

**Abteilung für Forschung und Entwicklung
der Rehm Thermal Systems GmbH**

**Energieeffiziente Konvektionslötanlage
mit erstmaliger Kombination einer
Vakuumkammer und eines thermischen Reaktors**

**Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 321380 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

von

Dr. rer. nat. Hans Bell & Dipl.-Ing. Paul Wild

April 2016

- Diese Seite wurde für die gebundene Version absichtlich leer gelassen -

06/02					
3. Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt					
Az	32138/01	Referat	24/0	Fördersumme	84.100,00 €
Antragstitel		Energieeffiziente Konvektionslötanlage mit erstmaliger Kombination einer Vakuumkammer und eines thermischen Reaktors			
Stichworte		Konvektionslöten, Energieeffizienz, Residuemanagement			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
18 Monate	01.08.2014	31.01.2016	1		
Zwischenberichte	2				
Bewilligungsempfänger		Tel +49 7344 9606-0 Fax +49 7344 9606-660 Projektleitung Dr. Hans Bell Bearbeiter Dip.-Ing. Paul Wild			
Rehm Thermal Systems GmbH Leinenstraße 7 89143 Blaubeuren-Seissen					
Kooperationspartner					
<p>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</p> <p>Weltweit wächst der Bedarf an Power-Elektronischen Systemen, wie z.B. IGBTs (insulated-gate bipolar transistor). Diese werden gezielt im Hochleistungsbereich eingesetzt, verfügen über eine hohe Vorwärts-Sperrspannung und können hohe Ströme schalten. Der Bedarf ist auf die erhöhte Nachfrage in den Bereichen der E-Mobility, des LED-basierten Global-Lighting sowie der Photovoltaik- und Windkraftanlagen zurückzuführen. Für diese unterschiedlichen elektronischen Applikationen sind als Aufbau- und Verbindungsmerkmal voidfreie (porenfreie) Lötstellen zwingend notwendig. Zum voidfreien Löten sind Lötanlagen mit Vakuumkammer unabdingbar, um nach dem Umschmelzen der Lotpaste die Voids aus der Lötstelle zu entfernen.</p> <p>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</p> <p>Zuerst wurde mit Hilfe der FEM-Methode die Vakuumkammer nach dem Zwei-Schalenprinzip entwickelt und aufgebaut. Ein mit verstellbarer Breite und sehr geringem Schmiermittelverbrauch entwickeltes Transportsystem wurde in die Vakuumkammer integriert. Anschließend wurde ein thermischer Reaktor zum Erfassen von Lötrauchen konzipiert. Dieser funktioniert nach dem Prinzip der thermischen Pyrolyse bei ca. 500 °C und ist zur Erhöhung der Wärmeübertragung mit Filtergranulat gefüllt. Bevor die gesamte Anlage aufgebaut wurde, erfolgte die Ausarbeitung des Gesamtenergiekonzepts zur energieeffizienten Integration der Vakuumkammer und des thermischen Reaktors in die Konvektionslötanlage. Anschließend wurden alle Komponenten zu einer vollständigen Anlage ausgebaut. Zum Schluss der Untersuchungen wurde die Neuentwicklung mittels FID- und Energiemessungen charakterisiert.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Es wurde auf der Basis zahlreicher Messungen und Versuche eine Konvektionslötanlage mit Vakuumkammer aufgebaut, die einen vergleichend geringen Energiebedarf hat und die über ein effizientes Abscheidesystem für Emissionen aus dem Lötprozess verfügt. Die entwickelte Konvektionslötanlage mit Vakuum weist unter Berücksichtigung des Energiebedarfs der Vakuumpumpe eine Energieeinsparung von 18,8 % im Vergleich zu heutigen Lötanlagen auf. Der ursprüngliche Ansatz der Verwendung eines Wärmetauschers zur Rückgewinnung der Wärme aus dem abgepumpten Prozessgas konnte durch Messungen nachgeprüft und die Konstruktion entsprechend modifiziert werden. Das Erreichen dieser Ziele hat zu einer spürbaren Steigerung der Kompetenz des Antragstellers im Bereich der Wärmerückgewinnung beigetragen. Dennoch fehlen hier zuverlässige Aussagen darüber, wie das neue System sich im Feld bei verschiedenen Prozessbedingungen verhält. Durch den Einsatz des thermischen Reaktors, der die Rauchgase durch thermische Pyrolyse zersetzt, kann eine deutliche Minimierung der Kontamination der Vakuumkammer und des Prozessraumes erreicht werden. Durch die Simulation eines Fertigungsprozesses mit Hilfe bedruckter Leiterplatten wurde erstmalig die Konzentration der Kohlenwasserstoffverbindungen in einzelnen Bereichen der Anlage ermittelt. Diese Erkenntnis erlaubt es, die Reinigungsmaßnahmen direkt dort wirken zu lassen, wo auch die meisten Residuen entstehen. Unsere Messungen offenbarten aber auch, dass ein weiterer Forschungsbedarf insbesondere zum zuverlässigen Erfassen der beim Löten entstehenden flüchtigen Bestandteile und feinen Partikeln besteht. Mit der Entwicklung und dem Aufbau eines in drei Teile geteilten Mehrspursystems nach dem Durchlaufprinzip wurde das System für große Durchsätze ausgerüstet, wodurch eine merkliche Steigerung der Anlageneffizienz pro gefertigte Baugruppe erreicht worden ist. Zu bemerken ist, dass der ursprüngliche Ansatz, einen schmierfreien Transport in der Vakuumkammer zu realisieren, aus Kostengründen und fertigungsspezifischer Vorschriften (mögliche Kontamination der Baugruppen mit Abriebpartikeln aus dem Transportsystem) nicht vollständig umgesetzt werden konnte. Insgesamt sind die Projektergebnisse als positiv zu bewerten; die technischen Erkenntnisse haben eine große Bedeutung für den Antragsteller und seine weiteren Entwicklungen. Das grundlegende Verständnis für die Möglichkeiten der Energieeinsparung und von Residuemanagement wird bei der zukünftigen Entwicklung nicht nur von Lötanlagen, sondern auch anderer thermischer Systeme, wie z.B. Trockner und Öfen für die Solarindustrie miteinfließen. Es ist zu erwarten, dass die Vorgaben für die Energieeffizienz und die Entlastung der Umwelt weltweit steigen und aus diesem Grund der Umweltfaktor beim Kauf und Betrieb von Produktionssystemen zunehmend eine größere Rolle spielen wird.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- Interne Seminare und Tagungen, 3.Q/4.Q 2015, Vorstellung der Teilergebnisse
- SMT Messe 26.-28.04.2016
- PLUS Beitrag 2.Q 2016
- Seminar "Vakuumlöten", 29.06.2016
- Technologietage, 28-29.09.2016

