

# **Pilotanlagenentwicklung eines umweltschonenden, automatisierten geschlossenen Kompaktsystems zur Reinigung von Aluminium-Strangpresswerkzeugen**

**AZ 26837-21/0**

## **Abschlussbericht**



**von Ulrich Wieters**

**Firma: Wieters & Gerdes Industrial Automation GmbH  
Louis-Leitz-Straße 1  
28355 Bremen**

**im Oktober 2010**

das Projekt wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert

## **Inhaltsverzeichnis**

Inhaltsverzeichnis .....	2
Übersicht der Abbildungen .....	4
Übersicht der Tabellen .....	5
Projektkennblatt .....	6
1. Zusammenfassung .....	8
2. Einleitung und Projektziele.....	10
2.2. Projektziele.....	13
3. Ergebnisse und Diskussionen.....	14
3.1. Stand der Technik .....	14
3.2. Grundlagen .....	16
3.2.1. Reaktionsgleichungen.....	16
3.2.2. Leitfähigkeit .....	17
4. Ergebnisse und Diskussionen.....	20
4.1. Anlagendesign .....	20
4.2. Ablaufbeschreibung.....	23
4.3. Konzentration der Natronlauge.....	24
4.4. Arbeitstemperaturen.....	25
4.5. Messungen.....	26
4.6. Prozessstabilität.....	26
4.7. Prozess .....	27
4.7.1. Batchprozess.....	27
4.7.2. Kontinuierlicher Prozess .....	27
4.8. Reinigungsvorgang .....	28
4.9. Wasserstoff .....	28
4.10. Natriumaluminat-Anteil und Abhängigkeiten .....	30
4.11. Ultraschall.....	32
4.12. Effizienz und Recycling.....	33
4.12.1. Energieeffizienz.....	33
4.12.2. Rohstoffeffizienz.....	33
4.12.3. Aluminium-Recycling.....	34
4.13. Emissionen und Abfallentsorgung.....	36

5. Laborversuche .....	39
5.1. Versuchsreihe 1-8te Zugabe .....	40
5.2. Versuchsergebnis.....	47
6. Fazit.....	48
7. Literaturverzeichnis.....	50

## Übersicht der Abbildungen

Abb. 1	Entwicklung von recycelten Aluminium in 1000 Tonnen per anno in Westeuropa ..	12
Abb. 2	Beispiel einer konventionellen Reinigungsanlage .....	15
Abb. 3	elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Medium-Konzentration .....	17
Abb. 4	Leitfähigkeit von $H^+$ .....	18
Abb. 5	Leitfähigkeit von $OH^-$ .....	18
Abb. 6	Diagramm Gefährdung am Arbeitsplatz .....	21
Abb. 7	Pilotanlage in Werkstatt .....	22
Abb. 8	Pilotanlage beim Pilotkunden .....	23
Abb. 9	Dichte in Abhängigkeit der NaOH-Konzentration und Temperatur .....	25
Abb. 10	Platzierung Wasserstoffmessung .....	29
Abb. 11	Ergebnis bei konventioneller Fahrweise .....	34
Abb. 12	Ergebnis 1 bei optimierter Fahrweise .....	35
Abb. 13	Ergebnis 2 bei optimierter Fahrweise .....	35
Abb. 14	Diagramm Umweltbelastung am Anlagenstandort .....	36
Abb. 15	Aluminiumhydroxid- und Natronlauge(kristallin)-Ablagerungen 1 .....	37
Abb. 16	Aluminiumhydroxid- und Natronlauge(kristallin)-Ablagerungen 2 .....	37
Abb. 17	Anlagenzustand bei geschlossener Bauweise der Pilotanlage .....	38
Abb. 18	Laborversuch: 500ml NaOH-Lösung von 320g/l .....	39
Abb. 19	Laborversuch: 1,3 g Aluminium .....	40
Abb. 20	Laborversuch: 2,6g Aluminium .....	40
Abb. 21	Laborversuch: 3,9g Aluminium .....	41
Abb. 22	Laborversuch: 5,2g Aluminium .....	41
Abb. 23	Laborversuch: 6,5g Aluminium .....	41
Abb. 24	Laborversuch: 7,8g Aluminium .....	42
Abb. 25	Laborversuch: 9,1g Aluminium .....	42
Abb. 26	Laborversuch: 10,4g Aluminium .....	42
Abb. 27	Diagramm Kostenbenefit durch Rcycling und Verbrauchsminimierung von NaOH.	48

## Übersicht der Tabellen

Tabelle 1 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 1-10 .....	43
Tabelle 2 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 11-20 .....	43
Tabelle 3 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 21-30 .....	44
Tabelle 4 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 31-40 .....	44
Tabelle 5 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 41-50 .....	45
Tabelle 6 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 51-60 .....	45
Tabelle 7 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 61-70 .....	46
Tabelle 8 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 71-78 .....	46

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



<b>Az</b>	<b>26837</b>	<b>Referat</b>	<b>21/0</b>	<b>Fördersumme</b>	<b>€ 115.340,00</b>
<b>Antragstitel</b> Pilotanlagenentwicklung eines umweltschonenden, automatisierten geschlossenen Kompaktsystems zur Reinigung von Aluminium-Strangpresswerkzeug					
<b>Stichworte</b>					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>20 Monate</b>	<b>15.02.2009</b>	<b>15.10.2010</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte	08.06.2009	08.01.2010			
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Wieters & Gerdes Industrial Automation GmbH			Tel	0421 5262650
	Louis-Leitz-Strasse 1			Fax	0421 5262655
	28355 Bremen			Projektleitung	
				Ulrich Wieters	
			Bearbeiter		
			Ulrich Wieters		
<b>Kooperationspartner</b>					
<b>Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens</b>					
<p>Ausgangspunkt des Projektes war, ein geschlossenes modulares Kompaktsystem zur Reinigung von Aluminium-Strangpressenwerkzeug zu entwickeln.</p> <p>Dieses Konzept sollte im Ergebnis grundlegende Verbesserungen in den Bereichen, Effizienzoptimierung, Arbeitssicherheit, Umweltschutz, Übersichtlichkeit und Bedienfreundlichkeit bieten.</p> <p>Sämtliche Abläufe sollten vollautomatisch ablaufen. Anlagenerweiterungen könnten durch einen modularen Aufbau des Reinigungssystems ermöglicht werden. Entsprechend wurde angestrebt, nachfolgende Punkte zu realisieren:</p> <p><b>Automatisch kontrollierte Prozesssteuerung.</b></p> <p><b>Doppelte Betriebssicherheit</b> durch geschlossene Behandlungs- und Vorratsbehälter sowie die Konzeption der Gesamtanlage als ein in sich geschlossenes Kompaktsystem. Der Bediener kommt zu keiner Zeit mit gefährlichen Medien in Kontakt.</p> <p><b>Verbesserte Sicherstellung</b> einer sorgfältig dosierten Durchlüftung des Behandlungsbehälters, die aufgrund der chemisch bedingten Knallgasbildung während des Beizvorgangs unerlässlich ist. Der auf ein sicheres Minimum reduzierte Wrasenstrom wird über ein Abluftreinigungssystem über das Dach ausgeleitet.</p> <p><b>Wegfall</b> der Notwendigkeit, das im Werkzeug verbliebene Aluminium vollständig in Lösung zu bringen. Dadurch verkürzt sich die Reinigungszeit signifikant.</p> <p><b>Rückgewinnung</b> des im Werkzeug verbliebenen erheblichen Restaluminiums ohne aufwendigen chemischen Recyclingprozess und somit Ressourcenbewahrung.</p> <p><b>Problemlose Übersicht</b> und Bedienung ohne lange Wege. Das spart Zeit sowie wertvolle Gebäudefläche und erleichtert die Instandhaltung.</p> <p>Die Anlage sollte als ein soweit möglich „geschlossenes System“ konzipiert werden. Die Behälter werden im geschlossenen Zustand über ein Gaspendelsystem verbunden. Wrasen werden zum Kondensieren in den mit Wasser gefüllten Vorspülbehälter geführt.</p>					
<small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a></small>					

## **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Im Rahmen des Projektes sollten verschiedene Projektphasen abgearbeitet werden. In einem ersten Schritt wurden chemische und physikalische Grundlagen ermittelt. In dieser Bearbeitung wurden auch Laborversuche durchgeführt, um theoretische Erkenntnisse praktisch in einem kleinen Maßstab darzustellen. Durch die Evaluierungen der Versuchsergebnisse konnten erste konkrete Spezifizierungen für eine praxistaugliche Pilotanlage ausgearbeitet werden. Auf dieser Basis musste das angedachte Anlagendesign auf Durchführbarkeit entsprechend der Effizienzsteigerungsmaßnahmen und Sicherheitsaspekte für Personal und Umwelt untersucht werden. Dadurch ergab sich ein weiterer Arbeitsschwerpunkt mit Untersuchungen vor Ort bei diversen Pilotkunden und anschließender Bewertung als Grundlage für ein innovatives, umweltverträgliches und wettbewerbsfähiges bzw. praxistaugliches Konzept. Daraus ergab sich dann der nächstfolgende Projektschritt mit der Spezifikation der einzelnen Anlagenkomponenten. Nach erfolgtem Zusammenbau der Komponenten in der Werkstatt und paralleler Erarbeitung des Programmablaufes, wurden sukzessive Testläufe mit Wasser unternommen. Weitere Testläufe mit Produkt und unter Produktionsbedingungen sind nach erfolgter Inbetriebnahme beim Pilotkunden erfolgt.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Basis für die Realisierung des Pilotprojektes war die Anforderung, ein automatisiertes geschlossenes Kompakt-System zur Reinigung von Aluminium-Strangpressenwerkzeug als Pilotanlage zu realisieren. Dieses erfolgte unter den Prämissen Umweltschutz, Wertstoffhaltung, Arbeitsplatzsicherheit und nicht zuletzt der Senkung der Energiekosten. Im Ergebnis konnten die Anlage und der Prozessablauf so projektiert werden, dass die im Prozess vorhandenen und entstehenden natürlichen Ressourcen optimal ausgenützt werden.

Die Anlage ist so konzipiert, dass auftretende Wärmeverluste und Emissionen auf das notwendige Minimum begrenzt werden. Durch den gezielten Einsatz von Messtechnik, werden alle prozessrelevanten Messgrößen erfasst und ausgewertet. Dadurch wird die Anlage im Ergebnis reproduzierbar betrieben. Alle Prozessparameter können durch einen stetigen Optimierungsprozess den Anforderungen angepasst werden. Im Vergleich zu konventionellen Systemen können die Betriebskosten bis zu 35% gesenkt werden. Beim fachgerechten Betrieb kann die Aluminiumrecyclingrate bis zu 50% gesteigert werden.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das Vorhabenskonzept und relevante Zwischenschritte wurden im Rahmen von Präsentationen bei potentiellen Pilotanlagenkunden vorgestellt. Testläufe und Vorführungen der fertiggestellten Anlage fanden mit Beteiligung diverser Kunden-Interessenten in unserer Werkstatt statt. Nach erfolgter Wiederinstallation beim Pilotkunden, kann die Anlage dort als Referenz besichtigt werden. Zudem wurde diese Anlage bzw. das Konzept auf unserem Messestand der Messe Aluminium 2010 in Essen (14.-16.9.2010) als neues, innovatives, umweltschonendes Reinigungssystem ausgestellt.

Weitere Messebeteiligungen bzw. Präsentation bei potentiellen Kunden sind in Planung.

## **Fazit**

Die Zeiteinsparung, die Reduzierung von Beschaffungs- und Entsorgungskosten der Prozessmedien, die größere Energie-Effizienz und das erhöhte Aluminium-Recyclingpotential eröffnen weitreichende Verbesserungen für Umwelt, Arbeitsschutz und Wirtschaftlichkeit.

Bei Optimierung des Beizregimes je nach Werkzeugabmessung und -Konstruktion und empfohlener Beiztechnologie lassen sich bedeutende Restaluminiumraten bis zu 30 t/ Jahr erzielen.

Im Ergebnis wird diese Reinigungsanlage einen großen positiven Einfluss auf die Prämissen Umwelt, nachhaltige Ressourcenschonung und Effizienz haben. Rohstoffeinsatz und Energieverbräuche können bis zu 25-50% im Verhältnis zu konventionellen Anlagen reduziert werden.

Folgerichtig kann die zukünftige Bestrebung aller Betreiber von Aluminiumpresswerken nur sein, die Umweltauswirkungen und den Rohstoffverbrauch von Strangpressreinigungsprozessen in ihren Werken zu senken und das Recyclingpotential soweit wie möglich zu erhöhen.

Da kein Rohstoff unbegrenzt zur Verfügung steht und keine Energiequelle unerschöpflich ist, müssen die vorhandenen Ressourcen soweit wie möglich geschont werden. Die Rückgewinnung von Rohstoffen, ermöglicht dann eine Rückführung in den Produktionskreislauf.

## 1. Zusammenfassung

Ausgangspunkt des Projektes war, ein geschlossenes modulares Kompaktsystem zur Reinigung von Aluminium-Strangpressenwerkzeug zu entwickeln.

Dieses Konzept sollte im Ergebnis grundlegende Verbesserungen in den Bereichen, Effizienzoptimierung, Arbeitssicherheit, Umweltschutz, Übersichtlichkeit und Bedienfreundlichkeit bieten.

Sämtliche Abläufe sollten vollautomatisch ablaufen. Anlagenerweiterungen könnten durch einen modularen Aufbau des Reinigungssystems ermöglicht werden.

Entsprechend wurde angestrebt, nachfolgende Punkte zu realisieren:

- Automatisch kontrollierte Prozesssteuerung.
- Doppelte Betriebssicherheit durch geschlossene Behandlungs- und Vorratsbehälter sowie die Konzeption der Gesamtanlage als ein in sich geschlossenes Kompaktsystem.  
Zu keiner Zeit darf der Bediener Kontakt mit gefährlichen Medien haben.
- Reduzierung von Medienemissionen in der Abluft und am Arbeitsplatz auf das notwendige Minimum
- Verbesserte Sicherstellung einer sorgfältig dosierten Durchlüftung des Behandlungsbehälters, die aufgrund der chemisch bedingten Knallgasbildung während des Beizvorgangs unerlässlich ist. Der Wrasenstrom sollte auf ein sicheres Minimum reduziert und mit einem Abluftreinigungssystem über das Dach ausgeleitet werden.
- Wegfall der Notwendigkeit, das im Werkzeug verbliebene Aluminium vollständig in Lösung zu bringen. Dadurch sollte sich die Reinigungszeit signifikant verkürzen. Dadurch ergibt sich die Rückgewinnung des im Werkzeug verbliebenen erheblichen Restaluminiums ohne aufwendigen chemischen Recyclingprozess und somit Ressourcenbewahrung.
- Problemlose Übersicht und Bedienung ohne lange Wege. Das spart Zeit sowie wertvolle Gebäudefläche und erleichtert die Instandhaltung.

