modell zu erstellen. Als Parameter ist das „Contamination level“ geeignet, womit die Belastung der kontaminierten Oberfläche beschrieben werden kann. Der Parameter nimmt mit zunehmendem Spülprozess ab.

Chemical details		Spülen	
	Chemical	Chromiumtrioxide	
	CAS No.	1333-82-0	
Scenarion Details		Risk	Resource efficiency
	Total duration (mins)	480	
	Nonexposure period (mins)	420	
Details for Activity			
	Emission sources:	near field (1m von Bad)	
	Duration (mins):	60	
Operational Conditions - Risiko			
Substance emission potential	Substance product type	Liquids	
	Dustiness		
	Moisture content		
	Powder weight fraction		
	Process temperature (K)	Room temperatur	
	Vapour pressure (Pa)	1,00E-05	
	Liquid weight fraction	0,15	
	Liquid matrix weight fraction		
	Viscosity	Low	
Activity emission potential	Activity class	Handling of contaminated objects	
	Situation	Activities with treated/contaminated objects (surface 0.3-1 m ²)	
	Handling type		
	Agitation level		
	Containment level		
	Contamination level	Contamination < 10 % surface	
	Loading Type		

Surface contamination	Process fully enclosed?	No	
	Effective housekeeping practices in place?	Yes	
Dispersion	Work area	Indoors	
	Room size (m ³)	1000	

Tabelle 6: Einstellungen im ART Tool

Eine erste Auswertung ist in Abbildung 26 dargestellt. Das ungespülte Teil beginnt den Prozess bei einer Kontamination von 100%. Mit zunehmendem Spülprozess nimmt der Anteil der kontaminierten Oberfläche aber und damit auch die Exposition.

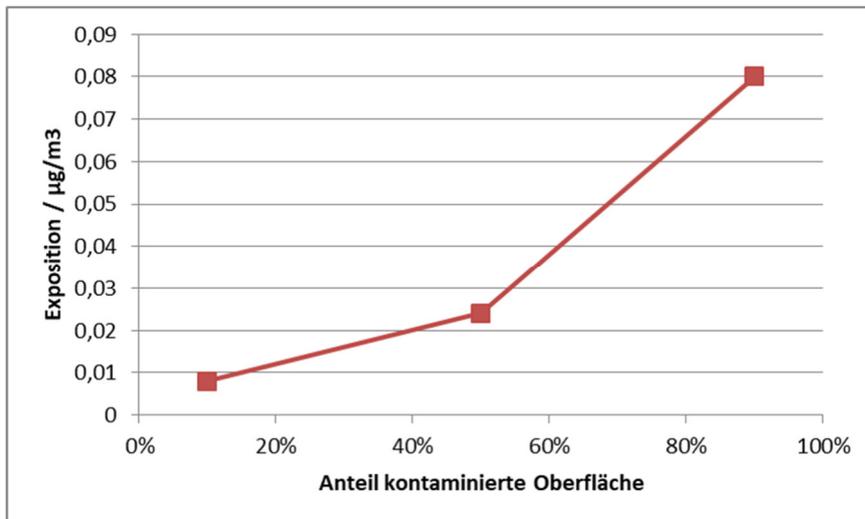


Abbildung 26: Spüleffekt modelliert mit ART: Exposition in Abhängigkeit von der kontaminierten Oberfläche

Die Umsetzung in ein Spülkriterium ist in Abbildung 27 gezeigt. Dabei wird das Spülkriterium aus der Anfangskonzentration entwickelt, bei der die Oberflächenkontamination 100% beträgt. Parallel zur Abnahme der Oberflächenkontamination nimmt die Konzentration in der Spüllösung ab. Die Abbildung zeigt eine exponentielle Abnahme. Bereits nach der ersten Spülung ist das Risiko deutlich minimiert.

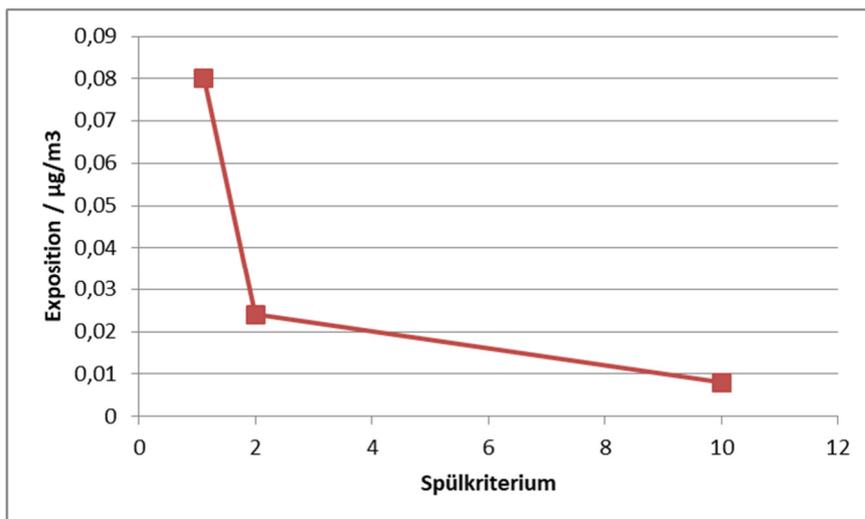


Abbildung 27: Spüleffekt modelliert mit ART: Exposition in Abhängigkeit vom Spüleffekt.