Fazit

Ziel dieses Vorhabens war die Entwicklung einer energieeffizienten Konvektionslötanlage mit neuartiger und erstmaliger Kombination einer Vakuumkammer und eines thermischen Reaktors. Die im Vorhaben gesetzten Ziele wurden erreicht. In weiteren Entwicklungsschritten werden neben den bereits durchgeführten Arbeiten weitere Möglichkeiten zur Wirkungsgradsteigerung von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen sowie der Einsatz neuartiger Technologien untersucht. Die Erkenntnisse aus dem Vorhaben machen die zukünftige Entwicklung eines für die Lötanlagen tauglichen Messsystems zur zuverlässigen Erfassung von Residues notwendig, um das Verständnis und damit auch die umweltfreundliche Beseitigung dieser Stoffe weiter verbessern zu können. Darüber hinaus soll die Einsatztauglichkeit der modifizierten Anlagentechnik für die Elektronikfertigung inklusive deren Erfüllen sämtlicher Betriebsvorschriften geprüft werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	8
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	9
Zusammenfassung.....	11
1. Einleitung.....	13
2. Vorhabensdurchführung und –ergebnisse.....	17
2.1 Entwicklung der Komponenten.....	17
2.1.1. Vakuumkammer	17
2.1.2. Mechanik und der Vakuumpfad.....	23
2.1.3. Entwicklung und Erprobung des Mehrspurtransportsystems	28
2.1.4. Entwicklung des thermischen Reaktors.....	31
2.1.5. Wärmetauscher	34
2.2 Entwicklung des Gesamtenergiekonzepts.....	40
2.3 Aufbau und Charakterisierung der Versuchsanlage	43
2.1.6. Versuchsaufbau und Messmethodik	43
2.1.7. Residue-Management	47
2.1.8. Energieverbrauch	48
3. Fazit und Ausblick	51
4. Literaturverzeichnis	53

- Diese Seite wurde für die gebundene Version absichtlich leer gelassen -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Vergleich der Lötstellen nach dem Löten ohne (links) und mit Vakuum (rechts).....	13
Abbildung 2.1:	Theoretischer Verlauf der Auspumpzeit in Abhängigkeit von Unterdruck	18
Abbildung 2.2:	Vernetztes ¼ Model der Vakuumkammer.....	20
Abbildung 2.3:	Symmetrie- (grüne Pfeile) und Lastbedingungen (rote Pfeile) des ¼ -Modells	21
Abbildung 2.4:	Gesamtverformung der Vakuumkammer (links) und Von-Mises-Vergleichsspannungen (rechts) der Kammer bei 0,1 MPa Flächenlast	21
Abbildung 2.5:	Von-Mises-Vergleichsspannungen (links) und Gesamtverformung (rechts) im Bereich der Radien bei 0,1 MPa Flächenlast	22
Abbildung 2.6:	Wöhlerlinie der AlMg-Legierung ermittelt an Rundproben [6]	22
Abbildung 2.7:	Jährlicher Energieverbrauch für 50 cm Hublänge und 1000 N Hubkraft [8]	23
Abbildung 2.8:	Konstruktion der Vakuumkammer mit pneumatischen Antrieben	24
Abbildung 2.9:	Verbindung der Vakuumkammer mit den Hubzylindern.....	25
Abbildung 2.10:	Konzept des Vakuumpfades	26
Abbildung 2.11:	Abpumpzeiten der Vakuumkammer in Abhängigkeit von der Ventilstellung	27
Abbildung 2.12:	Berechnete und gemessene Abpumpzeit bis 10 mbar Unterdruck	28
Abbildung 2.13:	Vakuumschmierstoffe für besondere Bedingungen (Quelle: tech. THK).....	29
Abbildung 2.14:	Typen der Trockenschmierstoffe und Einsatztemperaturen [9]....	30
Abbildung 2.15:	Ölrückstände an der Transportkette nach einem Test bei 270°C/ 30 Tage.....	30
Abbildung 2.16:	Doppelspur-Transportsystem, Übergabebereich in die Kammer .	31
Abbildung 2.17:	Verschiedene Residuetypen vor (links) und nach dem Aufschmelzversuch (rechts).....	32
Abbildung 2.18:	Filtergranulat des thermischen Reaktors	32
Abbildung 2.19:	Prototypentest des thermischen Reaktors	33
Abbildung 2.20:	Temperaturverlauf im thermischen Reaktor.....	33
Abbildung 2.21:	Temperatur der evakuierten Atmosphäre	34
Abbildung 2.22:	Berechnete Ein – und Ausgangstemperaturen an dem Doppelrohrwärmetauscher.....	35

Abbildung 2.23:	Mit [13] berechnete Betriebstemperaturen	37
Abbildung 2.24:	Mit [14] berechnete Betriebstemperaturen und die erforderliche Austauschfläche.....	38
Abbildung 2.25:	Versuchsaufbau zum Testen des Wärmetauschers und die gemessenen Ein- bzw. Auslauftemperaturen	39
Abbildung 2.27:	Temperaturverteilung des Kammmergehäuses ohne Isolierung..	40
Abbildung 2.28:	Gesamtkonzept zur Integration einzelner Komponenten	41
Abbildung 2.26:	Versuchsaufbau für Voruntersuchungen zur Integration des Wärmetauschers in das Gesamtanlagenkonzept	41
Abbildung 2.29:	Zusammensetzung des Lotpastengemisches und die damit bedruckte Leiterplatte	43
Abbildung 2.30:	Positionierung der Messlanzen zum Transfer der Atmosphäre aus den jeweiligen Zonen zum FID-Messgerät.....	44
Abbildung 2.31:	Ballon zum Auffangen der abgepumpten Prozessatmosphäre aus der Vakuumkammer.....	45
Abbildung 2.32:	Temperatureinstellungen einzelner Heizzonen.....	46
Abbildung 2.33:	Versuchsaufbau zum Erfassen des Energieverbrauchs an der Vakuumkonvektionslötanlage	46
Abbildung 2.34:	Zeitlicher Verlauf der Kohlenstoffkonzentration an verschiedenen Messstellen über die Anlagenlänge verteilt	47
Abbildung 2.35:	Verteilung der Kohlenstoffkonzentration in den einzelnen Zonen der Vakuumkonvektionslötanlage	48
Abbildung 2.36:	Energieverbrauch der Anlage mit und ohne Vakuumprozess	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eigenschaften von Stahl- und Aluminiumlegierungen (Tabellenbuch)	19
Tabelle 2:	Mechanische Eigenschaften der AlMg-Legierung bei 260°C [6]	20
Tabelle 3:	Ergebnisse der Auslegung eines Rohr in Rohr Wärmetauschers [12]	35
Tabelle 4:	Prozessparameter	45