Die Anlage soll als ein soweit möglich „geschlossenes System“ konzipiert werden. Die Behälter werden im geschlossenen Zustand über ein Gaspendelsystem verbunden. Wrasen werden zum Kondensieren in den mit Wasser gefüllten Vorspülbehälter geführt.

Im Verlauf des Projektes wurden die angestrebten Punkte evaluiert und als Grundlage für die technische Anlagenspezifikation genutzt.



Das Ergebnis der Projektarbeiten zeigt deutlich, dass sowohl für die Rückgewinnung von Aluminium als auch Ressourcenbewahrung bezüglich konsequenter Reduzierung des Rohstoffeinsatzes und Verbesserung der Energieeffizienz große Potentiale vorhanden und mit technischen Mitteln auch ökonomisch umzusetzen sind. Während der Realisierung des Projektes wurden neue bzw. zusätzliche gewonnene prozesstechnische Erkenntnisse an das Anlagendesign angepasst.

## 2. Einleitung und Projektziele

### 2.1. Einleitung

Umweltschutz umfasst alle Maßnahmen, um die natürlichen Lebensgrundlagen von Mensch, Tier und Pflanzen zu erhalten.

Jeder Industriezweig nimmt durch die Größe der Anlagen, aber auch durch seine Produktionsverfahren Einfluss auf die Umwelt. Industrieller Umweltschutz war lange Zeit, sofern überhaupt betrieben, auf die Milderung schädlicher Wirkungen ausgerichtet.

Mehr und mehr setzt sich der Grundsatz durch, die Ursachen einer Umweltgefahr zu beseitigen und die Kosten dem Verursacher zuzuweisen. Dabei zeigt sich, dass dieses Vorgehen sogar wirtschaftlich sein kann.

Der nachhaltige Schutz der Umwelt und die Schonung der natürlichen Ressourcen müssen wesentliche Bestandteile der zukünftigen Industrieanlagentechnologie sein. Die einzusetzenden Produktionsprozesse und die erzeugten Produkte müssen so ausgelegt werden, dass die natürlichen Ressourcen optimal ausgenutzt, die Auswirkungen auf die Umwelt möglichst gering gehalten und gleichzeitig auch die Produktionskosten sowie die Betriebskosten gesenkt werden.

Um die Emissionen möglichst gering zu halten, bedarf es der Umsetzung eines entsprechenden Anlagenkonzepts bzw. Designs.

Folgerichtig kann die zukünftige Bestrebung aller Betreiber von Aluminiumpresswerken nur sein, die Umweltauswirkungen und den Rohstoffverbrauch von Strangpressreinigungsprozessen in ihren Werken zu senken und das Recyclingpotential soweit wie möglich zu erhöhen.

Durch geeignete Technologie lassen sich unmittelbar die Umweltbelastung, die Gefahren am Arbeitsplatz und der Energieverbrauch reduzieren.

Im Kern müssen die Gefahren für die Umwelt und das Personal soweit möglich verringert und die Energieeffizienz erhöht werden, d.h. Ressourcen effizient verwenden, aber nicht verschwenden.

- **Je kleiner der Ressourcenverbrauch,**
- **desto kleiner die Umweltbelastung**
- **desto größer der Umweltnutzen**

Bei Aluminium ist die Recycling-Effizienz sehr gut, denn es ist wesentlich schwieriger, Primär-Aluminium durch Aufschluss von Bauxit (Aluminiumerz) und

Synthese zu Aluminiumoxid mit anschließender Schmelzflusselektrolyse zu gewinnen, als reines Aluminium einzuschmelzen (Schmelzpunkt 660 °C). Des Weiteren wird bei der Aluminiumgewinnung aus Bauxit im erheblichen Maße elektrische Energie benötigt, während beim Recycling (Einschmelzen) auch Primärenergieträger verwendet werden können, womit die Effizienz des Prozesses weiter gesteigert wird. Insgesamt beträgt der Energieverbrauch für Recycling-Aluminium nur 5% bis 10% vom Wert für Primäraluminium. Somit ist Aluminium-Recycling sowohl ökonomisch als auch ökologisch sehr sinnvoll.

Recycling von Aluminium spart Energie und schont Rohstoffe. Mit der gleichen Energiemenge lassen sich entweder eine Tonne Aluminium aus Bauxit herstellen oder aber 20 Tonnen Aluminium aus Schrott recyceln – und dies ohne jegliche Qualitätseinbußen.

Aluminium ist ein metallischer Werkstoff, dessen Eigenschaften auch nach seiner Nutzung in einem Produkt nicht beeinträchtigt werden. Aluminium kann daher bei entsprechender Aufbereitung beliebig oft ohne Qualitätsverlust wiederverwertet werden. Der hohe Metallwert bleibt erhalten und bildet einen ausreichenden wirtschaftlichen Anreiz, das Metall auch tatsächlich am Ende seiner Nutzungsphase zu erfassen, aufzubereiten, zu schmelzen und erneut in gleicher bzw. vergleichbarer Weise zu nutzen.

Aluminium, das bei seiner Verarbeitung oder am Ende eines Produktlebens anfällt, wird zum Sekundärrohstoff, für den es einen weltweiten Markt gibt.

Viele Optimierungsmaßnahmen und damit Kosteneinsparungen können mit relativ einfachen Mitteln vorgenommen werden, vorausgesetzt es wurde erkannt, wo ein Optimierungspotential besteht.

Viele Industrieanlagen sind in ein komplexes Netz von Nutzerbedürfnissen eingebunden. Daraus entstehen jeweils eigene Anforderungen für den Produktionsablauf. Anlagen arbeiten häufig ineffektiv und verschwenden wertvolle Ressourcen. Verteilung und Verbrauch von Rohstoffen sind nicht differenziert auf den Nutzen abgestimmt. Veraltete Systeme und mangelnde Transparenz erzeugen einen unnötig hohen Rohstoffverbrauch und unnötig hohen Energiebedarf. Die Folge sind überhöhte Kosten und Schadstoffemissionen.

Der unwirtschaftliche Betrieb von Anlagen setzt sich oft aus einem umfassenden Problemkomplex zusammen. Aufgeschobene Sanierungen, mangelnde Verbrauchskontrollen, unklare Kompetenzbereiche und unpraktische Bedienkonzepte sind Ursachen für niedrige Wirkungsgrade und hohe Emissionen bzw. geringes Recyclingvermögen.

***Folge: Hohe Betriebs- und Instandsetzungskosten, hohe Umweltbelastungen und mangelnde Ressourcenbewahrung. Nicht zuletzt leidet auch häufig die Arbeitssicherheit.***

Rationelle, sparsame Industrieanlagen erlangen immer mehr eine größere Bedeutung, insbesondere im Hinblick auf schwindende Rohstoffressourcen. Hiermit werden Kosten gespart und zugleich klimaschädliche Emissionen vermieden. Durch den Einsatz moderner, energieeffizienter Anlagentechnik wird nicht zuletzt die Umwelt entlastet,

Moderne Technik macht es möglich, in Produktion Rohstoffe und Energie effizienter denn je zu nutzen.

Davon profitieren nicht nur die Wirtschaft und die Menschen, die in diesen Produktionsanlagen arbeiten, sondern auch die Umwelt, die nachhaltig entlastet werden kann. Entsprechend ergibt sich der Dreiklang aus reduzierten Betriebskosten, erhöhte Funktionalität der Anlagen und Umweltentlastung.

Dass sich Aluminium beliebig oft und praktisch ohne Wertverlust wiederaufbereiten lässt, ist zweifelsohne Hauptargument für dessen ökologischen Nutzen. Verglichen mit der Primäraluminiumherstellung werden für das Recycling von gebrauchten Produkten nur 5% des Energiebedarfes gebraucht. Es werden nicht nur die Rohstoffe (insbesondere Bauxit) geschont, sondern es fallen auch deutlich weniger Abfälle, Restprodukte und Emissionen an. Das Aluminiumrecycling ist letztlich das Kernelement der Kreislaufwirtschaft, das Grundprinzip nachhaltigen Wirtschaftens in der Aluminiumindustrie: Der Werkstoff wird nach Gebrauch dem Materialkreislauf wieder zugeführt.

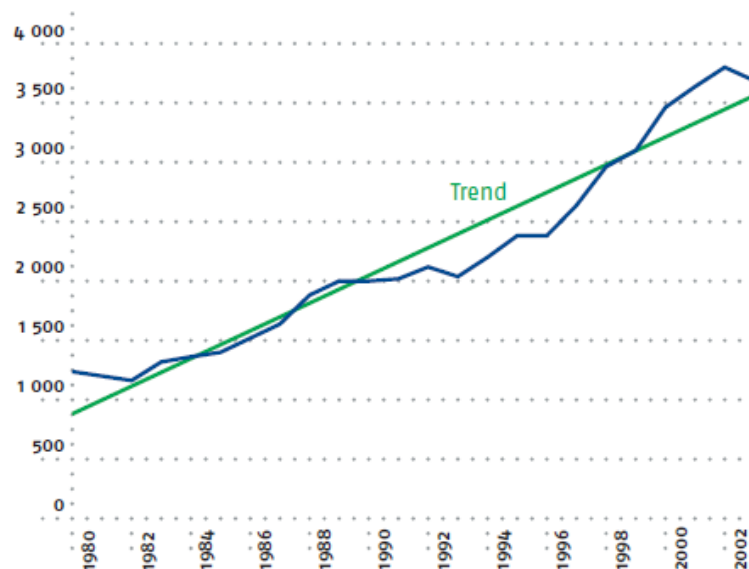


Abb. 1 Entwicklung von recycelten Aluminium in 1000 Tonnen per anno in Westeuropa

## 2.2. Projektziele

Industrieller Anlagenbau sollte den Focus auf ökologische Technologie erweitern bzw. an geeigneter Stelle ergänzen. Hieraus ergibt sich nicht zwangsläufig eine ökonomische Schieflage. Viele heute genutzte Technogien können unter diesem Gesichtspunkt mit entsprechenden Maßnahmen optimiert werden.

Die Realisierung eines automatisierten geschlossenen Kompakt-System zur Reinigung von Aluminium-Strangpressenwerkzeug--Systemen eröffnet einen Beitrag zum Umweltschutz, der Wertstofferhaltung und Arbeitsplatzsicherheit und nicht zuletzt eine Möglichkeit eine Senkung der Energiekosten zu schaffen.

Nachfolgenden Prämissen sind als Ziel dieses Projektes definiert worden:

- Erhöhung der Bediener-sicherheit
- Verminderung von Emissionen auf das notwendige Minimum
- Doppelte Betriebssicherheit
- Bis zu 50% Reduzierung der Reinigungszeit
- Erhöhung der Chemikalienstandzeit (NaOH)
- Reduzierung von Sondermüllkosten
- Verbesserung der Temperaturkontrolle
- Reduzierung von Personalkosten
- Die Lösung von wertvollem Restaluminium auf ein Minimum begrenzen

Aus diesem Grund besteht ein wesentlicher Ansatz zur Wertstofferhaltung darin, Aluminium gar nicht erst in Lösung zu bringen. Jedes Teil Aluminium, dass nicht in Lösung gebracht werden muss, verbessert die Bilanz der Wertstofferhaltung.

Beizen sind überwiegend Gefahrstoffe. Die Beizen und ihre Dämpfe sind ätzend. Die Anlagen sind daher gekapselt bzw. vollständig geschlossen auszuführen, womit starkes Ausdampfen der Bäder vermieden wird.

Die Unfallrisiken für Bedienpersonal müssen minimiert werden. Das soll durch einen sehr hohen Automatisierungsgrad und den daraus entstehenden Ausschluss des Faktors Mensch für das Hantieren von gesundheitsgefährdenden Stoffen realisiert werden.

### **3. Ergebnisse und Diskussionen**

#### **3.1. Stand der Technik**

##### **3.1.1. Konventionelle Reinigungsverfahren**

In den Aluminiumstrangpresswerken werden für die Produktion von Aluminiumprofilen sogenannte Presswerkzeuge benutzt. Durch die große Produktvielfalt und relativ geringe Standzeit der Werkzeuge müssen diese häufig ausgewechselt werden, je nach Presse bis zu 40 Stück/24 Stunden. Da bei jedem Produktionsgebrauch auch in jedem dieser Werkzeuge produktionsbedingte Aluminiumreste verbleiben, müssen diese entsprechend entfernt werden. Dieses ist zum Einen wichtig für den erneuten Gebrauch der Werkzeuge zum Anderen für das soweit wie mögliche Recycling des im Werkzeug befindlichen Aluminiums. Dieses ist insbesondere unter Berücksichtigung verknappter Rohstoffe und der energieintensiven Herstellung von Rohaluminium aus Bauxit von großer Bedeutung.

Um dieses Restaluminium aus den Werkzeugen zu entfernen, werden in den überwiegenden Aluminiumstrangpresswerken die Presswerkzeuge noch höchst konventionell gereinigt.

Das passiert in der Regel in offenen Bädern. Schmutz, Dämpfe und der Umgang mit aggressiven Alkalilaugen in offenen Bädern sind beim konventionellen Freibeizen von Strangpresswerkzeugen der tägliche Umgang. Dementsprechend sehen auch die bisherigen Anlagen aus. Die Gefährdung für das Personal ist entsprechend hoch.

In der Regel wird der Prozessablauf manuell durch Manpower-Aktivität für die Beladung, Umladung und Entladung der meist offenen Prozess-Behälter ausgeführt. Hierdurch werden große Defizite im Bereich Arbeitsplatzsicherheit, Betriebssicherheit und Umweltschutz, aber auch eine Ineffizienz im Arbeitsablauf deutlich.

Insbesondere ergeben sich dort enorme Gefährdungspotentiale durch die Arbeit mit bis zu 100°C heißer 30% Natronlauge (Siedepunkt bei 116°C) und den daraus resultierenden Dämpfen. Zusätzlich ergibt sich durch das Gewicht dieser Werkzeuge bei dem manuellen Handling eine weitere Personen- und Anlagengefährdung. Unter dem Gesichtspunkt von Wertstoffhaltung sind die großen Defizite bei dieser Art der Reinigung offensichtlich.

Generell geschieht der Reinigungsprozess durch das sogenannte „Ausbeizen“ des verbliebenen Restaluminiums im Werkzeug mit Hilfe von heißer Natronlauge (NaOH). Hierbei wird das Werkzeug in die heiße Prozesslauge gelegt und verbleibt dort solange, bis der Werkzeugkern entsprechend vom Aluminium befreit ist. Dieses ist vollkommen abhängig von der Prozesskenntnis und Disziplin des Anlagenbedieners. Es gibt keine Möglichkeit der Evaluation und keine reproduzierbare Prozessdokumentation. Bei diesem konventionellen Freibeiz-

Prozess geht dann das Aluminium in der Lauge nahezu vollständig in Lösung und ist somit als Wertstoff nur durch aufwändige und dadurch kostenintensive Wiederaufbereitung zu verwenden. Wertvolles Restaluminium kann so nicht genutzt werden. Zusätzlich wird die Prozesslauge schnell „verbraucht“ und zu teurem Sondermüll.