Handlungsempfehlungen zu Ressourceneffizienz und Risikomanagement am Beispiel der Hartverchromung

Die vorstehend skizzierten Auswertungen haben gezeigt, dass alle betrachteten Parameter Einflüsse sowohl auf die Ressourceneffizienz haben als auch auf das Risiko für die Mitarbeiter, die mit Gefahrstoffen in Kontakt kommen. Nachfolgend sind exemplarisch die Auswirkungen wesentlicher technischer Maßnahmen qualitativ dargestellt (eine quantitative Darstellung ist an dieser Stelle wegen der Vertraulichkeit der Daten nicht möglich). Beispiel Maßnahmen zur Prozessoptimierung waren:

- **Erhöhung der Elektrolytkonzentration**

Durch die höhere Konzentration hat der Elektrolyt eine höhere Leitfähigkeit; dadurch ist für die Erreichung der erforderlichen Stromdichte eine geringere Spannung notwendig. Dies reduziert den Strombedarf und in geringerem Maß die erforderliche Kühlleistung. Daraus ergeben sich Einsparungen beim Energieverbrauch.

Andererseits führt die Erhöhung der Konzentration im Elektrolyten auch zu einer Erhöhung der Cr(VI) Konzentration in den erzeugten Aerosolen und erhöht somit prinzipiell das Gefährdungspotenzial für die Mitarbeiter. Auch der Chemikalienverbrauch steigt an, dies kann jedoch durch Maßnahmen zur Rückführung der Verschleppungen kompensiert werden.

- **Erhöhung der Badtemperatur**

Eine Erhöhung der Badtemperatur führt zwar zu einem höheren Energiebedarf für die Badheizung aufgrund der erhöhten Verdunstung. Durch die erhöhte Verdunstung kann jedoch eine höhere Rückführung für verschleppten Elektrolyt erfolgen. Zudem reduziert dies den Kühlbedarf bei hochbelasteten Elektrolyten. Die Gesamtressourcenbilanz ist positiv; gleichzeitig hat die Maßnahme keine signifikante Auswirkung auf das Risiko, da die Aerosolbildung kaum temperaturabhängig ist.

- **Reduzierung der Abluftleistung**

Entsprechend der bei Erhöhung der Absaugung festgestellten exponentiellen Reduktion der Schadstoffbelastung in der Umgebungsluft ist für die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte häufig eine deutlich geringere Ventilatorleistung ausreichend, als üblicherweise eingestellt, ohne dass das Risiko für die Mitarbeiter zunimmt. Die Gesetzmäßigkeiten hierfür sind in der Regel spezifisch für ein Abluftsystem und müssen im Einzelfall ermittelt werden.

Hierdurch ergibt sich ein deutlich geringerer Energieverbrauch für die Ventilatoren und in der kalten Jahreszeit zusätzlich eine Reduzierung der Heizleistung für Zuluft, da die zu ersetzende Abluftmenge geringer ist.

- **Erhöhung der Stromstärke**

Die Erhöhung der Stromstärke führt zu einer Erhöhung der Abscheidegeschwindigkeit und damit zu einem höheren Warendurchsatz; die Ressourceneffizienz je produziertes Teil wird dadurch in der Regel insgesamt positiv beeinflusst.

Allerdings steigt durch die Erhöhung der Stromstärke der Strombedarf für die Gleichrichter und gegebenenfalls ist eine höhere Kühlleistung erforderlich. Gleichzeitig steigt durch die stärkere Agitation des Prozessbads die Aerosolbildung und somit das Expositionsrisiko der Mitarbeiter. Der Unternehmer muss zwischen diesen gegenläufigen Zielen abwägen; dabei kann das entwickelte Tool die Entscheidungssituation transparent machen.

- **Erhöhung des Spülkriteriums**

Die Erhöhung des Spülkriteriums im letzten Spülbad reduziert die Kontamination der Oberfläche der Bauteile, welche im letzten Arbeitsschritt vom Gestell demontiert werden müssen. Dadurch wird das Expositionsrisiko für die Mitarbeiter deutlich herabgesetzt.

Bei einem gegebenen Spülsystem in einem Betrieb kann dies nur durch eine Erhöhung der Spülwassermenge erreicht werden. Durch eine Erhöhung der Anzahl der Spülstufen und einer eventuellen Umstellung auf Kaskadenspülen kann dieser Mehrverbrauch reduziert werden.

Diese Beispiele aus den untersuchten Betrieben zeigen deutlich, dass mithilfe des entwickelten Tools die Auswirkungen unterschiedlicher Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt und bewertet werden können; tatsächlich ist auch eine quantitative Bewertung möglich. Dabei ist zu erkennen, dass Ressourceneffizienz und Risiko teilweise gegenteilig beeinflusst werden. Dies macht vor allem bei Maßnahmen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz eine intensive Betrachtung des Risikos erforderlich, um gegebenenfalls Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos mit durchzuführen und dies auch in der Ressourcenkostenberechnung mit zu berücksichtigen.

Dabei ist zu beachten, dass technische Veränderungen zur Verbesserung des Risikomanagements nicht aufgrund von Einzelmessungen bewertet werden können, sondern laufende Kontrollmessungen erfordern. Um dies gezielt durchführen zu können, ist die Kenntnis der Abhängigkeit des Risikos von den variablen, zu ändernden Parametern erforderlich. Diese sind mithilfe des Tools darstellbar.