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

3D	Dreidimensional	
AlMg	Aluminium-Magnesium-Legierung	
BG	Baugruppen	
FEM	Finten Elemente Methode	
FID	Flammenionisationsdetektor	
PFPE	Perfluorpolyether	
SMD	surface-mount device	
<i>c</i>	Spezifischen Wärmespeicherkapazität	[kJ/(kg·K)]
<i>E</i>	Elastizitätsmodul	[MPa]
<i>FN</i>	Normalkraft	[N]
<i>FR</i>	Reibungskraft	[N]
<i>k</i>	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/(m ² ·K)]
<i>l</i>	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]
<i>L</i>	Strömungsleitwert	[l/s]
<i>p</i>	Druck	[mbar]
<i>Q</i>	Wärmemenge	[J]
<i>s</i>	Dicke	[m]
<i>Seff</i>	Effektives Saugvermögen	[m ³ /h]
<i>t</i>	Zeit	[s]
<i>T</i>	Temperatur	[K]
<i>V</i>	Volumen	[m ³]
<i>α</i>	Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m ² ·K)]
<i>μ</i>	Reibungskoeffizient	[-]
<i>ρ</i>	Dichte	[kg/m ³]
<i>v</i>	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]

- Diese Seite wurde für die gebundene Version absichtlich leer gelassen -

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde eine energieeffiziente Konvektionslötanlage mit erstmaliger Kombination einer Vakuumkammer und eines thermischen Reaktors entwickelt. Dabei waren insbesondere folgende Aspekte Gegenstand der Untersuchungen:

- Teilziel 1: Entwicklung eines thermischen Reaktors, der sowohl an die Vakuumkammer, als auch an die Konvektions-Durchlaufanlagen angeschlossen werden kann
- Teilziel 2: Eine weitere Steigerung der Anlageneffizienz soll durch Entwicklung eines Mehrspursystems nach dem Durchlaufprinzip für größere Durchsätze realisiert werden
- Teilziel 3: Die Verknüpfung zwischen thermischem Reaktor und Vakuumkammer sollte über ein Kanalsystem geführt werden, welches als Wärmetauscher ausgebildet werden soll
- Gesamtziel: Entwicklung einer Vakuumkonvektionslötanlage mit einer Energieeinsparung von 20%

Die neuentwickelte Konvektionslötanlage mit Vakuum weist unter Berücksichtigung des Energiebedarfs der Vakuumpumpe eine Energieeinsparung von 18,8 % im Vergleich zu heutigen Konvektionslötanlagen auf. Durch den Einsatz des thermischen Reaktors, der die Rauchgase durch thermische Pyrolyse zersetzt, wurde eine deutliche Minimierung der Kontamination der Vakuumkammer und des Prozessraumes erreicht. Durch die Simulation eines Fertigungsprozesses mit bedruckten Leiterplatten wurde erstmalig die Konzentration der Kohlenwasserstoffverbindungen in einzelnen Bereichen der Anlage ermittelt. Die Entwicklung und der Aufbau eines in drei Teile geteilten Mehrspursystems erlaubt es, das System nach dem Durchlaufprinzip für größere Durchsätze optimal einzusetzen, wodurch eine merkliche Steigerung der energetischen Anlageneffizienz pro Baugruppe erreicht worden ist.

In weiteren Entwicklungsschritten werden neben den bereits durchgeführten Arbeiten weitere Möglichkeiten zur Wirkungsgradsteigerung von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen sowie der Einsatz neuartiger Technologien untersucht. Die Erkenntnisse aus dem Vorhaben machen die zukünftige Entwicklung eines für die Lötanlagen tauglichen Messsystems zur zuverlässigen Erfassung von Residues notwendig, um das Verständnis und damit auch die umweltfreundliche Beseitigung dieser Stoffe weiter verbessern zu können. Darüber hinaus soll die Einsatztauglichkeit der modifizierten Anlagentechnik für die Elektronikfertigung inklusive deren Erfüllen sämtlicher Vorschriften geprüft werden.

- Diese Seite wurde für die gebundene Version absichtlich leer gelassen -

1. Einleitung

Weltweit wächst der Bedarf an Power-Elektronischen Systemen, wie z.B. IGBTs (insulated-gate bipolar transistors). Diese werden gezielt im Hochleistungsbereich eingesetzt, verfügen über eine hohe Vorwärts-Sperrspannung und können hohe Ströme schalten. Der Bedarf ist auf die erhöhte Nachfrage in den Bereichen der E-Mobility, LED Beleuchtung, Photovoltaik- und Windkraftanlagen zurückzuführen.

Für diese unterschiedlichen elektronischen Applikationen sind als Aufbau- und Verbindungsmerkmal voidfreie (porenfreie) Lötstellen zwingend notwendig. Poren sind Isolatoren in den Lötstellen, die den Wärmefluss erheblich behindern. Dies führt in situ des Betriebs von Power-Applikationen zur Selbstzerstörung der Lötstelle. Um Poren (Gasblasen) in der Lötstelle signifikant zu minimieren, haben sich Vakuum-lötsysteme als aktueller Stand der Technik durchgesetzt.