Für den konventionellen Strangpresswerkzeugreinigungsprozess bedeutet das, dass eine höhere Laugenkonzentration und eine höhere Temperatur den Beizprozess beschleunigen. Aber als Folge daraus, wird die Gefährdung für Umwelt und Personal erhöht. Entsprechend müssen größere Vorkehrungen getroffen werden, um die Gefährdung auf das notwendige Minimum zu reduzieren.

Hohe Absaugleistungen bei nicht geschlossener Anlagentechnologie und daraus resultierend ein hoher Energieverbrauch– nicht zuletzt durch sehr lange Beizzeiten verursacht – sind ein weiteres Kennzeichen der konventionellen Reinigungsverfahren.



**Abb. 2** Beispiel einer konventionellen Reinigungsanlage

### 3.2. Grundlagen

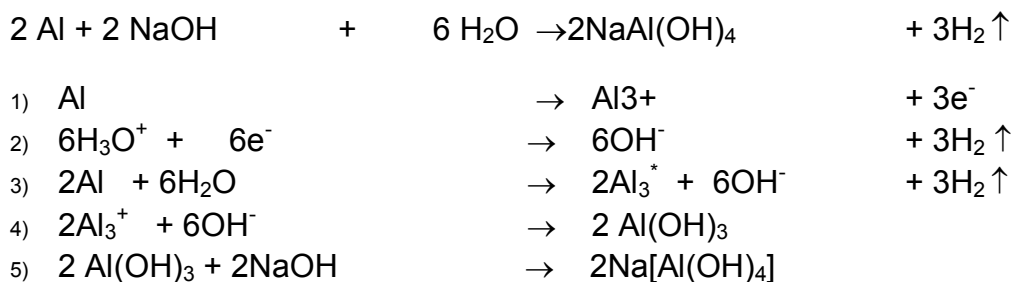
Aluminium reagiert unter normalen Umständen nicht mit Wasser, da es sich innerhalb kürzester Zeit (Sekunden) mit einer Schutzschicht aus Aluminiumoxid überzieht bzw. schon vorher über diese verfügt. Durch Zusatz von Natronlauge wird die Ausbildung einer Schutzschicht verhindert. Die schützende Oxidschicht reagiert mit den OH-Ionen zu einem löslichen Komplex – Aluminat -. Somit kann eine Reaktion zwischen Al und H<sub>2</sub> weiterschreiten. Daraus ergibt sich, dass das amphotere Aluminiumhydroxid Al(OH)<sub>3</sub> unter der Bildung von Aluminat (Al(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>) in Lösung geht. Es kann zu einer vollständigen Auflösung kommen.

Die molare Reaktionsenthalpie hängt nicht unwesentlich davon ab, wie viel NaOH in wie viel Wasser gelöst wurde.

Löst man NaOH in einer bereits ziemlich konzentrierten NaOH Lösung, so ist nicht mehr genügend "freies" Wasser vorhanden. Die Ionen können nur noch partiell hydratisieren, und die molare Hydratationsenthalpie nimmt ab. Kurz vor der Sättigung wird die Lösereaktion sogar endotherm, was der Grund dafür ist, dass die Löslichkeit von NaOH mit steigender Temperatur zunimmt.

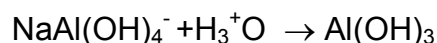
#### 3.2.1. Reaktionsgleichungen

Reaktionsgleichung für Natriumaluminat (Wasserstoff entweicht als „Knallgas“):



1)Oxidation      2)Reduktion      3)Redoxreaktion 4/5)Ionenreaktion

Reaktionsgleichung für Aluminiumhydroxid:



Reaktionsgleichung für Aluminiumoxid:





### 3.2.2. Leitfähigkeit

Für die Konzentrationsmessung von gelösten Stoffen mit Hilfe einer Leitfähigkeitsmessung müssen zwei Faktoren zutreffen bzw. untersucht werden.

- die Leitfähigkeit des zu bestimmenden Stoffes muss bekannt sein
- die Leitfähigkeit des Lösungsmittels muss bekannt sein

Ist der zu bestimmende Stoff ungeladen, d.h. er hat keine Leitfähigkeit, kann keine Leitfähigkeitsmessung eingesetzt werden. Jede wässrige Lösung von Salzen gleicher Konzentration hat eine spezifische Leitfähigkeit. Zu den Stoffen, die eine hohe Leitfähigkeit besitzen, gehören gut lösliche Salze und starke Laugen, wie z.B. Natronlauge.

Bei steigender Konzentration nimmt die Leitfähigkeit linear zu. Ab einer spezifizierten Konzentration ( bei jedem Stoff unterschiedlich), beginnt die Leitfähigkeit langsamer anzusteigen, stagniert dann, um bei weiterer Konzentrationserhöhung wieder abzunehmen. Das erklärt sich dadurch, dass bei zunehmender Konzentration die Lauge nicht mehr so schnell zerfällt – die Aktivität verringert sich. Zusätzlich beeinflussen sich die Ionen so stark und verhindern eine freie Beweglichkeit, dass trotz vollständiger **Dissoziation\*** bei Salzen die Leitfähigkeit sinkt. Entsprechend ist es möglich, von der elektrischen Leitfähigkeit auf die Konzentration zurückzuschließen. Im Falle der Reinigungsanlage bedeutet das für die Grenzwerte, dass die elektrische Leitfähigkeit der Natronlauge abfallend überwacht wird – ausgelöst durch die Verdampfungs- Aufkonzentration und die Anreicherung von gelöstem Aluminium – und die des Spülwassers aufsteigend.

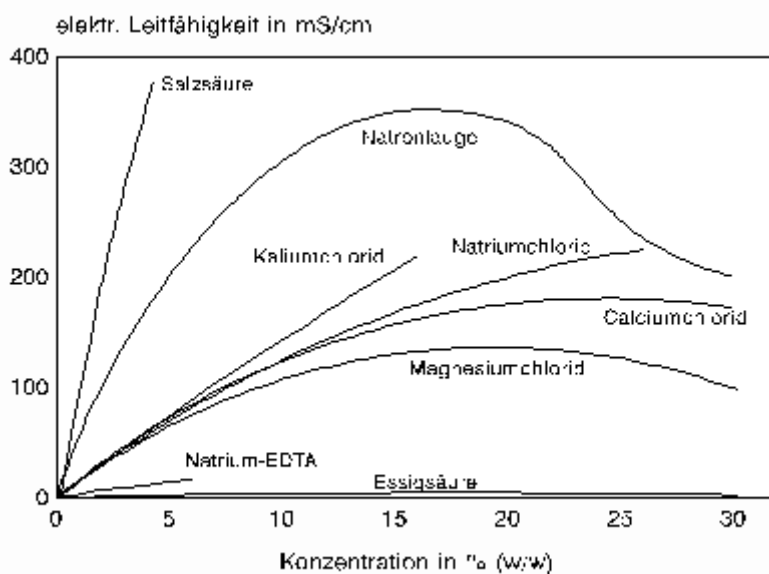


Abb. 3 elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Medium-Konzentration

Unterschied zwischen der Leitfähigkeit von  $H^+$  und  $OH^-$ :

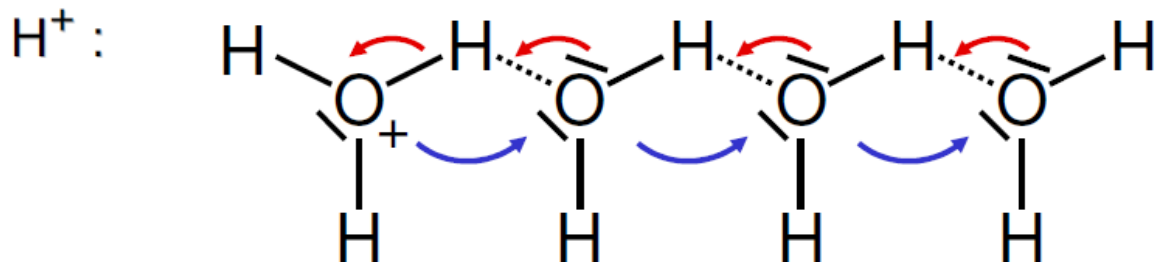


Abb. 4 Leitfähigkeit von  $H^+$

Es findet eine sehr schnelle, aber kein langsamer Teilchentransport statt

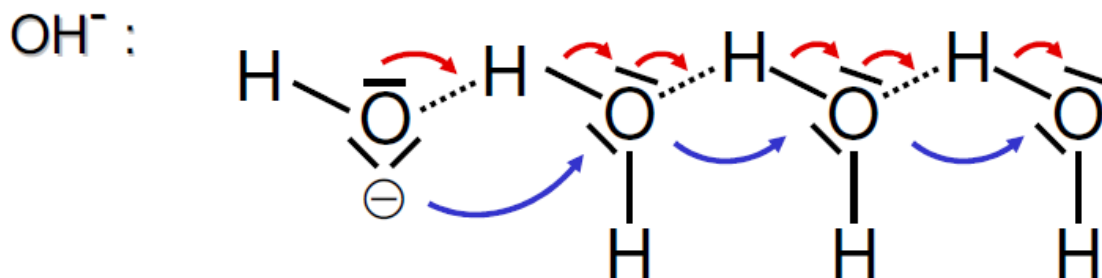


Abb. 5 Leitfähigkeit von  $OH^-$

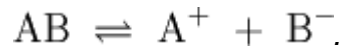
Auch hier findet nur eine Ladungsübertragung statt, mit dem Unterschied, dass  $H^+$  ist leichter von  $H_3O^+$  abspaltbar als von  $H_2O$

*\*Wikipedia“*

*Die **elektrolytische Dissoziation** ist der reversible Zerfall einer Verbindung in Anionen und Kationen in einem Lösungsmittel. Solche Lösungen nennt man Elektrolyte. Eine solche Dissoziation findet beim Lösen von Salzen in Wasser statt. In diesem polaren Lösungsmittel liegt das Gelöste in Form von freibeweglichen Ionen vor. Diese freibeweglichen Anionen und Kationen führen zu einer elektrischen Leitfähigkeit des Wassers.*

*Bei den sogenannten echten oder permanenten Elektrolyten sind die Ionen bereits im Festkörper ( $\rightarrow$  Ionengitter) vorhanden. So liegen bei festem Kochsalz bereits im Gitter  $Na^+$  und  $Cl^-$ -Ionen vor. Beim Auflösen des Salzes in Wasser bilden sich im Wasser nun freibewegliche Ionen. Bei der Dissoziation von Salzen in Ionen wird die recht hohe Gitterenergie des Kristalles durch Hydratationsenergie beim Lösungsvorgang aufgebraucht.*

*Bei den sogenannten potentiellen Elektrolyten liegen bei den Reinsubstanzen keine ionischen Bindungen vor. Als Reinsubstanz sind sie Nichtleiter. Beim Einbringen dieser Reinsubstanzen (AB) in ein Lösungsmittel erfolgt die Bildung von Ionen durch eine chemische Reaktion zwischen Gelöstem und Lösungsmittel:*



*Voraussetzung für eine solche Reaktion ist eine polare Bindung zwischen den Teilen A und B der Verbindung (AB) und ein polares Lösungsmittel. Wird beispielsweise reine Essigsäure in Wasser gegeben, bilden sich als Kationen  $H_3O^+$  und die Anionen  $H_3C - COO^-$*

*Diverse Laborversuche haben ergeben, dass der Einsatz einer Leitwertmessung sinnvoller als eine PH-Messung ist. Aufgrund dieses Ergebnisses, wird anstatt der PH-Messung, die Dichte und der Leitwert als Indikator für die Standzeit der Verbrauchsmedien spezifiziert.*

## **4. Ergebnisse und Diskussionen**

In einem ersten, von WIA ausgeführten Projektabschnitt bestand die Notwendigkeit darin, grundlegende Informationen über physikalische und chemische Zusammenhänge zu ermitteln. Dieses bezog sich im Wesentlichen auf die Erarbeitung von Prozessparametern für einen soweit möglichen automatischen Ablauf und der Zielsetzung, den Energie- und Rohstoffverbrauch auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren. Dazu wurden diverse Untersuchungen bei potentiellen Pilotkunden vor Ort und im Labor durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass in konventionellen Anlagen, die Bedienung bzw. Fahrweise unterschiedlich sein kann. Das Betraf im Wesentlichen unterschiedliche „Fahrweisen“ in Bezug auf Arbeitstemperatur, Konzentration und Standzeit der Natronlauge. Ferner bestand eine Aufgabe in der Projektbearbeitung darin, Erkenntnisse durch Laborversuche in eine industrielle und praxisorientierte Pilotanlage umzusetzen.

### **4.1. Anlagendesign**

Basis für die Entwicklung dieser Anlage ist das Prinzip der „Waschmaschine“. Statt das Werkstück zwischen offenen Bädern manuell hin und her zu transportieren, werden hier die Prozessflüssigkeiten zu dem geschlossenen Prozessbehälter gefördert, in welchem das Werkstück bzw. die Werkstücke durch Werkzeugkörbe positioniert ist/sind. Entsprechend des Prozessablaufes werden aus den geschlossenen Vorratsbehältern die benötigten Prozess- und Spülflüssigkeiten in den Prozessbehälter gepumpt. Zusätzlich soll für das mechanische Lösen des Restaluminiums noch eine Ultraschallquelle genutzt werden.

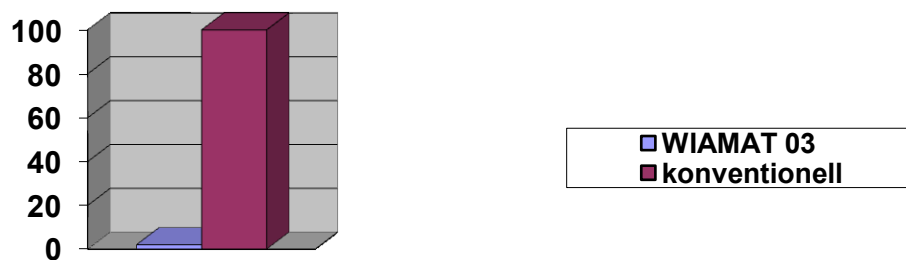
Auf Grundlage dieses Konzeptansatzes sollte der Beizprozess aus der chemischen und mechanischen Bearbeitung bestehen. Durch die stationäre Positionierung des Werkstücks innerhalb des Prozessbehälters lassen sich chemische und physikalische Prozessparameter sowie die Prozessführung optimieren.