AP6: Ergebnistransfer

Die Auswirkungen von Optimierungsmaßnahmen wie vorstehend diskutiert sind sehr stark abhängig vom jeweils betrachteten Beschichtungsprozess und selbst von der Art der beschichteten Produkte, vergleiche z. B. stark schöpfende Teile, bei denen die Elektrolytverschleppung und Aerosolbildung deutlich erhöht sind.

Bei der Entwicklung der Software-Lösung wurde deshalb besonders darauf geachtet, dass diese sich durch ihren generischen Aufbau leicht an andere Produktionsbetriebe der nasschemischen Oberflächentechnik und deren Produktionsprogramme anpassen lässt. Durch die Visualisierung der Ergebnisse im Rechen-Tool kann der Anwender dabei leicht erkennen, welche Auswirkungen Parameteränderungen im digitalen Zwilling haben und ist damit in der Lage Optimierungen „im Trockenen“ durchzuführen bevor in den laufenden Betrieb eingreift.

Durch die einfache Handhabung der Software in Kombination lassen mit einer begleitenden Beratung sich durch kombinierte Optimierung von Ressourceneffizienz und Chemikalienmanagement erhebliche Potentiale in beiden Bereich für die betroffenen Unternehmen heben. Durch den hohen Handlungsdruck im Bereich des Chemikalienmanagements steht in den Betrieben das Thema zwangsläufig auf der Agenda. Durch die Kombination der beiden Thematiken lassen sich die Ressourceneffizienz Beratungen deutlich günstiger anbieten, da viele Parameter nur einmal erfasst werden müssen.

Durch eine Erhöhung der Transparenz bezüglich der Energie- und Ressourcenströme sowie beim Chemikalienmanagement trägt die Entwicklung weiterhin dazu bei, Entscheidungen für Maßnahmen zu priorisieren und insbesondere effektive Maßnahmen deutlich zu beschleunigen.

Im Arbeitspaket wurden neben dem generischen Softwareaufbau und der Herausarbeitung der vorstehenden Nutzenargumente auch Maßnahmen für die Verbreitung der Ergebnisse vorbereitet (vgl. Kap. 4.4) und eine Planung für die wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse durch eiffo eG erarbeitet (vgl. Kap. 4.3, hier ökonomische Bewertung der Ergebnisse).

4.2 Diskussion der Ergebnisse und der Zielerreichung

Die in Kap. 3 detaillierten Ziele des Vorhabens konnten mit dem jetzt entstandenen Software-Tool vollständig erreicht werden. Dies wurde in 4.1 nachvollziehbar dargelegt und ist im folgenden Kapitel mit der Bewertung der Vorhabensergebnisse nochmals zusammengefasst. Siehe hierzu auch die Übersicht zur entwickelten Gesamtmethodik in Abbildung 28 unten.

Insgesamt konnte wie geplant eine funktionsfähige und praxisnahe Software zur integrierten Optimierung von Ressourceneffizienzanalysen und Chemikalienmanagement in der Oberflächentechnik entwickelt werden, welche die in Kap. 3. formulierten Anforderungen voll erfüllt.

Erhebliche Abweichungen von der Projektplanung ergaben sich jedoch im Projektablauf. Zunächst ergab sich in der Bearbeitung von Arbeitspaket AP2 die Notwendigkeit, die Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Energie- und Stoffströmen einerseits und Mitarbeiterbelastungen andererseits erheblich zu erweitern (vgl. hierzu die umfangreichen Arbeiten in AP1 „Spezifizierung“ und AP2 „Methodenentwicklung“). Hier war insbesondere erheblicher zusätzlicher Aufwand beim Abgleich zwischen definierten Arbeitsszenarien und Ressourcendaten erforderlich, um die für die Modellbildung erforderlichen Wechselbeziehungen darstellen zu können. Hierdurch verzögerten sich nachfolgende Arbeiten, insbesondere die Datenerhebung in AP3, so dass zunächst eine dreimonatige Projektverlängerung bis Ende März 2020 beantragt wurde.

Aufgrund der Coronavirus-Krise musste dann die Datenerhebung in den Unternehmen nochmals verschoben werden, so dass eine nochmalige Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 30.06.2020 beantragt und seitens DBU bewilligt wurde. Bis Ende Juni 2020 konnten dann schließlich alle Arbeiten erfolgreich abgeschlossen werden.