Vakuumlötanlagen für den sogenannten Frontend-Bereich sind bereits seit vielen Jahren auf dem Markt. Diese Anlagen werden vorzugsweise für das flussmittelfreie Löten (ohne Lotpaste) von „advanced applications“ verwendet und sind daher für das pastenbasierte Reflowlöten von elektronischen Baugruppen sehr eingeschränkt verwendbar. Ebenso für große Produktionsdurchsätze sind sie nicht geeignet.

Für das pastenbasierte Reflowlöten von elektronischen Baugruppen sind Vakuum-lötanlagen verfügbar, die auf der Basis des Kondensationsprinzips arbeiten. Typischerweise wird bei diesen Systemen das Vakuum unmittelbar nach dem Lötprozess genutzt, um die Poren aus der schmelzflüssigen Lötstelle zu entfernen. Die Flexibilität der Kondensationslötanlagen ist aber aufgrund der Kondensations-löttechnologie eingeschränkt. Das Kondensationslöten erfordert die Verwendung eines speziellen Perfluorpolyethers PFPE (Galden), welches nicht für alle Löttemperaturen zur Verfügung steht. Das Temperatur-Zeit-Reflowprofil muss mit Hilfe des Mediums erzeugt werden, wodurch Durchlaufsysteme nur beschränkt realisierbar sind. Überdies wird aus Umweltsicht die Verwendung von PFPEs in den elektronischen Fertigungsstätten kritisch diskutiert.

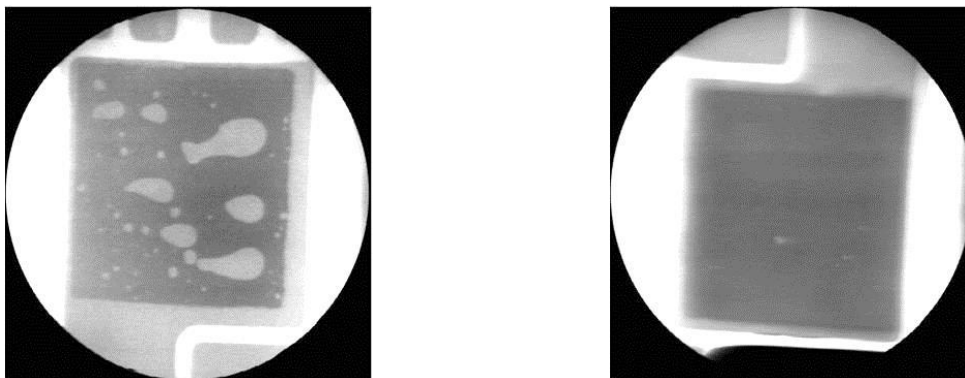


Abbildung 1.1: Vergleich der Lötstellen nach dem Löten ohne (links) und mit Vakuum (rechts)

Konvektionslötanlagen haben daher die größte Verbreitung auf dem Markt der SMD-Fertigungsstätten. Diese werden üblicherweise mit Luft oder Stickstoff betrieben; dabei wird die Konvektion zwangsweise von außen durch Ventilatoren, Gebläse und Düsen forciert. Um möglichst wenig Stickstoff zu konsumieren, sind Konvektionsreflowlötanlagen meist als (fast) geschlossene Anlagen ausgeführt. Während des Lötprozesses entstehen jedoch immer Lötrauche und Aerosole, die teilweise aus verflüssigten und sublimierten Anteilen von Baugruppenkomponenten (wie Lotpasten, Leiterplatten und Bauelementen) bestehen und ein erhebliches Verschmutzungspotential für die Reflowlötanlage darstellen. Bei einem Automotiv Baugruppenhersteller wurde beispielsweise ein verhältnismäßig großer Gewichtsverlust von 0,22 g/BG gemessen. Bei einer Fertigungstaktzeit von 20 s würden demnach in 24 Stunden 0,95 kg Rückstände in der Reflowlötanlage anfallen, die gezielt abgeschieden werden müssen, um nicht die Fertigungsanlage zu kontaminieren bzw. die Umwelt durch Emissionen zu belasten. Der Gewichtsverlust ist z.B. vom Lotpastentyp abhängig, sowie zu einem nicht unwesentlichen Teil durch aus der Leiterplatte austretende Feuchte.

Ohne ein wirkungsvolles Abscheidesystem in der Reflowlötanlage würde sich die Lötrauch-/Aerosolkonzentration in der Prozessgasatmosphäre stetig erhöhen. Die Folge ist ein größeres Verschmutzungspotential von Lötanlagenteilen, dem mit größeren Wartungs- und Instandhaltungsaufwendungen entgegen gewirkt werden muss. Diese Problemstellungen in Verbindung mit dem großen Bedarf an Power-Applikationen machen es also notwendig, neuartige energieeffiziente Vakuum-Konvektionsreflowlötanlagen mit geringstmöglichen Kontaminationen durch innovative Abscheidekonzepte und höchster Anlageneffizienz zu realisieren.

Im Rahmen dieses Vorhabens soll die Kontamination der neu zu entwickelnden Vakuumkammer mit einem thermischen Reaktor verringert werden, in dem die beim Reflowlöten durch den Lötrauch entstehenden Emissionen durch einen Pyrolyseprozess erfasst werden. Dies ergibt sich aus der technologischen Notwendigkeit, dass der Vakuumprozess unmittelbar nach dem Umschmelzen des Pastenlots erfolgen muss, also im schmelzflüssigen Zustand des Lotes. Beim Umschmelzen entstehen die meisten Lötrauche. Eine mögliche Lösung könnte in der kontinuierlichen Erfassung der Lötrauche direkt vor dem Vakuummodul bestehen. Die Verschmutzung des Vakuummoduls selbst durch Kondensationen aus dem Lötrauch soll durch eine vollständige Beheizung des Vakuummoduls über die wesentlichen Kondensationstemperaturen der Inhaltsstoffe des Lötrauchs hinaus verhindert werden. Unter Pyrolyse ist das Cracken von langkettigen Molekülen bei hohen Temperaturen unter Luftausschluss zu verstehen. Dieses Verfahren wurde für die Mineralölchemie entwickelt und soll seine technische Tauglichkeit jetzt für die Residueabscheidung beim Reflowlöten unter Beweis stellen.