Die Laugenkonzentration und die Arbeitstemperatur müssen prozesstechnisch sinnvoll abgestimmt werden, um den Beizprozess effizienter zu machen.

Alle beheizten Behälter sind so isoliert, dass die Wärmeverluste auf ein notwendiges Minimum begrenzt werden.

Um das System komplett automatisch ablaufen zu lassen, wird für das Handling innerhalb der Anlage ein programmgesteuerter Manipulator integriert. Die Bedienerhandhabung für dieses System besteht nur darin, den Werkzeugkorb an einer Übergabe-Position zur Reinigungsanlage abzustellen und das System zu starten. Vorher müssen durch den Bediener die gewählten Prozessparameter spezifiziert und eingegeben werden. Der weitere Ablauf verläuft dann bis zur

Ausschleusung der gereinigten Werkzeuge vollautomatisch, ohne dass ein zusätzlicher Eingriff vom Bediener notwendig wird. Der Bediener kommt zu keinem Zeitpunkt des Prozessablaufes mit gefährlichen Flüssigkeiten oder Gasen in Berührung. Das System ist in sich ein vollkommen geschlossenes System. Eine sorgfältig dosierte Durchlüftung des Prozessbehälters wird, durch die aufgrund der chemisch bedingten Knallgasbildung während des Beizvorgangs, unerlässlich.



**Abb. 6 Diagramm Gefährdung am Arbeitsplatz**

Detailliertere Information sind im Abschnitt Wasserstoff beschrieben unter Punkt 4.10.

Der auf ein sicheres Minimum reduzierte Wrasenstrom wird mittels Abluftsystem über Dach ausgeleitet. Um den Ex-Bereich innerhalb der Anlage zu minimieren und das Betreiben der Anlage unter der Druckbehälterverordnung zu vermeiden, ist vom ursprünglichen Ansatz eines mehr oder minder geschlossenen Drucksystems abgewichen worden. Stattdessen wurde ein sogenannter „primärer Ex-Schutz“ projektiert. Das System bleibt ein in sich geschlossenes System. Entstehende Prozessüberdrücke werden während des Ablaufes durch Gaspendeln und Ableiten über einen Abluftfilter ausgeglichen. Die gesamte Anlage steht in einer Sicherheitsauffangwanne nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG) § 19, um auftretende Leckagen aufzufangen. Dieses wird mittels eines Sensors in der Auffangwanne überwacht und bei einer Leckage sofort zur Anzeige gebracht.

Nach Beendigung des Beizprozesses wird die Beize automatisch in den Vorratsbehälter zurückgepumpt. Das für die Spülung notwendige Spülwasser wird aus einem Vorratsbehälter automatisch in den Prozessbehälter gefördert. Dieser Vorgang wiederholt sich zweimal, jeweils einmal für Spülwasser 1 und Spülwasser 2.

Das Spülwasser kann solange benutzt werden, bis ein definierter Leitwert überschritten wird (siehe Abschnitt Grundlagen – Leitwert). Das „gesättigte“ Spülwasser wird dann als Ansatz bzw. Ausgleich der entstandenen Verdampfungsverluste für Natronlauge wieder dem Prozess zugeführt. Nach Beendigung der Reinigung wird das Werkzeug automatisch mittels Manipulator aus

dem Prozessbehälter entnommen und auf die dafür vorgesehene Ausschleusungsposition abgelegt.

Ein neuer, mit Werkzeugen bestückter Werkzeugkorb, kann unmittelbar danach wieder in den Prozess eingeführt und entsprechend das Automatikprogramm gestartet werden.

Grundsätzlich besteht die Anlage aus nachfolgenden Komponenten:

- Prozessbehälter
- Vorlagebehälter für Natronlauge, Spülwasser 1 und Spülwasser 2
- Auffangwanne nach WHG (Wasserhaushaltsgesetz) § 19
- Zuluft- und Abluftsystem
- Pumpensystem mit Rohrleitungen und Armaturen
- Meßaufnehmersystem
- Schaltschrank mit Automatisierungssystem



**Abb. 7 Pilotanlage in Werkstatt**



Abb. 8 Pilotanlage beim Pilotkunden

## 4.2. Ablaufbeschreibung

Grundsätzlich besteht ein Reinigungsablauf aus mehreren Prozessschritten. Kern des Konzeptes ist das Prinzip einer häuslichen Geschirrspülmaschine. Die für die Reinigung notwendigen Medien werden dem zu reinigenden Produkt bzw. Gut zugeführt und nicht das Produkt. bzw. Gut wird von Medium zu Medium transportiert.

Ein Reinigungszyklus beginnt mit der Beladung des Prozessbehälters. Nach der Beladung wird der Behälter automatisch geschlossen und anschließend automatisch mit dem vorgeheizten Reinigungsmedium Natronlauge gefüllt. Ist der Prozessbehälterfüllstand erreicht, startet der Reinigungsprozess. Das Reinigungsmedium Natronlauge wird stetig über einen Bypass mittels einer Pumpe im Kreislauf gepumpt und die Ultraschallfunktionalität dazu geschaltet. Die Vorlagetemperatur des Reinigungsmediums Natronlauge wird so gewählt, dass eine gewählte Arbeitstemperatur für den Reinigungsprozess eingehalten werden kann. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Wärmeenergie des Reinigungsmediums Natronlauge zur Erwärmung der zu reinigenden Werkzeuge gebraucht wird. Im Reinigungsmedium Natronlauge kommt es entsprechend zu einem Temperaturabfall, da die von Außen zugeführten Werkzeuge eine niedrigere Temperatur als das Reinigungsmedium besitzen. Dieser Temperaturabfall wird dann u.a. durch die aus dem Prozess entstehende und sowieso zur Verfügung stehende exotherme Energie ausgeglichen. Dieses erfolgt entsprechend unserer Philosophie exotherme Energie effizient zu nutzen und nicht wie häufig beobachtet, entstehende überschüssige Energie unsinniger Weise mit zusätzlicher erzeugter Kälteenergie wieder zu vernichten. Die Funktionalität des Umpumpens wird genutzt, um zu gewährleisten,

dass die zu reinigenden Teile und Oberflächen soweit es möglich ist, in gleichmäßiger Intensität und Qualität mit dem Reinigungsmedium in Berührung kommen zu lassen. Auch hier wird zum Ausgleich von Temperaturabfällen, die anfallende Energie automatisch mit genutzt. Ein weiterer Temperaturabfall, der nicht durch die entstehende exotherme Energie ausgeglichen werden kann, wird durch das Zuschalten von Elektroheizkörpern im Prozessbehälter kompensiert.

Nach Ablauf der gewählten Reinigungszeit, wird das Reinigungsmedium Natronlauge aus dem Prozessbehälter zurück in den Vorlagebehälter evakuiert bzw. zurück gepumpt. Ist dieses erfolgt, wird das vorgewärmte Spülmedium Spülwasser 1 zum Vorspülen der gereinigten Werkzeuge in den Prozessbehälter gefördert. Auch hier wird das Spülmedium Spülwasser 1 entsprechend einer vorgewählten Zeit im Kreislauf gepumpt. Temperaturabfälle sind nur unwesentlich vorhanden, da die Werkzeuge durch den vorherigen Reinigungsschritt noch aufgeheizt sind. Nach Ablauf dieses Schrittes wird das Spülwasser 1 auch wieder zurück in den Vorlagebehälter Spülwasser 1 gepumpt. Anschließend beginnt der Schritt Spülen mit Spülwasser 2. Hier wird das vorgewärmte Spülwasser 2 aus dem Vorlagebehälter Spülwasser 2 in den Prozessbehälter gefördert. Die Funktionalität wiederholt sich entsprechend des Schrittes Spülwasser 1. Ist dieses erfolgt, öffnet sich der Prozessbehälter und der Korb mit den behandelten Werkzeugen wird auf eine Abtropfposition transportiert. Nach Ablauf einer vorgewählten Abtropfzeit, wird der Korb mit den Werkzeugen aus dem Reinigungssystem automatisch mit dem Manipulator ausgeschleust. Ein Reinigungsvorgang kann dann von Neuem beginnen.

### **4.3. Konzentration der Natronlauge**

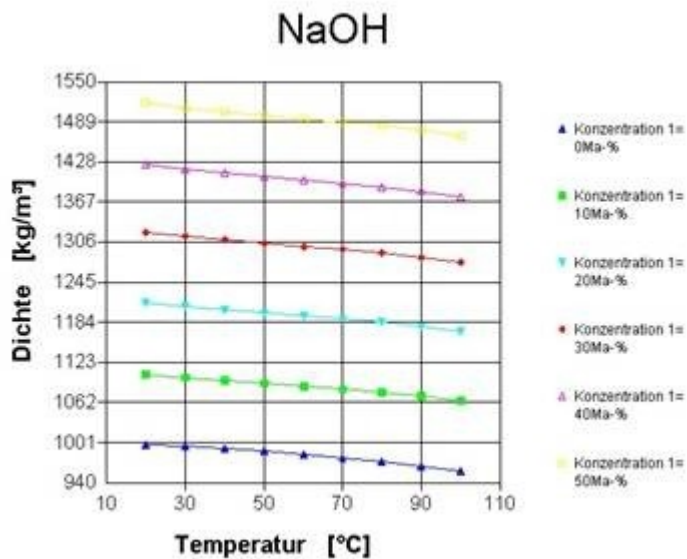
Versuche haben ergeben, dass sich bei „niedrigen“ NaOH-Konzentrationen eine für den Prozess geeignete Reaktivität einstellt.

Für diesen Reinigungszweck wird NaOH mit einer Konzentration von 25-35 % (250-350g/l) benutzt.

Die Wahrscheinlichkeit einer Auskristallisierung der NaOH-Lösung bei höheren Konzentrationen und niedrigeren Temperaturen steigt - was zu vermeiden ist.

In Abhängigkeit der NaOH- Konzentration Temperatur ändert sich die Dichte.





**Abb. 9 Dichte in Abhängigkeit der NaOH-Konzentration und Temperatur**

Durch die Reaktion von NaOH und Aluminium verringert sich die Konzentration der Natronlauge. Durch den Betrieb der Anlage mit Temperaturen von ca. 80°C und den daraus entstehenden Wasserverlusten, kann diese Konzentrationsverringering teilweise wieder ausgeglichen werden. Da aber durch die Verdampfungsverluste grundsätzlich ein Flüssigkeitsverlust stattfindet, wird diese je nach Anforderung durch Wasser oder frische NaOH oder beidem ergänzt.

#### 4.4. Arbeitstemperaturen

Die Versuche haben ergeben, dass sich eine höhere Arbeitstemperatur positiv auf die Reinigungsgeschwindigkeit auswirkt. Die Arbeitstemperatur sollte aber unbedingt unterhalb von 100°C gehalten werden, da sich sonst zu große Verdampfungsverluste ergeben und sich dadurch analog die Reinigungslösung hoch konzentrieren kann. Als Ergebnis unserer Versuche hat sich eine sinnvolle und praktikable Arbeitstemperatur von 75 – 85°C herausgestellt. Diese Temperaturen wirken sich auch positiv auf Viskosität und Schlammbildung aus. Höhere Temperaturen bedeuten geringere Viskosität und Ansatzbildung. Insbesondere muss in diesem Zusammenhang Ansatzbildung, Auskristallisation und Verdampfung bedacht bzw. auf ein notwendiges Mindestmaß reduziert werden, da dieses einen erheblichen Einfluss auf das Anlagenmaterial und daraus folgend, sich negative Umwelteinwirkungen, eine geringere Betriebsbereitschaft und geringere Lebensdauer der Anlage/Komponenten ergeben. Als weitere negative Begleiterscheinung bei Temperaturen von > 100°C erhöht sich die Gefahr von unzulässigen Emissionen. Diese ergeben sich zwangsläufig durch die dann entstehende höhere Verdampfung.

## 4.5. Messungen

### Zitat

*„Was du nicht messen kannst, kannst du nicht lenken“.*

*Peter Drucker US-amerikanischer Ökonom*

Aus dieser Erkenntnis heraus ergibt sich, dass allen notwendigen Prozessparameter messtechnisch erfasst und dokumentiert werden müssen. Dieses wird in der Anlage konsequent umgesetzt. Alle Messstellen werden in einer Database geloggt und können somit zur Prozesskontrolle, Evaluierung und späterer Prozessoptimierung genutzt werden.

Das bezieht sich im Wesentlichen auf Temperaturen, Füllstände, Wasserstoffkonzentration, Dichte und Leitfähigkeit der Flüssigkeiten. Diese werden dann Zeit- und Ereignisabhängig erfasst. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden entsprechend folgerichtig mit Hilfe der Steuerung zur Optimierung des Prozesses genutzt.

Hier ist darauf hinzuweisen, dass bei der Ermittlung von Prozessparametern nicht nur die physikalischen Messungen genutzt werden, sondern auch die Bedienererfahrung. Beides zusammen ergibt dann die richtige Auswahl relevanter Prozessparameter. Durch den Einsatz der diversen Messungen ist eine Basis und Evaluierungsmöglichkeit geschaffen worden, um überhaupt einen sinnvollen Einfluss auf den Prozess auszuüben.

## 4.6. Prozessstabilität

Für einen soweit wie möglichen stabilen Prozess müssen reproduzierbare Prozessbedingungen mit stabilen Prozessparametern geschaffen werden. Hierzu gibt es 2 Lösungsansätze:

- Zum Einen den Batchprozess und zum Anderen den kontinuierlichen Prozess.

Ferner müssen die Konzentration der Natronlauge und die Menge des gelösten Aluminiums quantitativ ermittelt werden, um das Lösungsvermögen und die Reaktivität der Natronlauge zu kontrollieren. In jedem Fall ist ein Ausfällen des Natrium-Aluminats zu vermeiden. Jedes Ausfällen würde den ordnungsgemäßen Betrieb verhindern, da das ausgefallene Natrium-Aluminat Rohrleitungen blockieren, Pumpen, Ventile und andere produktberührte Komponenten beschädigen würde.

## **4.7. Prozess**

Chemisch besteht der Reinigungsprozess grundsätzlich aus dem Lösen des Aluminiums in Natronlauge. Als mechanische Unterstützung wird Ultraschall und daraus resultierend Kavitation, das Entstehen des Wasserstoffes (Blasenbildung) und die Systemfunktion des Umpumpens im Prozessbehälter genutzt. Die Funktionen Ultraschall und Umpumpen fließen als zusätzliche Maßnahmen zur Verkürzung der Reinigungszyklen in die Anlageneffizienz mit ein.