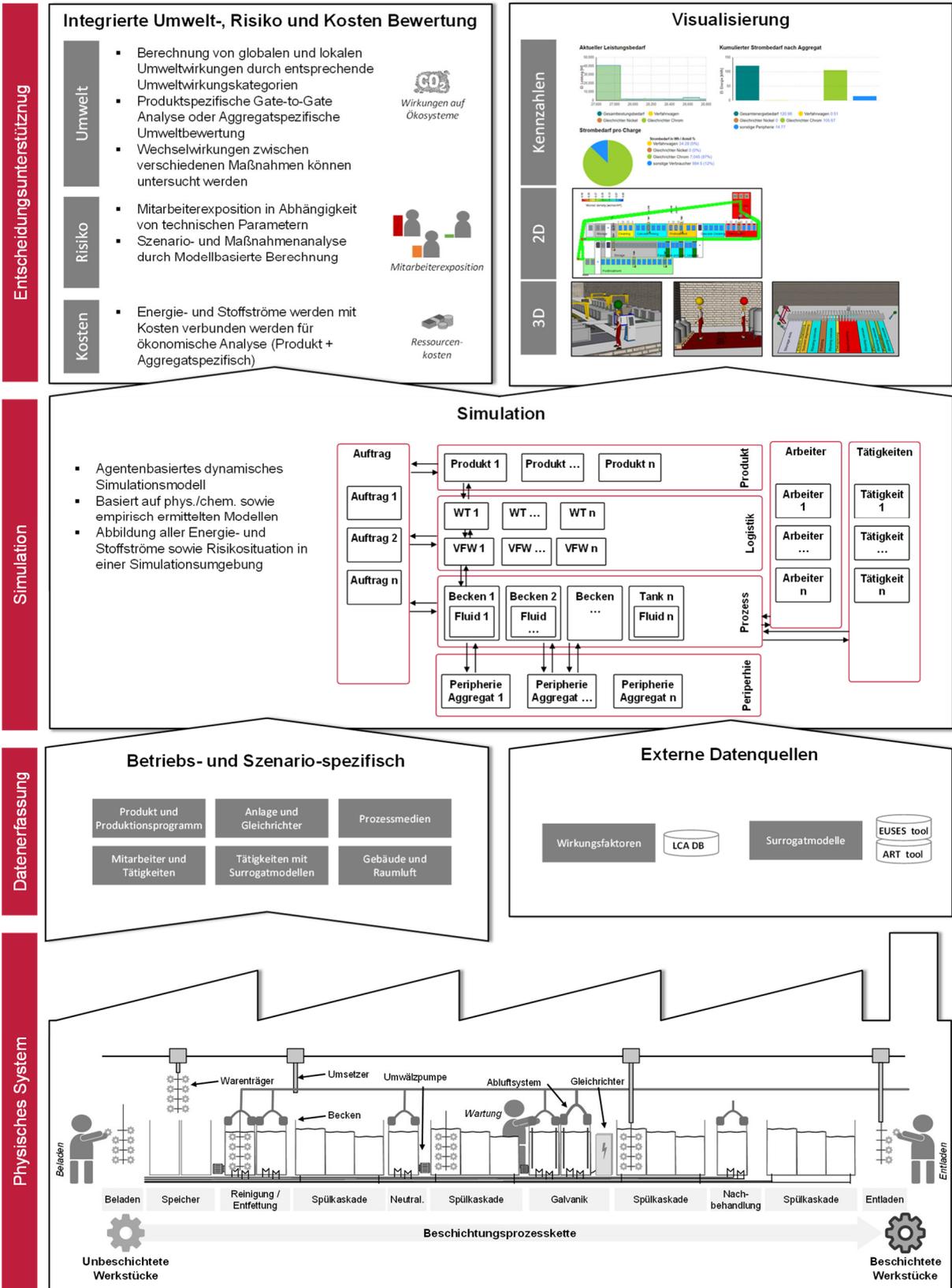
4.3 Bewertung der Vorhabensergebnisse

Die Bewertung erfolgt aus technischer/wissenschaftlicher, ökologischer, Risikomanagement und ökonomischer Sicht:

Technologische/wissenschaftliche Bewertung

Im Rahmen des Projektes ist es gelungen, die Analyse der Energie- und Ressourceneffizienz sowie des Risikomanagements in einer zentralen Gesamtmethodik mit einem integrierten Simulationstool zu verbinden. Dies schafft Synergien hinsichtlich Datenerfassung, Modellbildung und Bewertung, da für beide Arten von Analysen eine umfassende Aufnahme von produktionsbezogenen Daten sowie die Abstraktion des Realsystems in ein digitales Modell erforderlich ist. Das Projekt hat sich bei der Entwicklung auf die Analyse des Einsatzes bestimmter besonders kritischer Chemikalien am Beispiel des sechswertigen Chroms orientiert. Der entwickelte Ansatz ist aber generischer Natur, um eine Übertragbarkeit auf andere Energie- und Stoffströme in der Produktion – auch in anderen Branchen – zu gewährleisten. Ein wesentlicher Vorteil des entwickelten Ansatzes besteht im angemessenen Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Durchführung betreffender Analysen. Somit werden auch kleinere Unternehmen befähigt, negative Auswirkungen in Bezug auf die Zielsysteme Mitarbeiter und Umwelt selbständig und mit darstellbarem Aufwand zu ermitteln und zu reduzieren.

Zur abschließenden Bewertung sind die Details der entwickelten Gesamtmethodik in Abbildung 29 dargestellt. Konkret lassen sich im Rahmen der aufgestellten Gesamtmethodik die benötigten Daten aus den Betrieben mit einem einzigen zentralen Excel-basierten Datenerhebungsmodul direkt erfassen und für die Simulation bereitstellen. In dieser werden die Energie- und Stoffströme innerhalb der Anlage abgebildet und ermöglichen eine klare Zuordnung zu einzelnen Produkten oder Aggregaten. Die simulierten Ressourcenstromdaten sind die Basis für die Umweltbewertung, Risikobeurteilung im Rahmen des Chemikalienmanagements und Kostenberechnung. Parallel hierzu lassen sich die Ergebnisse durch Kennzahlen, zweidimensionale und dreidimensionale Darstellungen visualisieren.