Durch den Pyrolyseprozess sollen folgende wesentliche Ziele realisiert werden:

- Abbau des Anteils der kondensierbaren Kohlenwasserstoffe im Prozessgas
- Das Pyrolysesystem soll ein Partikelabscheidegrad von $> 97\%$ erreichen und zusätzlich sollen die Emissionen im Produktionsbetrieb der neuen Konvektionsvakuumlötanlage keine Überschreitungen der allgemeinen Grenzwerte der TA-Luft hervorrufen
- Reduzierung der Wartungsaufwendungen für die Lötanlage

Thermische Reaktoren benötigen in der Regel zusätzliche Energie. Das Reflowlöten selbst erfordert natürlich ebenso einen Wärmeenergieaufwand. Die technische Herausforderung besteht also darin, den Gesamtenergiekonsum so gering wie möglich zu halten.

- Der thermische Reaktor soll mit der Prozess- oder Vakuumkammer der Reflowlötanlage derart verknüpft werden, dass ein Großteil seines Energiebedarfs für den Reflowlötprozess wiedergewonnen wird. Das gereinigte Prozessgas soll den Heizzonen der Reflowlötanlage wieder zugeführt werden. Eine Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs bis zu 20% soll realisiert werden.
- Weitere Steigerung der energetischen Anlageneffizienz soll durch Entwicklung eines Mehrspursystems nach dem Durchlaufprinzip für größere Durchsätze umgesetzt werden.

Zum Erreichen der Projektziele sollen folgende Entwicklungsschritte realisiert werden: Zuerst soll die Vakuumkammer für zwei Transportspuren (Leiterplattenbreite: 2×250 mm) konstruiert werden. Da die Vakuumkammer vollständig beheizt werden soll, ist insbesondere das Problem thermisch stabiler Dichtungen (> 260 °C) zu lösen. Ebenfalls soll in diesem AP die grundsätzliche Frage gelöst werden, wie die Vakuumkammer konstruktiv ausgelegt werden muss, um möglichst eine große Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten usw. zu gewährleisten (konstruktive Möglichkeiten bestehen durch das 2-Türprinzip oder das Halbschalenprinzip). Um voidfreie Lötstellen zu ermöglichen, soll die Vakuumkammer für einen Unterdruck von 1 mbar ausgelegt werden.

Im nächsten Schritt soll das Transportsystem für zwei Spuren mit einer verstellbaren Spurbreite von je 70 bis 250 mm weiterentwickelt werden. Die größte technische Herausforderung besteht darin, dass der Transport aufgrund des Vakuumprozesses vollständig schmiermittelfrei funktionieren muss.

Anschließend soll ein neuartiger thermischer Reaktor entwickelt werden, der auf dem Prinzip der Pyrolyse arbeitet. Technologische Zielsetzung dieser Maßnahme ist, eine möglichst hohe Erfassung des Lötrauchs (Rohgas) zu erreichen und das erfasste Volumen dem thermischen Reaktor zuzuführen. Der Abscheidegrad soll mit FID-Messungen und ggf. Partikelmessungen anhand von geeigneten Referenzstoffen nachgewiesen werden. Zum Schluss sollen der thermische Reaktor und die Vakuumkammer über ein Kanalsystem verbunden werden, welches als Wärmetauscher ausgebildet wird. Damit wird zusätzlich eine Steigerung des Wirkungsgrades durch Rückgewinnung des Energiebedarfs erreicht. In der Gesamtenergiebilanz muss es gelingen, die Verlustwärme so gering wie möglich zu gestalten.

2. Vorhabensdurchführung und –ergebnisse

Zum Erreichen der Ziele dieses Vorhabens müssen zuerst die einzelnen Komponenten der zu entwickelnden Anlage, die Vakuumkammer, der Transport, der thermische Reaktor und der Wärmetauscher entwickelt werden. Der Entwicklungsprozess jeder Komponente setzt sich aus Konzeption, Konstruktion, Fertigung und Erprobung zusammen. Bei Bedarf finden eine oder mehrere Optimierungsschleifen statt. Nach der erfolgreichen Entwicklung der einzelnen Module werden diese in einer Anlage integriert und das Gesamtkonzept hinsichtlich der umweltschonenden Zielsetzungen sowie der Reduktion des Energieverbrauchs und der Kohlenstoff-/Partikelabscheidung bewertet.

2.1 Entwicklung der Komponenten

2.1.1. Vakuumkammer

Zum Erzeugen eines Vakuums sind ein dicht abgeschlossener Raum mit einem endlichen Volumen und eine Pumpe zum Evakuieren der Luft (oder Prozessatmosphäre) notwendig. Für das Reflowlöten unter Vakuum kommt noch eine weitere Anforderung hinsichtlich der Temperaturregelung und -beständigkeit der Vakuumkammer dazu. Die maximale Schmelztemperatur gängiger Lötlegierungen liegt bei ~220 °C. Unter Berücksichtigung der thermischen Trägheit der Baugruppen und des aktuellen Trends zur noch höheren Schmelztemperaturen muss die Temperaturbeständigkeit der Vakuumkammer und zugehöriger Komponenten dauerhaft ≥ 300 °C betragen.

Die wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse [1], [2] und praktische Erfahrungen aus dem Kondensationslöten mit Vakuum zeigen, dass zu einer signifikanten Reduktion der Poren im flüssigen Lot in der Regel ein Vakuumlevel von ≤ 20 mbar ausreichend ist. Bei dieser und allen weiteren Angaben für das Vakuum handelt es sich stets um den Relativdruck bezogen auf den Umgebungsdruck. Der maximal zu erreichende Unterdruck in einer Kammer hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: Dem Leakage-Volumenstrom und dem maximalen Unterdruck der Vakuumpumpe. Basierend auf der Vakuumtechnik beim Kondensationslöten wurde für das Konvektionslöten mit Vakuum eine LEYBOLD-Pumpe des Typs SV100 B ausgewählt. Diese funktioniert nach dem Drehschieberprinzip und erreicht einen maximalen Unterdruck von $\leq 0,5$ mbar. Unter Berücksichtigung möglicher Leckagen sind damit Werte ≤ 1 mbar zu erwarten. Damit ist die hier zu entwickelnde Vakuumtechnik dem Bereich des Grobvakuums zuzuordnen [3].