### **4.7.1. Batchprozess**

Batchprozess bedeutet für diese Art der Aluminium-Presswerkzeugreinigung, dass das Reinigungsmedium Natronlauge nach dem Erreichen eines Aluminat-Sättigungsgrades komplett erneuert wird. In diesem Falle wird die Natronlauge bei nachlassender Reaktivität komplett gegen neue ausgetauscht. Nachteil dieses Prozessablaufes ist, dass die frische Natronlauge wieder auf Arbeitstemperatur ( $\delta T$  Raumtemperatur  $>$  ca. 70-85°C) erwärmt werden muss und die notwendigen Arbeitspunkte innerhalb des Prozesses nicht konstant und somit schwer zu reproduzieren sind. In der Zeit des Aufheizens können keine Werkzeuge gereinigt werden.

### **4.7.2. Kontinuierlicher Prozess**

Im Gegensatz zum Batchprozess wird versucht, gleichbleibende Prozessbedingungen zu schaffen. Das bedeutet hier, dass ein Prozessfenster mit Arbeitsparametern geschaffen wird, um diese Prozessbedingungen zu erreichen. Hierzu werden die Messgrößen Dichte und Leitfähigkeit benutzt. Die Schwierigkeit besteht aber bei diesem Prozess darin, Verdampfungsverluste, Zunahme der Dichte durch die Verdampfungsverluste und Lösung des Aluminiums industriemesstechnisch zu erfassen und tendenziell richtig zu spezifizieren und daraus resultierend, die Anlagenparameter zu optimieren. Die Anlage muss so gesteuert werden, dass die Verdampfungsverluste durch Wasser in regelmäßigen Abständen ausgeglichen werden und die Konzentration der Natronlauge auf den gewünschten Arbeitspunkt angepasst wird. Entsprechend müssen Teile der benutzten Natronlauge in ebenso regelmäßigen Abständen ausgetauscht bzw. erneuert werden. Daraus ergeben sich dann mehr oder weniger gleichbleibende Bedingungen, durch diese dann der Prozess reproduzierbar geregelt und gesteuert wird.

## 4.8. Reinigungsvorgang

Das Ergebnis der Reinigung und daraus resultierend der Erfolg ist von den gewählten Anlagenparametern abhängig, die in einer ausgewogenen ökologischen und ökonomischen Balance gebracht werden müssen. Dadurch ergibt sich folgerichtig, dass sich durch die Einstellung der zur Verfügung stehenden Variablen der daraus für diese Anlage resultierende Prozessablauf einstellt.

Unter Berücksichtigung der chemischen und physikalischen Zusammenhänge, müssen die nachfolgenden Punkte berücksichtigt werden.

Bei der Erhöhung der Temperatur für die Wasch- bzw. Reinigungslauge ergibt sich eine höhere Reinigungsgeschwindigkeit und eine geringere Viskosität.

- je höher Temperatur von Wasch- bzw. Reinigungslauge (NaOH ca. 30%)
  - desto höher die Reaktionsgeschwindigkeit
  - desto höher die Verdampfung von Wasser
    - desto größer Emissionen durch mitgerissene Aerosole
    - desto größer Ablagerungen im Abluftsystem durch Verdampfung
    - desto größer die Aufkonzentration der Natronlauge (NaOH > 30%)
      - desto geringer dann Reaktivität und Reaktionsgeschwindigkeit
- je geringer Temperatur von Wasch- bzw. Reinigungslauge (NaOH ca. 30%)
  - desto größer die Viskosität
  - desto größer die Schlamm- bzw. Sedimentbildung an Behälterböden
    - desto geringer Ablagerungen im Abluftsystem durch Verdampfung
    - desto geringer die Aufkonzentration der Natronlauge (NaOH > 30%)
      - desto größer dann Reaktivität und Reaktionsgeschwindigkeit

## 4.9. Wasserstoff

Um die Entstehung einer überhöhten Wasserstoffkonzentration zu vermeiden, wird am Entstehungsort (oberhalb des Flüssigkeitsspiegels Prozessbehälter) Frischluft beigemischt bzw. über Frischluftklappen am Prozessbehälter zugefügt. Dadurch können die sonst notwendigen EX-Zonen auf ein Minimum reduziert werden. Entsprechendes gilt dann auch für wiederkehrende Prüfungen und Wartungsintervalle an dieser Stelle. Durch die geregelte Beimischung von Frischluft, wird die bei der Reaktion entstehende Wasserstoffkonzentration immer unterhalb der

UEG (untere Explosionsgrenze) gehalten. Das bedeutet, dass in der Anlage ein sogenannter „primärer „Ex-Schutz“ umgesetzt worden ist. Unter normalen Betriebsbedingungen ist keine explosive Atmosphäre vorhanden. Die Wasserstoffkonzentration wird kontinuierlich überwacht. Sollte die Wasserstoffkonzentration doch einmal den Schwellenwert der unteren Explosionsgrenze überschreiten, werden die Medien voneinander getrennt – Natronlauge wird aus dem Prozessbehälter in den Vorlagebehälter zurückgepumpt. Das gleiche geschieht auch bei Überschreitung des erlaubten Temperatur-Schwellenwertes  $< 95^{\circ}\text{C}$ .

Um hier eine sichere Wasserstoffmessung zu garantieren, ist diese redundant ausgeführt. Das bedeutet in diesem Fall, dass 2 Messungen installiert worden sind.

Falls das Trennen der Medien nicht mehr möglich ist, – sei es durch Ausfall der elektrischen Energieversorgung der Anlage oder ähnlichem ( Pumpenausfall) , werden automatisch Entlüftungsklappen am Prozessbehälter( Wasserstoff-Entlüftung der Prozessbehälter) und Kühlwasserventile (Medienkühlung im Prozessbehälter) geöffnet. Diese Klappen und Ventile sind „Federkraft-öffnend“, um in jedem Fall bei Spannungsausfall, die Sicherheit zu garantieren.



**Abb. 10 Platzierung Wasserstoffmessung**

Die Menge des bei dem Prozess entstehenden Wasserstoffes ist im Wesentlichen von den nachfolgenden Größen abhängig:

- Reaktionsvermögen der Natronlauge
- Menge des aufzulösenden Aluminiums

Beide Prozessgrößen müssen in einen zeitlichen Bezug gesetzt werden. Dabei besteht die Schwierigkeit, die entstehende Wasserstoffkonzentration pro Zeiteinheit zu spezifizieren. Reaktion und Wasserstoffentstehung laufen nicht linear. Bei gleicher Aluminiummenge ergeben große Aluminiumoberflächen größere Mengen Wasserstoff pro Zeiteinheit, kleine Aluminiumoberflächen ergeben kleinere Mengen Wasserstoff pro Zeiteinheit. Insbesondere ist dieses bei den verschiedenen Werkzeuggeometrien und entsprechender Beladung der Anlage zu berücksichtigen. Die Beladungsmenge der Anlage muss immer in diesem Zusammenhang angepasst werden.

Um einen primären Ex-Schutz (Minimierung der Wasserstoffkonzentration unterhalb 40% UEG – UEG untere Explosionsgrenze) zu garantieren, muss die Abluftleistung bzw. Frischluftzufuhr auf die zu erwartende Wasserstoffkonzentration abgestimmt werden. Hierbei ist unbedingt in Bezug auf die Sensoren der Wasserstoffmessung und die Neigung des Wasserstoffes auf Selbstentzündung, auf die richtige Dimensionierung (Strömungsgeschwindigkeiten, Dimensionierung der Abluftleitung, Druckverluste) zu achten und dieses entsprechend zu projektieren.

Dass bedeutet, dass der Arbeitsbereich vorab festgelegt werden muss. Insbesondere bezieht sich dieses auf eine max. Menge von Aluminium pro Reinigungsvorgang unter Berücksichtigung der Werkzeuggeometrien.

Auch hier ist dafür zu sorgen, dass das Aluminium an und in den Werkzeugen - soweit möglich - vorher mechanisch entfernt wird. Aufzulösendes Aluminium wird dann auf ein notwendiges Minimum reduziert.

#### **4.10. Natriumaluminat-Anteil und Abhängigkeiten**

Aluminate sind Salze des Aluminat-Ions  $[Al(OH)_4]^-$ . Beispielsweise entstehen durch das Lösen von Aluminium in Natronlauge Natrium-Aluminate, die in der Wasserreinigung als Fällungsmittel (Phosphatelimination) eingesetzt werden können. Calcium- und Bariumaluminate sind Bestandteile von Klinker und Zement.

Durch das Zusammenführen von Aluminium und Natronlauge mit entsprechenden Parametern wie Konzentration und Temperatur, wird der Reaktionsprozess angestoßen.

Die Temperatur der Prozesslauge sollte unbedingt so gewählt werden, dass keine Verdampfung stattfindet. Insofern sind Temperaturen zwischen 70-85°C geeignete Prozessparameter für diesen Prozess. Bei diesen Temperaturparametern werden eine adäquate Reaktionsgeschwindigkeit und Viskosität gewährleistet. Ein sich bildender Schlamm muss in einem Parameterfenster unterhalb der Natriumaluminat-Ausfällung gehalten werden, um diese Ausfällungen in jedem Fall zu vermeiden.

Generell ist hier darauf hinzuweisen, dass sich bei auftretender Schlamm- und Krustenbildung und hohen Temperaturen eine Verkrustung an Behälterwänden und Heizkörpern von Aluminiumverbindungen bilden kann. Dies führt dann zu Problemen bei Wärmeübertragungen und insofern zu einer energetischen Ineffizienz. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass Heizkörper durch diese Ablagerungen und die entsprechende nicht abzugebende Wärme, durchbrennen können. Die Folge könnte ein Anlagenstillstand sein.

Durch die diversen Messreihen konnten generelle Zusammenhänge erkannt werden. Insbesondere bezieht sich dieses auf die Reaktivität der Natronlauge in Abhängigkeit von Temperatur, Wasserstoffkonzentration und des Anteiles von Natriumaluminat (Leitfähigkeit) in der Arbeits-Natronlauge .

Hierbei wurde das Reaktionsvermögen des Mediums in Abhängigkeit der NaOH-Konzentration und des Sättigungsgrades mit Natriumaluminat nachgewiesen. Die Versuchsergebnisse haben auch gezeigt, dass eine Zunahme des gelösten Anteils von Natriumaluminat in der Natronlauge zur Reduzierung der Reaktivität führen.

- Aluminium + NaOH bei ca. 30%(300g/l)
  - starker exothermer Prozess – Auflösung von AL
    - bis 70 Al g/l
  - sehr starke Reaktion
    - bis 100 Al g/l
  - nachlassende Reaktion
    - bis 130 - 150 Al g/l
  - weiter nachlassende Reaktion
    - > 150 Al g/l

Entsprechend bedeuten diese Ergebnisse aber auch, dass der günstigste Arbeitspunkt für den Anteil des Natriumaluminats sich im Bereich von 70 – 130 Al g/l befindet. Hierbei sei aber auch noch einmal darauf hingewiesen, dass diese Ergebnisse immer in einer praxisbezogenen Kosten-Nutzen-Rechnung überprüft werden müssen. Nachlassende Reaktivität und daraus resultierende verlängerte Prozesszeiten sollten in jedem Fall immer unter diesem Kontext berücksichtigt werden.

Zusätzlich konnte durch Tests nachgewiesen werden, dass durch die Messung der Wasserstoffkonzentration, eine weitere Möglichkeit zur Optimierung der Anlage vorhanden ist.

Verdunstungsverluste der Natronlauge können durch Wasser wieder ausgeglichen werden. Daraus ergibt sich eine verdünnte NaOH-Lauge und wieder größere Reaktionsgeschwindigkeit.

Weitere Versuchsreihen zeigten, dass sich durch die Messung der Leitfähigkeit und der Temperaturen, unmittelbar, relativ präzise Rückschlüsse auf den Anteil des gelösten Aluminiums in der Natronlauge machen lassen.

#### **4.11. Ultraschall**

Die vom Ultraschall-Generator erzeugte Energie (Frequenzbereich oberhalb von 20 kHz) wird durch den Schwinger in mechanische Energie umgewandelt. Durch Schalldruckamplituden wird der molekulare Zusammenhang der Flüssigkeit an vorhandenen Inhomogenitäten (Verunreinigung, Reinigungsgut) zerrissen, es bilden sich kleinste Bläschen in der Reinigungsflüssigkeit die sehr instabil sind.

Diese Bläschen implodieren und erzeugen dabei kraftvolle Druckimpulse. Diesen Vorgang bezeichnet man als Kavitation, Die Kavitation bewirkt eine schonende und intensive Reinigung an allen Stellen, die von der Reinigungsflüssigkeit erreicht werden.

Tests haben gezeigt, dass ein wesentlicher Punkt der Ultraschall-Funktionalität die Platzierung der Ultraschallschwinger im Prozessbehälter, Geometrie der Werkzeuge und die entsprechende Packanordnung der Werkzeuge im Prozesskorb ist. Daraus folgert, dass die Effizienz dieser Funktion erheblich abhängt von der Anordnung der Werkzeuge in den Lastaufnahmemitteln. Durch die enorme Größenvielfalt der zu nutzenden Werkzeuge in den Presswerken ist es nicht praktikabel, viele unterschiedliche Körbe zu benutzen, um durch die Korbgeometrie eine Packvorgabe für die zu reinigenden Werkzeuge zu realisieren. Aus diesem Grund ergibt es sich, dass eine sinnvolle Beladung der Werkzeuge in Bezug auf die Ultraschallfunktion in der Verantwortung der Anlagenbediener liegt. Dieses muss organisatorisch umgesetzt werden und liegt in der Hand der Anlagenbetreiber.

Konventionelle Ultraschallgeber, die für die Brillenreinigung oder die Reinigung von Zahnprothesen, Schmuck, Münzen und anderen empfindlichen Teilen genutzt werden, arbeiten mit Ultraschallfrequenzen zwischen 25 KHz und 40 KHz.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass der mechanische Einfluss der für den Reinigungsprozess zu nutzenden Kavitation mit sinkender Frequenz zunimmt.

Entsprechend ist für diese Anwendung ein Ultraschallsystem mit 25kHz ausgewählt worden.



## **4.12. Effizienz und Recycling**

### **4.12.1. Energieeffizienz**

Durch die Konzeption der Anlage sollen Energie- und Rohstoffverluste auf das notwendige Minimum reduziert werden.

Aus diesem Grunde werden sämtliche Behälter isoliert und sind im Betrieb geschlossen. Entstehende Wrasen werden in den Behältern kondensiert oder scheiden sich im Abluftstrom am Demister als Aerosole wieder ab und werden dem Prozess über Rücklaufleitungen wieder zugeführt.

Die Erwärmung der Medien erfolgt mittels externer Warmwasserbeheizung über Doppelmäntel an den Vorlagebehältern der Medien NaOH, Spülwasser 1 und 2.