Betriebs- und Szenario-spezifisch

Produkt und Produktionsprogramm	Anlage und Gleichrichter	Prozessmedien
Mitarbeiter und Tätigkeiten	Tätigkeiten mit Surrogatmodellen	Gebäude und Raumluft

Externe Datenquellen

Wirkungsfaktoren	Surrogatmodelle	EUSES tool ART tool
LCA DB		

Physisches System

Beschichtungsprozesskette

Unbeschichtete Werkstücke → Beladen → Speicher → Reinigung / Entfettung → Spülkaskade → Neutral. → Spülkaskade → Galvanik → Spülkaskade → Nachbehandlung → Spülkaskade → Entladen → Beschichtete Werkstücke

Abbildung 29: Entwickelte Gesamtmethodik zur synergetischen Analyse und Verbesserung von Ressourceneffizienz und Chemikalienmanagement in der Oberflächentechnik

Im Vergleich zu dem bisherigen Stand aus dem MEMAN Projekt weist die Methodik eine erheblich vereinfachte Anwendbarkeit bei KMU Betrieben auf. Zusätzlich wurde der Aspekt der Risikobewertung im Rahmen des Chemikalienmanagements integriert. In Abgrenzung zu dem eingangs ebenfalls genannten ZIM-Projekt „Galvanik 4.0“ [XV] ist nun eine erheblich vereinfachte Parametrierung der Galvaniklinie möglich. Während das Modell aus „Galvanik 4.0“ nur die Abbildung einer spezifischen Linie ohne Benutzerunterstützung erlaubte, lassen sich nun mit Hilfe des entwickelten Datenerfassungsmodell allgemein Beschichtungsprozesse abbilden. Auch hier wurde im Vergleich die Risikobewertung neu mitaufgenommen.

Im Gegensatz zum Stand der Technik, welcher heute schon vereinzelt Monitoring relevanter Stoffströme (z. B. über ERP Systeme) ermöglicht, bietet der kombinierte Ansatz ein höheres Maß an Transparenz in Bezug auf in die lokale und globale Umwelt emittierte Chemikalien. Dynamische Einflüsse auf die zu erwartenden Ressourcenverbräuche und Emissionen durch sich verändernde Umgebungsbedingungen, Produktionsprogramme oder Prozessparameter (z. B. Chemikalienkonzentration im Elektrolytbad) werden bei der Analyse berücksichtigt. Die Verknüpfung der Simulation mit Arbeitsszenarien ermöglicht außerdem die individuelle Bewertung der Exposition einzelner Mitarbeiter in verschiedenen zeitlichen Perspektiven, d. h. retrospektiv und prospektiv. Die potenziell aufgenommene Dosis chemischer Substanzen ist für alle Mitarbeiter anhand ihres Tätigkeitsprofils individuell ermittelbar. Besonders gefährdete oder vorbelastete Mitarbeiter können entsprechend geschützt werden, ohne sie vollständig aus den betroffenen Arbeitsbereichen ausschließen zu müssen. Unterschiedlich ausgeprägte Expositionen bei verschiedenen Fertigungsprozessen bzw. Tätigkeiten lassen sich bereits bei der Erstellung von Arbeitsplänen berücksichtigen. Eine zu starke Belastung einzelner Mitarbeiter kann somit aktiv vermieden werden. Im Gegensatz zu bestehenden Ansätzen ist ein dauerhaftes Mitführen von Sensorik dafür nicht erforderlich, da die individuell erfahrenen Belastungen simulativ ermittelt werden können.

Ökologische Bewertung

Ein wesentlicher Beitrag zur Umweltentlastung ergibt sich, wie bereits in der technischen Bewertung erwähnt, aus der Eignung der Lösung speziell für kleinere und mittlere Unternehmen der Oberflächentechnik. Diese können häufig mangels entsprechender Ressourcen bisher noch keine umfassenden ökologischen Analysen durchführen und weisen entsprechend noch erhebliches Optimierungspotential auf. Mit Hilfe des umgesetzten Ansatzes können Änderungen im Produktionsablauf sowie an der Produktionsinfrastruktur im Hinblick auf ihre positiven wie negativen Wirkungen vorab ganzheitlich bewertet werden. Durch eine insgesamt erhöhte Transparenz in Bezug auf Chemikalienverbräuche ergibt sich die Chance eines gezielteren und insgesamt reduzierten Stoffeinsatzes. Die Wirkung vielfältiger Risikomanagement Maßnahmen (RMM) wie z. B. einer Kapselung von Prozessen, einer Steigerung von Absaugleistungen o.ä. werden zudem in Bezug auf die resultierenden Umweltwirkungen und Mitarbeiterexpositionen mit Hilfe der Anbindung der Simulation an das ART Tool bewertbar gemacht und können als Entscheidungskriterium herangezogen werden. Da Unternehmen der Oberflächentechnik wesentlich von den Regulierungen der REACH Verordnung betroffen sind, ergibt sich ein starker Anreiz zur Implementierung der im Projekt zu entwickelnden Lösungen, da eine gründliche Erfassung und Dokumentation von Chemikalienflüssen in diesem Fall häufig verpflichtend durchzuführen sind. Die Synergien zwischen Chemikalienmanagement und Analysen zur Ressourceneffizienz kommen somit voll zum Tragen.