Die Integration einer Vakuumkammer unterbricht den kontinuierlichen Lötprozess einer Konvektionsanlage, wodurch ein getakteter Prozess entsteht. Das Anlegen des Vakuums und das Erreichen des gewünschten Unterdrucks benötigt zusätzliche Zeit. Die Zykluszeit wird somit durch die Vakuumzeit verlängert. Unter Berücksichtigung

wirtschaftlicher Aspekte ist die zum Erzeugen des Vakuums notwendige Zeit möglichst kurz zu halten. Die Abpumpzeit eines Rezipienten im Bereich des Grob-
vakuums, ausgehend von Umgebungsdruck, wird durch die Beziehung

$$t = \frac{V}{S_{eff}} \cdot \ln \frac{1013}{p} \quad (2.1)$$

(mit V – Volumen der Kammer, S_{eff} – effektives Saugvermögen der Pumpe und dem Druck p) beschrieben [4]. Aus dieser Beziehung folgt, dass für niedrige Abpumpzeiten das Volumen der Kammer zu minimieren und das Saugvermögen zu maximieren ist. Zum diesem physikalischen Zusammenhang kommen jedoch weitere prozessspezifischen Faktoren hinzu, welche bei der Dimensionierung der Kammer zu berücksichtigen sind. Insbesondere ist die Größe der zu verarbeitenden Löt-Baugruppen ausschlaggebend. Basierend auf den repräsentativen Abmessungen der Baugruppen und der Option eines Doppelspursystems wurde die Kammer mit den Abmessungen $720 \times 220 \times 510 \text{ mm}^3$ (B x H x T) konzipiert. Die erste Abschätzung der Vakuumzeiten nach Gleichung (2.1 mit der LEYBOLD-Pumpe des Typs SV100 B, dem Kammervolumen von $0,08 \text{ m}^3$ und ohne Berücksichtigung von Leckagen, Rohleitungen, Ventilen etc. ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Die Abschätzung zeigt, dass bis zum Erreichen von $\leq 20 \text{ mbar}$ Unterdruck ca. 12 Sekunden notwendig sind.

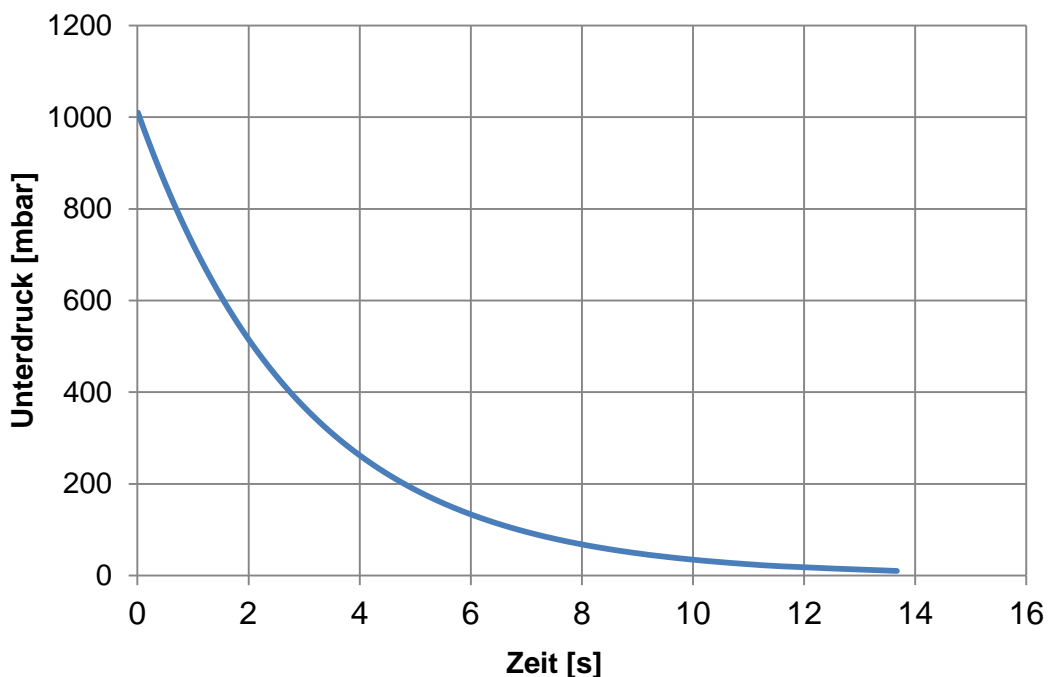


Abbildung 2.1: Theoretischer Verlauf der Auspumpzeit in Abhängigkeit von Unterdruck

Die Erfahrungen aus dem Bereich des Kondensationslötens mit Vakuum zeigen, dass für die Vakuumkammer grundsätzlich zwei Werkstoffe in Frage kommen: Stahl- oder Aluminiumlegierungen. Für die geplanten Einsatztemperaturen bis 300 °C stehen für beide Werkstoffe Legierungen mit ausreichender Temperaturbeständigkeit zur Verfügung. Neben der Dichte ρ haben beide Werkstoffe wesentliche Unterschiede bei den thermodynamischen Eigenschaften, wie der spezifischen Wärmekapazität c und Wärmeleitfähigkeit λ (Tabelle 1).

Tabelle 1: Eigenschaften von Stahl- und Aluminiumlegierungen [5]

	ρ [m ³ /kg]	c [kJ/kg·K]	λ [W/m·K]
Stahl	7,9	0,51	14
Aluminium	2,7	0,94	204

Die Vakuumkammer soll identisch zu den klassischen Heizzonen einer Konvektionslötanlage mit einer geregelten Heizvorrichtung ausgestattet werden, um im Betrieb eine optimale Reflow-Temperatur-Zeit-Profilierung zu gewährleisten. Für eine gleichmäßigere Temperaturverteilung und zügige Temperaturänderung ist die höhere Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums von Vorteil. Der Einfluss der höheren Wärmespeicherkapazität des Aluminiums auf das Aufheizverhalten ist im Vergleich zu Stahl gemäß der Beziehung

$$\Delta Q = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

aufgrund der um den Faktor 2,83 geringeren Dichte und um den Faktor ~1,5 größeren Materialvolumens zu vernachlässigen. Allerdings ist das Aluminium ein weit verbreiteter Leichtbauwerkstoff und bestens zur Konstruktion von räumlichen Strukturen geeignet.