Die Temperatur wird auf max. 95°C begrenzt, um entstehende Verdampfungsverluste soweit wie möglich einzugrenzen. Die durch den Prozess entstehende exotherme Energie wird zur Erreichung bzw. Erhaltung einer stabilen Prozesstemperatur genutzt. Dadurch werden u.a. die bei der Beladung durch Werkzeuge mit Raumtemperatur entstehenden Wärmeverluste kompensiert. Zusätzlich soll die Abluftmenge auf das notwendige Maß, bezogen auf die Reduzierung des Wasserstoffanteils, unterhalb der UEG begrenzt werden. Über diesen Wert hinaus gehende Abluftmengen führen zwangsläufig zu unnötigen Wärmeverlusten, die dann durch extern erzeugte Energie nachgespeist werden muss. Entsprechend wirkt sich dieses dann negativ auf die Anlagen-Energiebilanz aus.

### **4.12.2. Rohstoffeffizienz**

Die Spülwasser können solange benutzt werden, bis die gewählten Grenzwerte überschritten werden. das gesättigte Wasser wird dann als Ansatz für frische Reinigungslauge oder zum „Ausgleich“ der entstandenen Verdampfungsverluste wieder für den Prozess genutzt. Für die Vorlagebehälter Natronlauge, Spülwasser 1 und Spülwasser 2 ist eine Kaskadenfunktionalität mit nachfolgendem Ablauf integriert worden.

- Natronlaugebehälter
  - Verdampfungsverluste werden aus Spülwasserbehälter 1 gespeist
- Spülwasserbehälter 1
  - unterschreiten des Leitwertes bzw. überschreiten eines Schwellenwertes für Kontaminierung durch Natronlauge > Ausgleich der Verdampfungsverluste im Natronbehälter

- Ausgleich der Spülwasser 1 Verluste erfolgt aus Spülwasserbehälter 2
- Spülwasserbehälter 2
  - Ausgleich der Verluste in Spülwasserbehälter 1
    - Unterschreitung von max. Füllstand > Auffüllung durch Frischwasser

Grundsätzlich beinhaltet diese Funktionalität, dass nur eindeutig durch Prozessparameter definierte verbrauchte Medien entsorgt werden. Auftretende Verluste in den jeweiligen Vorlagebehälter werden dann durch das „weniger verbrauchte“ Medium ersetzt bzw. ausgeglichen.

### 4.12.3. Aluminium-Recycling

Das Konzept der Anlage setzt den Betreiber in die Situation, dass das für den Reinigungsprozess notwendige Auflösen des Aluminiums in den Werkzeugen auf ein notwendiges Minimum begrenzt wird. Hierfür müssen die Prozessparameter entsprechend gewählt werden. Insbesondere sind Temperaturen und Reinigungszeiten so zu wählen, dass die größtmögliche Menge Aluminium nach Ablauf eines Reinigungsprozess für ein Recycling zur Verfügung steht. Das Aluminium sollte nur soweit mit der NaOH-Lauge reagieren, dass es beim Auseinanderbauen der Werkzeuge, als fester Bestandteil für ein weitergehendes Recycling genutzt werden kann.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Unterschied zwischen konventioneller und optimierter Fahrweise im Kompaktsystem.



Abb. 11 Ergebnis bei konventioneller Fahrweise



**Abb. 12 Ergebnis 1 bei optimierter Fahrweise**



**Abb. 13 Ergebnis 2 bei optimierter Fahrweise**

### **Ergebnis:**

Der Energieeinsatz wird durch die konsequente Ausnutzung der exothermischen Wärmenergiequelle signifikant reduziert. Hier gilt unbedingt das Motto, entstehende Reaktionsenergie sinnvoll zu nutzen und nicht diese, bei aufkommender Übertemperatur, mit Hilfe von Kühlmedien zu vernichten. Zusätzlich müssen die Anlagenparameter, insbesondere Temperaturen, einer effizienten Fahrweise angepasst werden. Gleiches gilt auch für eine effiziente Nutzung der Ultraschallfunktionalität. Die Werkzeuge müssen so im Lastaufnahmemittel platziert werden, dass eine größtmögliche Kavitation an den Bearbeitungspunkten der Werkzeuge entstehen kann.

Entsprechend reduzieren sich dann auch die Reinigungszeiten in dem System. Als weitere Folge verbessert sich die Energiebilanz. In diesem Zusammenhang ist auch noch einmal darauf hinzuweisen, dass dem Operator durch seine individuelle Bedienung und die daraus resultierende Einflussnahme eine wesentliche Rolle in der Einsparung von Ressourcen zufällt. Entsprechende Schulungen unter Mithilfe der durch das System gelieferten Daten sind in jedem Falle durchzuführen.

#### 4.13. Emissionen und Abfallentsorgung

Eine Temperatur  $> 100^{\circ}\text{C}$  ergibt eine Verdampfung von  $\text{H}_2\text{O}$ -Anteilen. Entsprechend entsteht eine Aufkonzentration von NaOH. Weiterhin ergibt sich durch die Verdampfung auch ein Mitriss von NaOH-Anteilen bzw. Kristallen, die sich dann im Abluftsystem absetzen bzw. aus dem System nach außen treten können. Um NaOH-Emissionen grundsätzlich zu vermeiden, wird eine mechanische Abluftreinigung mittels Demister eingesetzt. Entstehende Aerosole werden mit Hilfe des Demisters abgeschieden und über Schwerkraft in den Prozess wieder zurückgeführt. In dem „geschlossenen“ System herrscht während des Betriebes ein permanenter geringer Unterdruck. Dieser Unterdruck wird durch den Abluftventilator erzeugt. Entsprechend können keine Emissionen an der Anlage bzw. am Arbeitsplatz entstehen.

Schlussfolgerung: Prozesstemperaturen  $> 100^{\circ}\text{C}$  müssen vermieden werden.

Die für die entstehenden Wrasen benötigte Abluftmenge muss so angepasst werden, dass die Abluft auf das notwendige Minimum entsprechend der Wasserstoffgrenzwerte begrenzt wird.

Die Aufheizung der Flüssigkeiten erfolgt mittels Warmwasserwärmetauscher bzw. Doppelmantelbehälter (Warmwassertemperatur  $< 100^{\circ}\text{C}$ ), um das Überschreiten von Temperaturen oberhalb des Siedepunktes zu vermeiden.

Eine Anwendungsrecherche hat ergeben, dass der bei der Reinigung entstehende Natriumaluminat-Komplex für betriebseigene Eloxalanlagen genutzt werden kann und somit nicht entsprechend entsorgt werden muss. Ein weiterer Aspekt zur weiteren Nutzung der Abfalllauge ergibt sich daraus, dass Kläranlagen diesen Abfall zur Ausfällung von Phosphaten benötigen. Bei beiden Anwendungen wird ein Produkt mit einem definierten Konzentrationsfenster benötigt. Dieses wird mittels einer Dichte- und Leitwertermittlung in unserer Anlage umgesetzt.

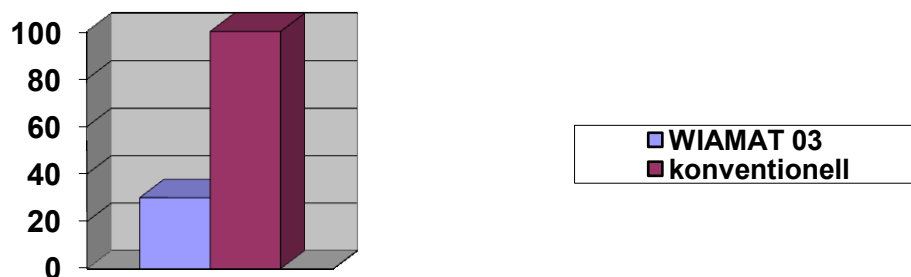


Abb. 14 Diagramm Umweltbelastung am Anlagenstandort





**Abb. 15 Aluminiumhydroxid- und Natronlauge(kristallin)-Ablagerungen 1**



**Abb. 16 Aluminiumhydroxid- und Natronlauge(kristallin)-Ablagerungen 2**



**Abb. 17** Anlagenzustand bei geschlossener Bauweise der Pilotanlage



## 5. Laborversuche

In Laborversuchen wurde das Lösungsvermögen von Aluminium in verdünnter Natronlauge untersucht und nachgewiesen.

Zu diesem Zweck wurde als Vorlage eine 500ml NaOH-Lösung von 320g/l benutzt.

Jede Stunde wurde 1,3g Aluminium mit Hilfe eines Wägeschälchen dazugegeben.

Alle 5 min wurden die Temperaturen gemessen.

5 min nach Zugabe und dann alle 15 min ist der Versuch durch ein Foto dokumentiert worden.

Ab der 9ten Zugabe ist die Fotodokumentation eingestellt worden, da sich die Flüssigkeit als schwarze, spiegelnde Lösung darstellt und nichts mehr zu erkennen war. Nach diesem Zeitpunkt wurden die Versuche für 48 Stunden unterbrochen und anschließend mit der benutzten Lösung fortgeführt.

Ab diesem Zeitpunkt wurden nur noch Temperaturen gemessen, bis der Abfall eingetreten ist.

Vor der 42., 50. und 52. Aluminiumzugabe wird Aufgrund der verlangsamten Reaktion die Flüssigkeit mit 50 ml demi. Wasser verdünnt.

Vor der 56. Aluminiumzugabe (71,5g) wird die Temperatur auf 35,5°C erhöht.

Vor der 72. Aluminiumzugabe (92,3 g) wird die Temperatur auf 39°C erhöht

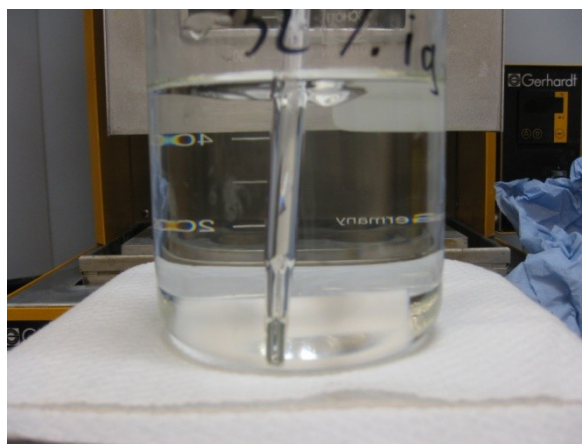


Abb. 18 Laborversuch: 500ml NaOH-Lösung von 320g/l

## 5.1. Versuchsreihe 1-8te Zugabe

Leitfähigkeit bei Versuchsbeginn

= 240mS/cm

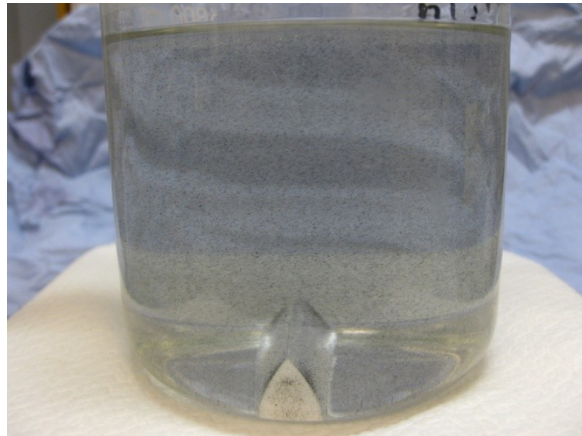
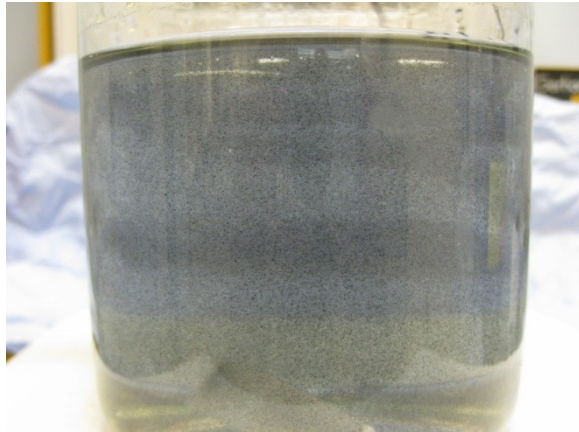


Abb. 19 Laborversuch: 1,3 g Aluminium



Abb. 20 Laborversuch: 2,6g Aluminium

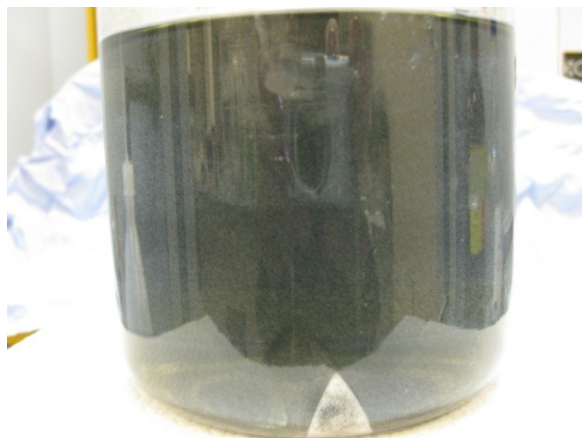




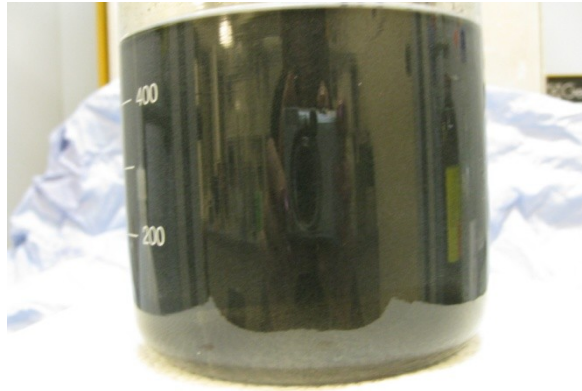
**Abb. 21 Laborversuch: 3,9g Aluminium**



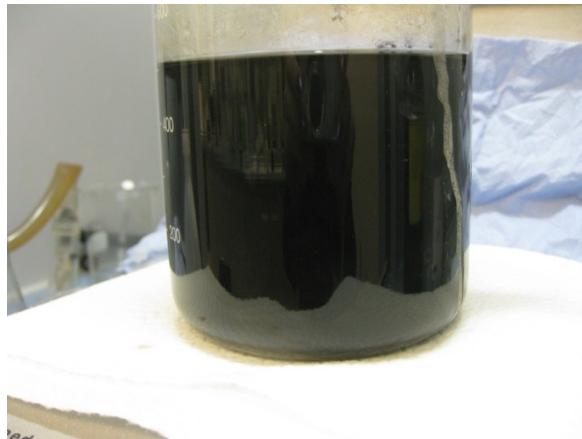
**Abb. 22 Laborversuch: 5,2g Aluminium**