Der Abgleich mit dem Stand der Technik zeigt, dass die entwickelte Gesamtmethodik und die Umsetzung in einem Simulationstool, welches mittels dem Datenerhebungsmodul einfach parametrierbar werden kann, bisher in dieser Form noch nicht existierte. Um dies zu ermöglichen wurden auch bei der ökologischen Bewertung Modelle genutzt, die mit vertretbarem Aufwand die Gesamtsituation hinreichend genau abbilden.

Zur Abbildung der Energieströme werden zustandsbasierte Modelle genutzt, welche zwar eine leichte Unsicherheit aufweisen, jedoch haben sich diese im Rahmen des vorgenannten ZIM-Projekt „Galvanik

4.0“ als hinreichend genau gezeigt. Bedingung hierfür ist jedoch, dass für den Gleichrichter ein spezifischeres, Prozessparameter-abhängiges Modell genutzt wird. Da die zustandsbasierten Modelle die Durchführung der Beratung jedoch erheblich vereinfachen und das Gesamtergebnis nicht wesentlich beeinflussen, ist diese Vereinfachung zu akzeptieren.

Zu einer genaueren Betrachtung der Ressourcenströme in der Anlage werden die Prozessmedien nicht als Gesamtes, sondern als einzelne Inhaltsstoffe des gesamten Elektrolyten modelliert. Dies erhöht zwar den Aufwand, lohnt sich jedoch da hier sehr hohe Potentiale bezüglich der Umweltentlastung liegen und der Ressourcenverbrauch erheblich genauer abgebildet werden kann. Die Verschleppung lässt sich durch einen Kategorisierungsansatz sehr gut näherungsweise beschreiben. Das genaue elektrochemische Verhalten lässt sich jedoch nur eingeschränkt durch den stoffstrombasierten Ansatz beschreiben, wenn Stoffe verwendet werden, deren Einsatzverhalten nicht durch den Verfahrenslieferanten beschrieben wird. Für den im Rahmen dieses Projektes betrachteten Cr(VI) Elektrolyten lassen sich für den relevantesten Inhaltsstoff (sechswertiges Chrom bzw. Chromsäure) entsprechende Modelle in der Literatur finden und wurden in das Modell integriert.

Risikomanagement Bewertung

Etwas kritischer zu bewerten sind die Ergebnisse aus der Risikobeurteilung. Durch die Anbindung an das ART Tool über Surrogatmodelle ist es möglich, ein weit entwickeltes Modell zur Abschätzung von Mitarbeiterbelastungen über Raumluftexpositionen einzubinden. Die Genauigkeit dieser Modelle ist nur so hoch, wie die des ART Tools. Einzelne Parameter lassen sich im ART Tool nur mit eingeschränkter Genauigkeit beschreiben, z.B. kann das Fluid lediglich bewegt oder nicht-bewegt sein. Diese einfache Fallunterscheidung ermöglicht zwar eine einfache Aufnahme der technischen Parameter, insbesondere da Strömungsgeschwindigkeiten im Fluid sich kaum mit vertretbarem Aufwand in der industriellen Praxis messen lassen. Jedoch entstehen hierdurch gewisse Unsicherheiten bei der Bestimmung der tatsächlichen Konzentrationen bei den Mitarbeitern.

Ökonomische Bewertung

Das entwickelte Software-Werkzeug soll auf die gesamte elektrochemische Oberflächentechnik übertragbar sein, perspektivisch auch für weitere oberflächentechnische Prozesse.

In der EU sind ca. 18.000 Anlagen zur Beschichtung von Oberflächen vorhanden [EC06], welche sich durch einen oft hohen Energieeinsatz und noch häufiger durch den Einsatz von umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffen auszeichnen. Laut aktueller Statistik lässt sich für die Branche der Oberflächentechnik in Deutschland mit ca. 1.400 Betrieben und einem Umsatz von ca. 7.2 Mrd. Euro jährlich gesamtwirtschaftlich auch eine hohe Relevanz konstatieren.[XVI] Tatsächlich geht der Branchenverband jedoch aufgrund eines hohen Anteils handwerklicher Betriebe, die nicht in der industriellen Statistik erfasst werden, insgesamt von rund 2000 Betrieben aus. Der Anteil an kleinen Unternehmen (<50 Mitarbeiter) ist dabei mit ca. 1.000 Unternehmen überproportional hoch.[XVII] Gerade diese können von dem entwickelten kombinierten Ansatz durch erhebliche Synergieeffekte profitieren.

Die Verbreitung und wirtschaftliche Umsetzung der Projektergebnisse in diesem Markt sollen durch die eiffo eG erfolgen; dabei greift eiffo auf das bestehende weitreichende Netzwerk zu Unternehmen und Verbänden der Oberflächentechnik zurück. Das Geschäftsmodell sieht eine Kombination aus Software-Lizenz und Beratungsleistung durch eiffo vor. Dabei wird aktuell von Preisen ausgegangen, die abhängig von Unternehmensgröße der Kunden bzw. Aufwand für die Prozessanalyse variieren. Das erarbeitete Geschäftsmodell trägt dabei der mittelständischen Struktur der Branche und den unterschiedlichen Bedarfen und wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Betriebsgrößen ausreichend Rechnung.