Nach der Definition der Kammergröße und des Materials wurde die Kammer konzipiert und konstruiert. Für die Bauweise einer Vakuumkammer für die Elektronikfertigung gibt es grundsätzlich zwei Ansätze: Kammer mit Schotts oder die Schalenbauweise. Die Vorteile und Nachteile einer Kammer mit Schotts sind aus den Untersuchungen an den vorhandenen Kondensationslötanlagen sehr gut bekannt. Die Ausführung mit den Schotts erlaubt es sowohl, Batch- als auch Durchlaufanlagen zu realisieren. Aufgrund der hohen Anzahl an Zuleitungen zur Vakuumkammer für Heizmodule, Kühl-, Injektions- und Absaugverrohrung ist beim Kondensationslötens das Schottprinzip für beide Prozessarten vorteilhafter. Bei Durchlaufanlagen nach dem Konvektionsprinzip überwiegen aufgrund der geringeren Anzahl an Anschlüssen, Dichtungsstellen, Stellantrieben etc. die Vorteile der Schalenbauweise. Aus diesem Grund wurde die Entwicklung der Vakuumkammer in Schalenbauweise mit einer statischen und einer beweglichen Hälfte realisiert.

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der AlMg-Legierung bei 260°C [5]

	E-Modul [MPa]	Dehngrenze [MPa]	Poissonzahl [-]
AlMg	62 000	90	0,35

Im Hinblick auf mechanische Lasten besitzt das Aluminium eine geringere Steifigkeit und Biegezugfestigkeit. Daher wurde im nächsten Schritt der erste Entwurf der Vakuummkammer aus Aluminium mit der Finiten Elemente Methode (FEM) überprüft. Ziel war es, die schwächste Stelle der Konstruktion sowie die maximale Verformung der Konstruktion herauszufinden. Basierend auf dem erstellten Konstruktionsmodell wurde ein Modell für die FEM in SolidWorks abgeleitet. Aufgrund der Symmetrie und der ähnlichen Konstruktion beider Schalenhälften wurde nur $\frac{1}{4}$ Modell genutzt. Die Temperaturbeanspruchung der AlMg Legierung führt zu einer Reduktion der Steifigkeit; dies wurde durch einen E-Modul von 62 GPa berücksichtigt (Tabelle 2). Die im Betrieb auftretenden temperaturbedingten Alterungseffekte können mit dem linear-elastischen Ansatz nicht berücksichtigt werden, so dass mit entsprechenden Sicherheitsfaktoren im Modell berechnet wird. Die vernetzte Geometrie ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

Zusätzlich zu den thermischen wirken auf die Vakuummkammer auch mechanische Belastungen. Diese resultieren aus der Wärmeausdehnung, Bewegung der oberen Schalen-Hälfte und dem Unterdruck. Die Lasten infolge der thermischen Ausdehnung können durch passende Kombination von Materialien mit konstruktions-technischen Optimierungen gut abgefangen werden. Die Bewegungskräfte sind im vorliegenden Fall gering, so dass die Konstruktion nur auf die Belastung durch den Unterdruck zu prüfen ist. Das Erzeugen des Vakuums führt zu einer Flächenbelastung der Kammer. Die Druckdifferenz im ungünstigsten Belastungsfall beträgt 1012 mbar bei einem Außendruck von 1013 mbar und einem Unterdruck in der Kammer von 1 mbar. Wie in Abbildung 2.3 zu sehen ist, kann diese Druckdifferenz als Flächenlast mit 0,1 MPa im Inneren der Kammer modelliert werden.

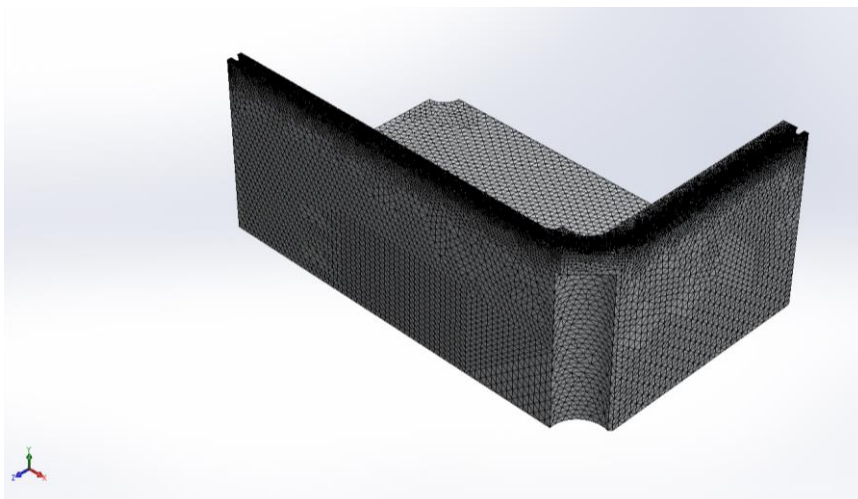


Abbildung 2.2: Vernetztes $\frac{1}{4}$ Model der Vakuummkammer

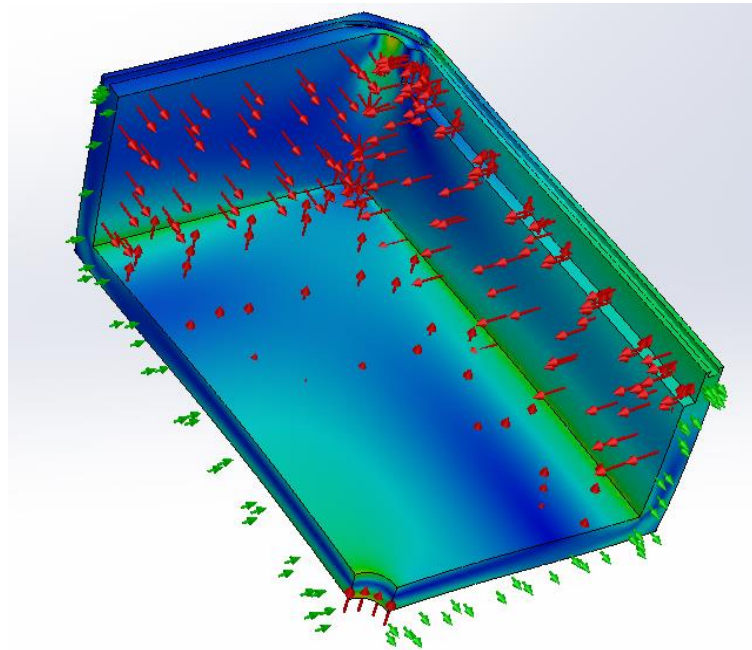


Abbildung 2.3: Symmetrie- (grüne Pfeile) und Lastbedingungen (rote Pfeile) des $\frac{1}{4}$ - Modells