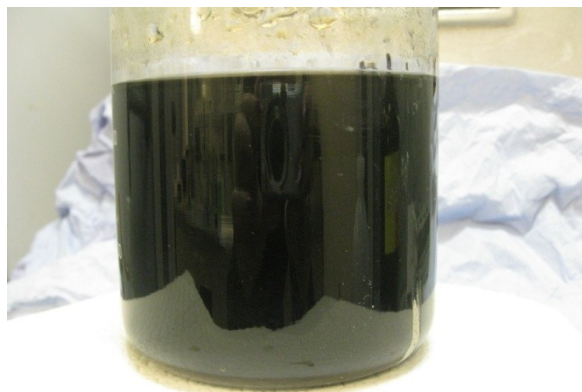
**Abb. 23 Laborversuch: 6,5g Aluminium**



**Abb. 24 Laborversuch: 7,8g Aluminium**



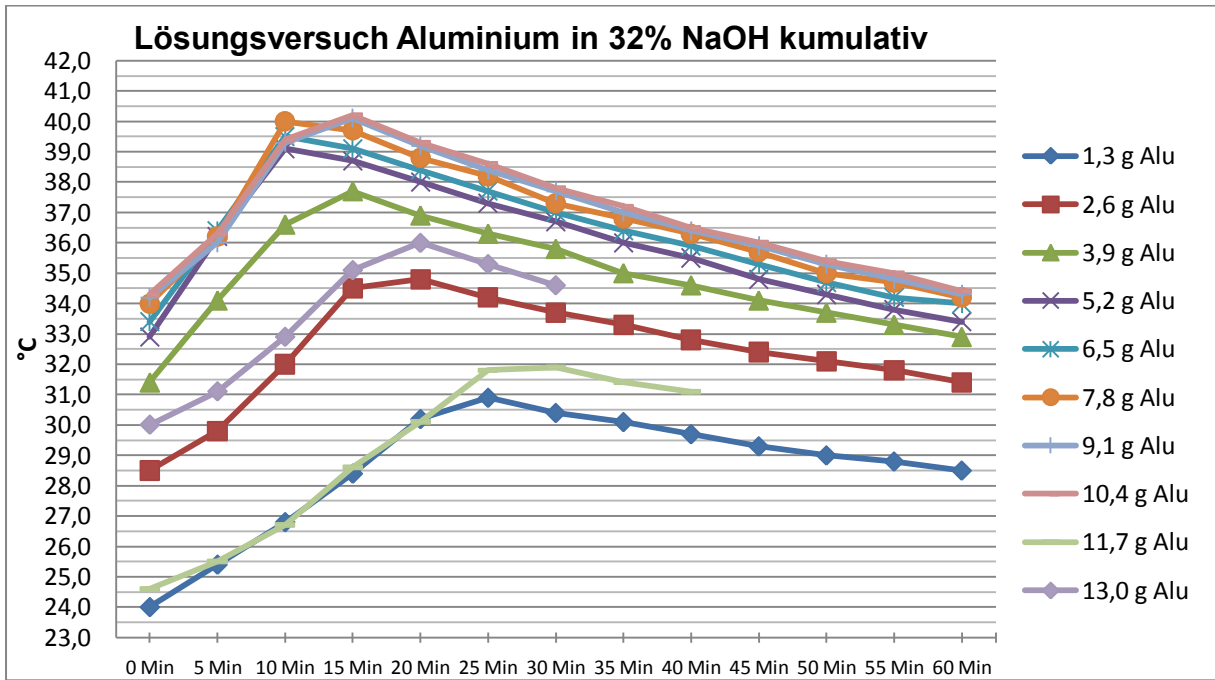
**Abb. 25 Laborversuch: 9,1g Aluminium**



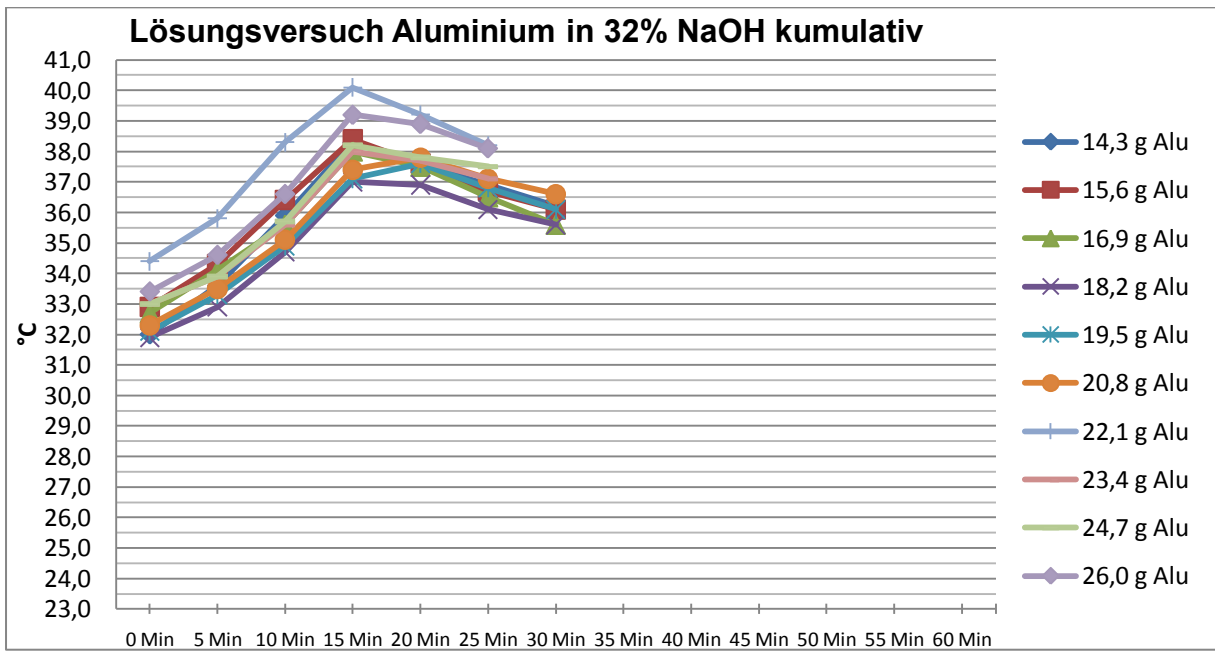
**Abb. 26 Laborversuch: 10,4g Aluminium**

**Leitfähigkeit nach 8ten Versuch**

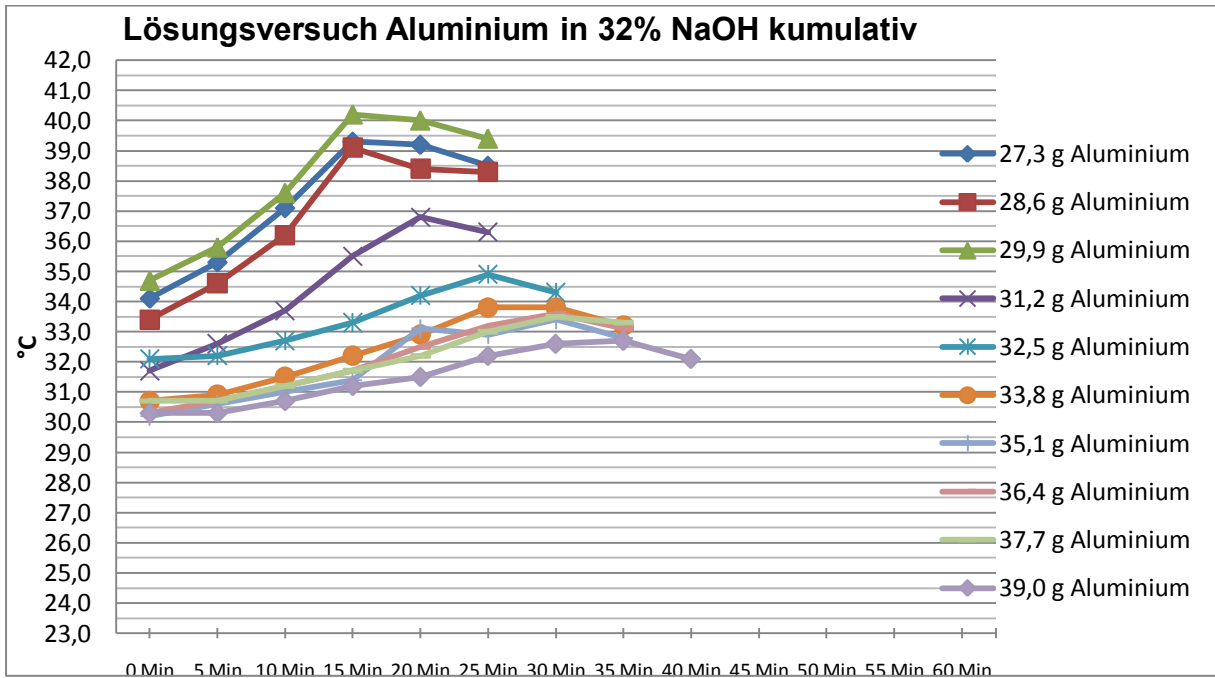
**= 229mS/cm**



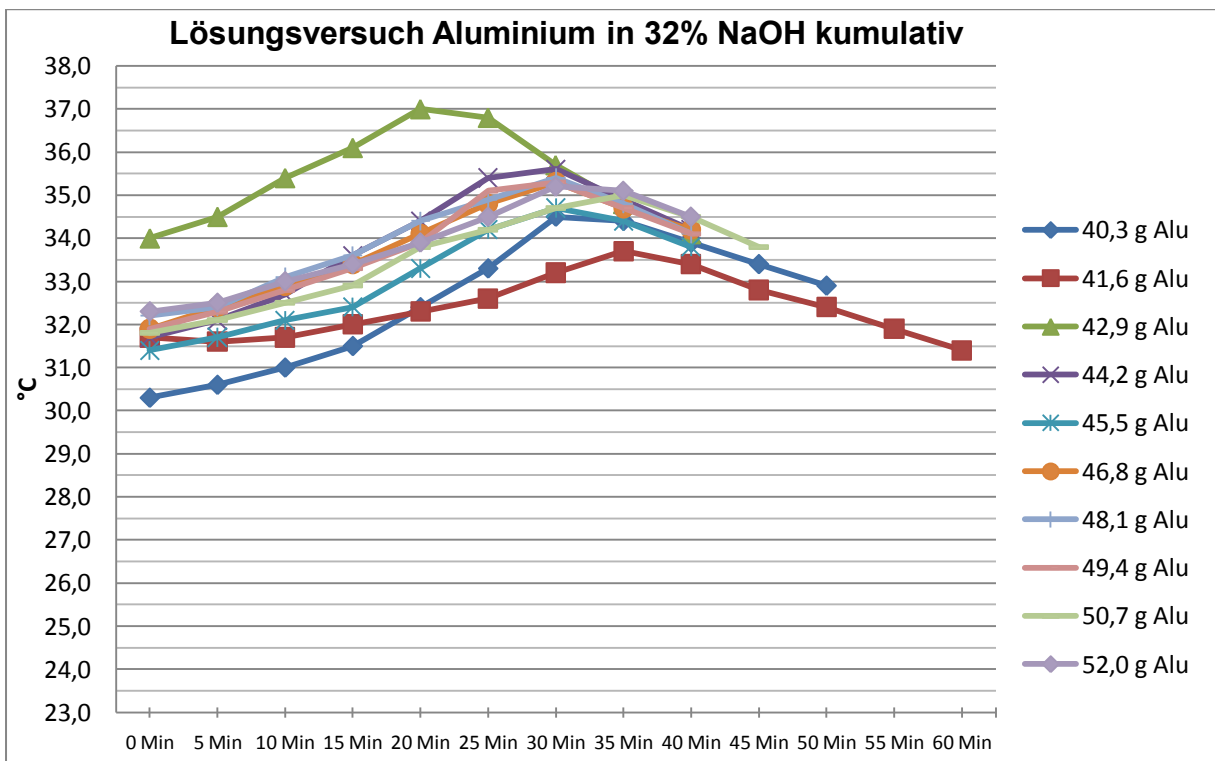
**Tabelle 1 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 1-10**



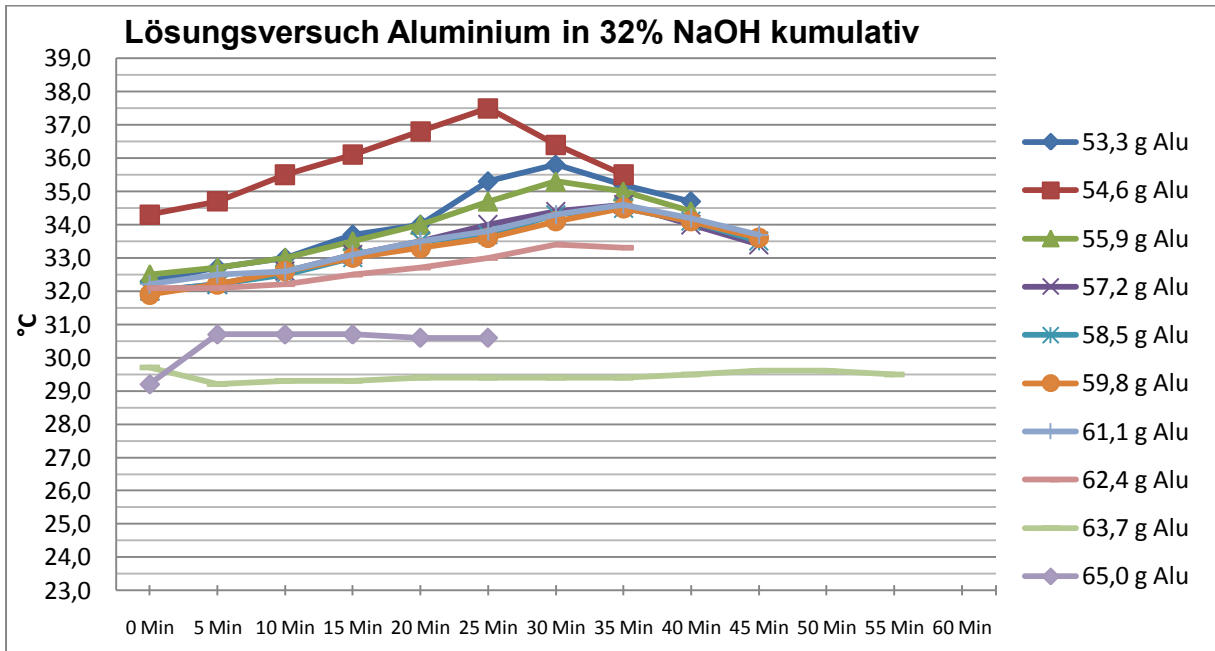
**Tabelle 2 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 11-20**