Wie bereits im Projekt „Galvanik 4.0“ gezeigt, können mit der Verbesserung der Ressourceneffizienz erhebliche Einsparungen bei Energie- und Materialeinsatz sowie Betriebskosten erzielt werden. Allein

energiebezogene Einsparungen belaufen sich auf 5 – 10 % des Energieeinsatzes und der Energiekosten; stoffbezogene Einsparungen sind in ähnlicher Größenordnung erreichbar. Tatsächlich wird aufgrund des neuartigen integrativen Konzepts ein deutlich höheres Einsparpotenzial erwartet. Bei einem typischen Galvanikbetrieb mit 50 Mitarbeitern bedeutet dies eine Kostenersparnis von 15.000 – 30.000 € im Jahr allein für Energie. Mithin ergibt sich bei Annahme eines ROI von ca. 1 Jahr für die geplante Dienstleistung ein möglicher Preis in der Größenordnung von 20.000 – 25.000 €. Dabei ist der Zusatznutzen durch das integrierte Chemikalienmanagement noch gar nicht berücksichtigt. Allein mit den rund 1.300 industriellen Betrieben in Deutschland ergibt sich somit ein Marktpotenzial ein beachtliches Marktpotenzial für die wirtschaftliche Verwertung.

4.4 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Ergebnisse des Projektes werden sowohl in der nationalen als auch der internationalen Fachwelt verbreitet. Von wissenschaftlicher Seite aus wurden Inhalte des Projektes bei der Deutsch/Englischen Fachtagung „Simulation in Produktion und Logistik“ vorgestellt. Die Veröffentlichung ist als Open Access Veröffentlichung verfügbar[XIX]:

Leiden, Alexander; Thiede, Sebastian; Herrmann, Christoph: Agent-Based Simulation for Multi-Criterial Planning and Control of Automated Electroplating Lines In: 18. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Chemnitz, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2019, Seite 111-120, ISBN 978-3-95735-114-2

Ein weiterer Beitrag wurde bei dem Open Access Journal Simulation News Europe eingereicht mit dem Titel:

Agent Based Simulation Approach for Occupational Safety and Health Planning a Case of Electroplating Facilities von Leiden, Alexander; Thiede, Sebastian und Herrmann, Christoph.

Aktuell befindet sich diese Veröffentlichung im Peer Review Prozess.

Eine weitere Open Access Veröffentlichung mit dem Titel „*Combining energy and resource flow models with occupational health model – a case of electroplating facilities*“ befindet sich aktuell in Ausarbeitung und soll zur nächsten CIRP Life Cycle Engineering Conference vorgestellt werden.

Eingang hat das Projekt bei der zentralen, ersten fachlichen Keynote der ZVO Oberflächentage im September 2019 in Berlin durch Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann gefunden. An der Tagung nahmen knapp 700 Besuchern vorwiegend aus der deutschsprachigen Galvanotechnik teil und hatte somit die höchstmögliche Reichweite für das Thema im Deutschsprachigen Raum.

Eine Vorstellung des Projektes war auch für die Leitmesse SurfaceTechnology in Stuttgart geplant, welche jedoch aufgrund der COVID-19 Pandemie ersatzlos entfallen ist und erst wieder im Jahr 2022 stattfindet.

Dem industriellen Publikum aus der Galvanotechnik wird das Projekt nun gezielt bei Netzwerkveranstaltungen des VECCO e.V. und der eiffo eG in anwendungsbezogenen Präsentationen vorgestellt. Dies sind sowohl Online-Workshops als auch Präsenzveranstaltungen. Insbesondere an der für März 2021 geplanten Netzwerktagung von eiffo wird das Projekt prominent präsentiert werden.

Teilaspekte des Projektes sind bereits in verschiedenste Vorlesung des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik eingegangen, welche sowohl von Studierenden der Fakultät Maschinenbau als auch der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften besucht werden.

5. Fazit

Im Rahmen des Projektes ist es gelungen, die Analyse der Energie- und Ressourceneffizienz sowie des Risikomanagements in einer zentralen Gesamtmethodik mit einem integrierten Simulationstool zu verbinden. Dies schafft Synergien hinsichtlich Datenerfassung, Modellbildung und Bewertung, da für beide Arten von Analysen eine umfassende Aufnahme von produktionsbezogenen Daten sowie die Abstraktion des Realsystems in ein digitales Modell erforderlich ist. Das Projekt hat sich bei der Entwicklung auf die Analyse des Einsatzes bestimmter besonders kritischer Chemikalien am Beispiel des sechswertigen Chroms orientiert. Der entwickelte Ansatz ist aber generischer Natur, um eine Übertragbarkeit auf andere Energie- und Stoffströme in der Produktion – auch in anderen Branchen – zu gewährleisten. Ein wesentlicher Vorteil des entwickelten Ansatzes besteht im angemessenen Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Durchführung betreffender Analysen. Somit werden auch kleinere Unternehmen befähigt, negative Auswirkungen in Bezug auf die Zielsysteme Mitarbeiter und Umwelt selbständig und mit darstellbarem Aufwand zu ermitteln und zu reduzieren.