**Tabelle 3 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 21-30**

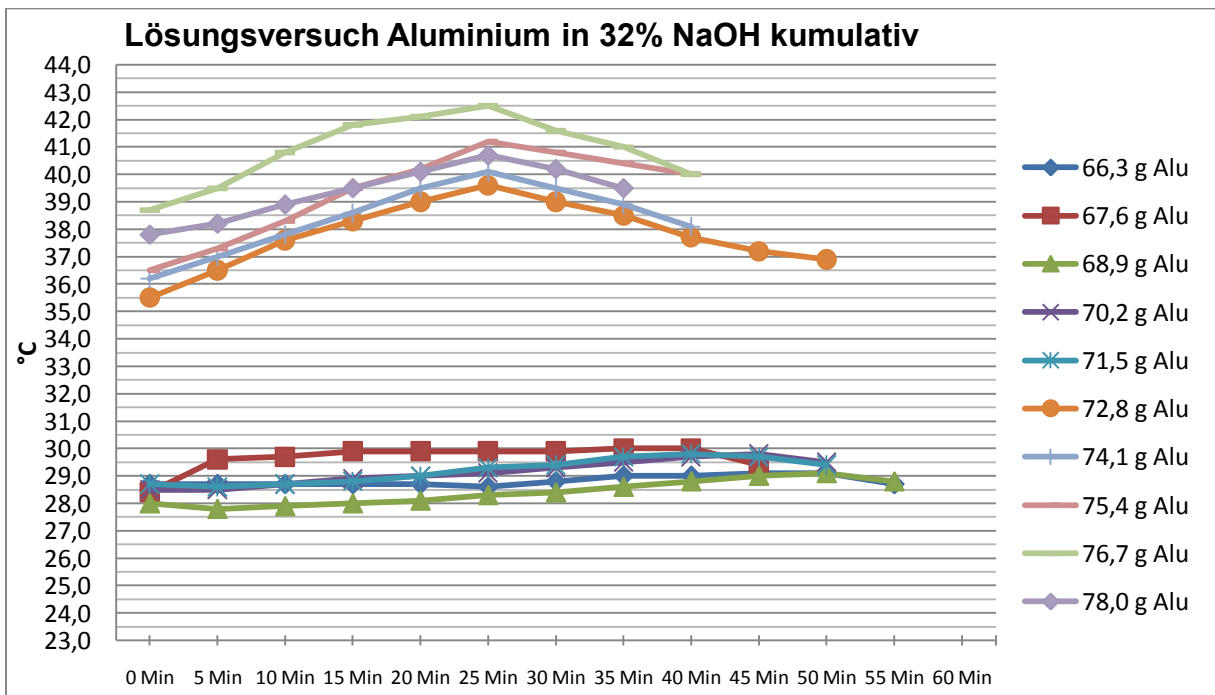


**Tabelle 4 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 31-40**



**Tabelle 5 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 41-50**

**Zugabe von 50ml demineralisierten Wasser vor 54,6g und 65g**



**Tabelle 6 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 51-60**

**Zugabe von 50ml demineralisierten Wasser vor 67,6**

**Temperaturerhöhung bei 71,5g**

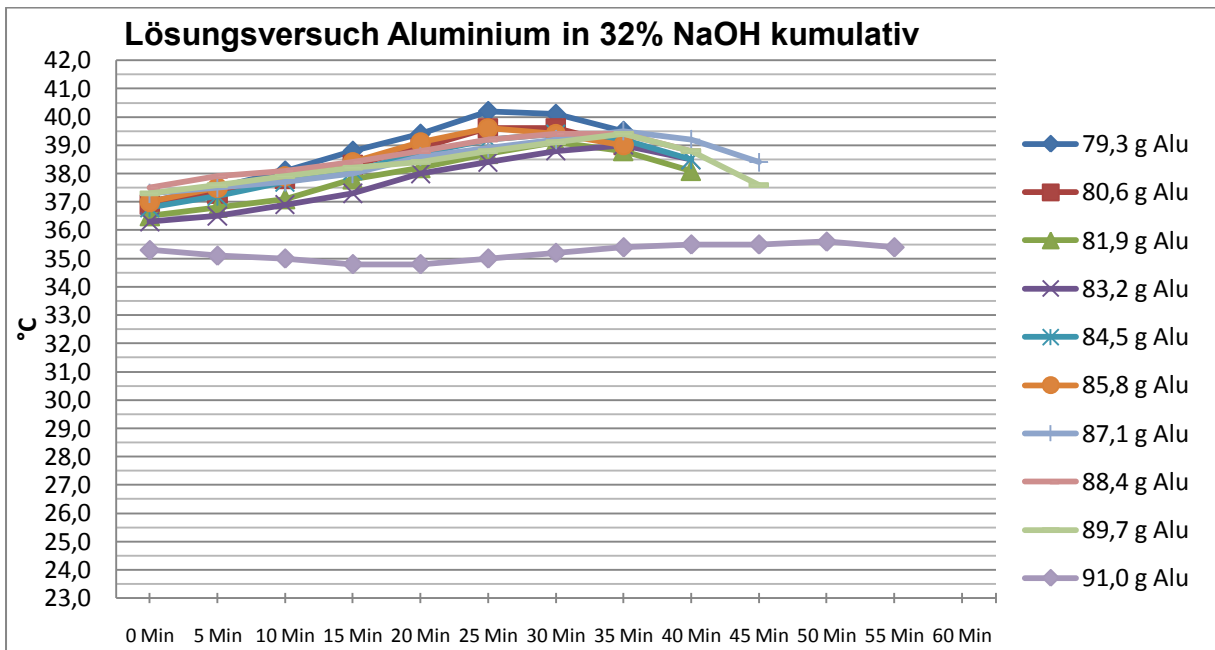


Tabelle 7 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 61-70

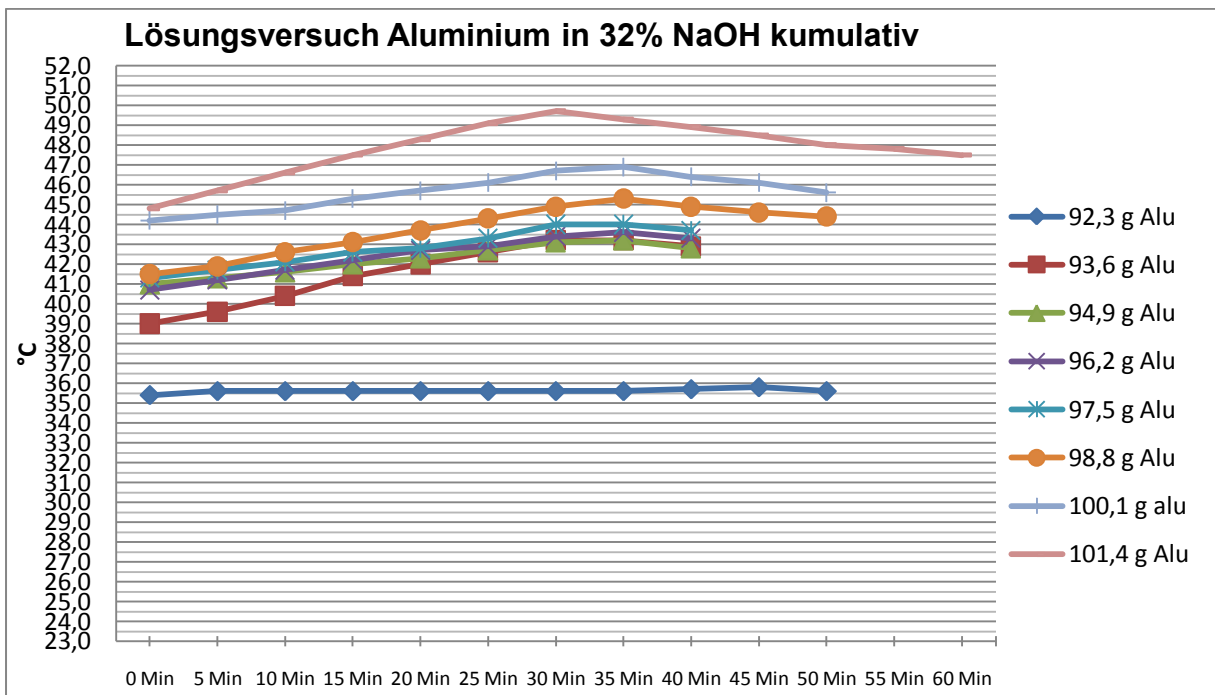


Tabelle 8 Laborversuch: Lösung von Aluminium Zugabe 71-78

## 5.2. Versuchsergebnis

Am Anfang läuft die Reaktion recht langsam ab. Deshalb könnte man durch Erwärmen das Ganze etwas beschleunigen, was aber nicht unbedingt notwendig ist. Das langsame Anlaufen der Reaktion erklärt sich dadurch, dass die sich immer auf dem Aluminium befindliche Oxidschicht zuerst von der Natronlauge angegriffen werden muss. Nach kurzer Zeit steigert sich die Geschwindigkeit und das Aluminium wird von der Natronlauge aufgelöst. Nach dem Zugeben von Natriumhydroxidlösung, sind eine Gasbildung und eine weiß/graue Färbung zu erkennen.

Es wird Wasserstoff frei und es bildet sich ein Natrium-Aluminat-Komplex.

Der freiwerdende Wasserstoff entweicht nach oben.

Bei der Zugabe von Aluminium in die Natronlauge ergibt sich nach dem Reaktionsbeginn eine Zunahme der Temperatur im Medium (exotherme Reaktion). Je mehr Aluminium in dem Medium gelöst wird, desto größer wird die Viskosität – ausgelöst durch die Verdampfungsverluste und zunehmenden Anteile von Natriumaluminat in dem Medium. Die Trägheit des Mediums nimmt zu und der Ionenaustausch verringert sich. Entsprechend nimmt der Wert der Leitfähigkeit ab. Analog dazu lässt sich auch eine Abnahme der Reaktionsfähigkeit beobachten.

Durch eine Zugabe von Wasser (in diesem Fall Demi-Wasser) wird die Leitfähigkeit erhöht und die Reaktionsfähigkeit nimmt wieder zu. Zusätzlich erhöht sich auch wieder die Reaktionsfähigkeit durch die externe Temperaturerhöhung des Mediums.

Die Versuche zeigen eindeutig, dass durch eine sinnvolle Auswahl von Parametern und Nutzung von Verbrauchsmedien, der Prozess im Sinne von Effizienz stark verbessert werden kann. Hierzu sind allerdings entsprechend Funktionalitäten in eine reale Anlage zu integrieren.

## 6. Fazit

Die Reduzierung von Beschaffungs- und Entsorgungskosten der Prozessmedien, die größere Energie-Effizienz und das erhöhte Aluminium- Recyclingpotential und nicht zuletzt die Verkürzung der Reinigungszeiten eröffnen weitreichende Verbesserungen für Umwelt, Arbeitsschutz und Wirtschaftlichkeit.

Bei Optimierung des Beizregimes je nach Werkzeugabmessung und –Konstruktion und empfohlener Beiztechnologie lassen sich bedeutende Restaluminiumraten bis zu 30 t/ Jahr erzielen.

Im Ergebnis wird diese Reinigungsanlage einen großen positiven Einfluss auf die Prämissen Umwelt, nachhaltige Schonung der Ressourcen und Effizienz haben. Rohstoffeinsatz und Energieverbräuche können bis zu 25-50% im Verhältnis zu konventionellen Anlagen reduziert werden. Dieses kann aber nur garantiert werden, in dem die Anlagentechnologie und Funktionalität in Verbindung mit der menschlichen Anlagenbedienung sinnvoll verbunden wird. Der Kompetenz des Anlagenbedieners kommt auch in diesem Fall industrieller Anlagentechnik eine entscheidende Rolle zu. Primäres anzustrebendes Ziel muss sein, so wenig wie möglich Aluminium in Lösung zu bringen. Nur das Aluminium sollte chemisch in dieser Anlage gelöst werden, welches im Vorfeld nicht mechanisch entfernt werden kann. Jedes Teil Aluminium, das nicht durch diesen Prozess bearbeitet werden muss, spart Rohstoffressourcen und trägt zu einer ökologischen, aber auch ökonomischen Verbesserung bei.



Abb. 27 Diagramm Kostenbenefit durch Rcyling und Verbrauchsminimierung von NaOH

Zukünftig sollten weiterführende Anstrengungen zur Vermeidung von Abfall unternommen werden. Da es sich bei diesem Reinigungsprozess nicht vermeiden lässt, dass Aluminium in Lösung geht, wird sich das Reinigungsmedium NaOH 30% stetig mit Aluminat anreichern. Durch die Mengen der „Abfalllösungen“, stellt sich sowohl ein ökologisches als auch ein ökonomisches Problem dar. Dieser Abfall kann durch die Zugabe von großen Mengen Säure neutralisiert werden. Weitergehende ökologische Ansätze haben ergeben, dass es durchaus auch einen ökonomischen Sinn ergibt, das in den Reinigungslösungen vorhandene „Aluminium“ zurück



zugewinnen. Hierbei kann das gelöste „Aluminium“ als Aluminiumhydroxid ausgefällt und anschließend als Rohstoff wieder verwendet werden. Ökonomisch stellt dieser ausgefallte kristalline Rohstoff einen Wert dar. Durch einen Verkauf lassen sich entsprechende Erlöse erzielen. Der amorph anfallende Aluminiumhydroxidschlamm muss dann nicht mehr deponiert werden. Das bedeutet eine Vermeidung von Umweltbelastungen. Die so zurückgewonnene Base könnte aufbereitet und dem Prozess wieder zugeführt werden. Dieses müsste im Zuge einer weiteren Betrachtung ökologisch und ökonomisch untersucht und spezifiziert werden.

Da kein Rohstoff unbegrenzt zur Verfügung steht und keine Energiequelle unerschöpflich ist, müssen die vorhandenen Ressourcen soweit wie möglich geschont werden. Die Rückgewinnung von Rohstoffen, ermöglicht dann eine Rückführung in den Produktionskreislauf.

## 7. Literaturverzeichnis

Dr. Rafael Rituper - Beizen von Metallen  
Eugen G. Leuze Verlag

Lautenschläger, Schröter, Wanninger - Taschenbuch der Chemie,  
Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main

F. Bergler: Physikalische Chemie für chemisch-technische Assistenten,  
Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York

R. Pfestorf, H. Kadner: Chemie - ein Lehrbuch für Fachhochschulen,  
Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main

Gmelin Handbuch der anorganischen Chemie.

McKetta j. Encyclopedia of chemical Processing and Design,  
M. Dekker Inc. 1976

Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 26.  
September 2002

Elfte Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz  
(Explosionsschutzverordnung) vom 12. Dezember 1996

Betriebssicherheitsverordnung vom 27. September 2002 (BGBl. I S. 3777)

Holger Wöckel - Grundzüge des Immissionsschutzrechts. 2008