Etwas kritischer zu bewerten sind die Ergebnisse aus der Risikobeurteilung. Durch die Anbindung an das ART Tool über Surrogatmodelle ist es möglich, ein weit entwickeltes Modell zur Abschätzung von Mitarbeiterbelastungen über Raumluftexpositionen einzubinden. Die Genauigkeit dieser Modelle ist jedoch nur so hoch, wie die des ART Tools, in dem sich einzelne Parameter nur mit eingeschränkter Genauigkeit beschreiben lassen (z.B. kann das Fluid lediglich bewegt oder nicht-bewegt sein). Diese einfache Fallunterscheidung ermöglicht zwar eine einfache Aufnahme der technischen Parameter, insbesondere da Strömungsgeschwindigkeiten im Fluid sich kaum mit vertretbarem Aufwand in der industriellen Praxis messen lassen. Jedoch entstehen hierdurch gewisse Unsicherheiten bei der Bestimmung der tatsächlichen Konzentrationen bei den Mitarbeitern.

Perspektivisch kann der bestehende Ansatz über die simulative Bewertung basierend auf historischen Expositionsdaten deutlich hinausgehen. Dazu sollten zukünftig auch die Möglichkeit der Nutzung von Live-Daten aus der Produktion sowie eine Anbindung an weitere bestehende Systeme (ERP und/oder MES) untersucht werden. Durch die Kopplung der Systeme können noch exaktere Expositionsbewertungen in Echtzeit ermöglicht werden. Hierfür ist eine Anbindung an Sensornetzwerke erforderlich, welche die entwickelten Modelle bei der Bewertung ergänzen. Perspektivisch lässt sich daraus eine Rückkopplung in die Produktion implementieren, d. h. die Regelung von Anlagen, Anlagenperipherie und TGA kann auf Basis der aktuell gemessenen Chemikalienbelastung kontinuierlich angepasst werden. Der Einsatz kritischer Chemikalien lässt sich damit weiter reduzieren.

Die stetig fortschreitende Digitalisierung in der Produktion und der damit einhergehende zunehmende Einsatz von Sensorik auch in der Galvanotechnik stellt hierfür eine geeignete Grundlage dar.

6. Literaturverzeichnis

- [I] BMWi 2018: Ausschreibung „Digitalisierung als Enabler für Ressourceneffizienz in Unternehmen“
- [II] U. Sievers, U. König, B. Seßler: Ressourceneffiziente Fertigung – Erfahrungen und Handlungsempfehlungen zur Verbesserung von Rohstoff- und Energie-Effizienz in der verarbeitenden Industrie“, WOMag 3/2013
- [III] U. Sievers, U. König, B. Seßler: Produktionstechnische Prozesse in der modernen nachhaltigen Beschichtungstechnik, in: Michael Angrick (Herausgeber), Nach uns, ohne Öl: Auf dem Weg zu nachhaltiger Produktion, 1. Mai 2010
- [IV] aktuelle Marktzahlen finden sich z.B. bei IKB, LBBW
- [V] Blume S., Kurle D., Herrmann C., Thiede S. 2017; Toolbox for Increasing Resource Efficiency in the European Metal Mechanic Sector. Procedia CIRP, 61, 40-45
- [VI] International Organization for Standardization 2006; ISO 14040-Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework
- [VII] European Chemicals Agency 2018; Guide on Safety data sheets and Exposure scenarios
- [VIII] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) 2017; DGUV Regel 109-602 - Branche Galvanik,
- [IX] Fransman W., van Tongeren M., Cherrie J., Tischer M., Schneider T., Schinkel J., Kromhout H., Warren N., Goede H., Tielemans E. 2011; Advanced Reach Tool (ART): Development of the Mechanistic Model. The Annals of occupational hygiene. 55. 957-79.
10.1093/annhyg/mer083
- [X] Tielemans E., Warren N., Fransman W., van Tongeren M., McNally K., Tischer M., Ritchie P., Kromhout H., Schinkel J., Schneider, T. 2011; “Advanced REACH Tool (ART): Overview of Version 1.0 and Research Needs” The Annals of Occupational Hygiene, Volume 55, Issue 9
- [XI] ART Consortium: The Advanced Reach Tool: <https://www.advancedreachtool.com>, abgerufen am 18.07.2020.
- [XII] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) 2017; Technische Regeln für Gefahrstoffe - Tätigkeiten mit krebserzeugenden Metallen und ihren Verbindungen - TRGS 561
- [XIII] Europäische Chemikalienagentur (ECHA) 2018; The European Union System for the Evaluation of Substances, aktuelle Version 2.1.2, <https://ec.europa.eu/jrc/en/scientific-tool/european-union-system-evaluation-substances>
- [XIV] Bundesinstitut für Risikobewertung (BfG) 2018; Risikobewertung durch das BfR https://www.bfr.bund.de/de/risikobewertung_durch_das_bfr-1799.html
- [XV] Entwicklung einer Produktionstechnik zur sicheren und effizienten Großserienbeschichtung hochfester Verbindungselemente für die Automobilindustrie („Galvanik 4.0“), ZIM Projekt (2016 – 2018)
- [XVI] Destatis 2018; Fachserie 4 Reihe 3.1 - Produzierendes Gewerbe Produktion des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden
- [XVII] Destatis 2018; Fachserie 4 Reihe 4.1.1 - Produzierendes Gewerbe Beschäftigung und Umsatz der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden
- [XVIII] European Commission: Reference Document on Best Available Techniques for the Surface Treatment of Metals and Plastics, 2006.
- [XIX] Leiden, A.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Agent-Based Simulation for Multi-Criterial Planning and Control of Automated Electroplating Lines In: 18. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Chemnitz, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, Seite 111-120, 2019.

(Rückendeckel)