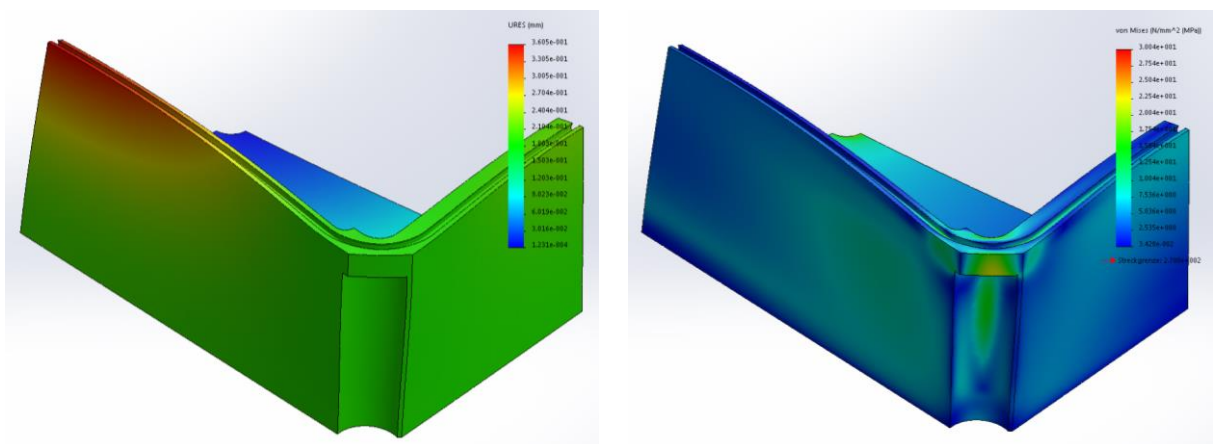


Abbildung 2.4: Gesamtverformung der Vakuumkammer (links) und Von-Mises-Vergleichsspannungen (rechts) der Kammer bei 0,1 MPa Flächenlast

Die Simulationsergebnisse in Abbildung 2.4 (links) zeigen, dass die größte Verformung von 0,36 mm in den längsten Kammerwänden auftritt. Die maximale Vergleichsspannung der Konstruktion beträgt 30,04 MPa (Abbildung 2.4 rechts). Die am stärksten beanspruchte Stelle der Konstruktion liegt im Bereich der Radien. Hier kommt es infolge der Biegung beider Seitenflächen zu einer Belastung von 30,04 MPa. Als Auswertungskriterium sind in der Abbildung 2.5 (links) die Von-Mises-Spannungen dieser Stelle vergrößert dargestellt. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass mit der Fließgrenze von min. 90 MPa bei 260°C die Konstruktion einen Sicherheitsfaktor 3 gegen bleibende plastische Verformung aufweist.

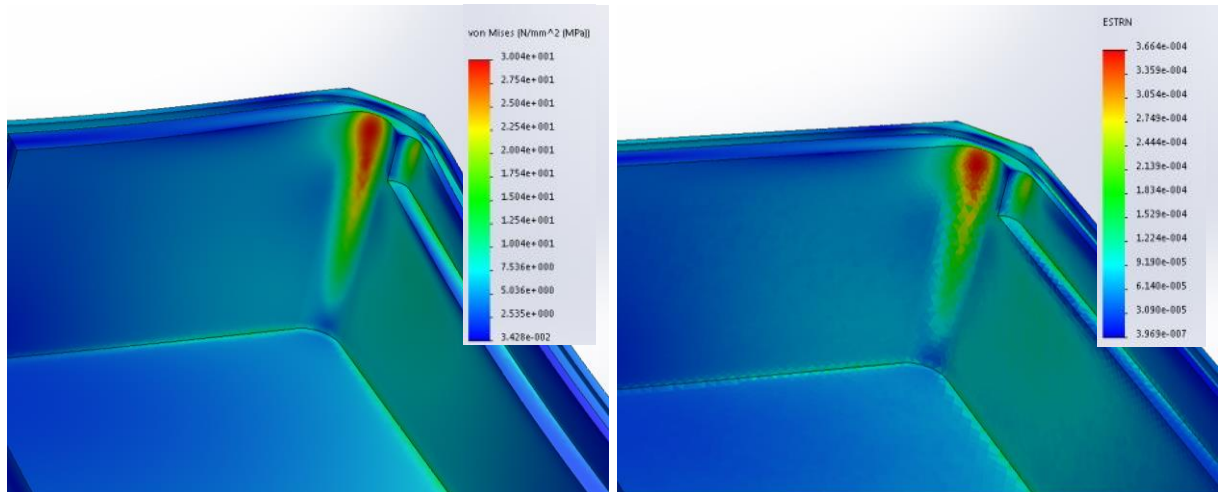


Abbildung 2.5: Von-Mises-Vergleichsspannungen (links) und Gesamtverformung (rechts) im Bereich der Radien bei 0,1 MPa Flächenlast

Im Betrieb führt das Anlegen des Vakuums und anschließendes Belüften zu einer zyklischen Belastung der Vakuumkammer. Die zeitliche Auswirkung dieser Wechselbelastung kann anhand von Wöhlerdiagrammen abgeschätzt werden. In Abbildung 2.6 ist die Dehnungs-Wöhlerlinie der AlMg-Legierung dargestellt [6]. Aus diesem Diagramm folgt, dass trotz der maximalen Dehnung von 0,037 % im Bereich der Radien die Konstruktion dauerfest ausgelegt ist und es auch unter Berücksichtigung von temperaturbedingten Gefügeänderungen nicht zu einem Anriss oder komplettem Versagen kommen kann. Nach den erfolgten Simulationsdurchläufen inklusive Optimierungen und anschließender Plausibilitätsprüfung wurde das Design der Kammer festgelegt.

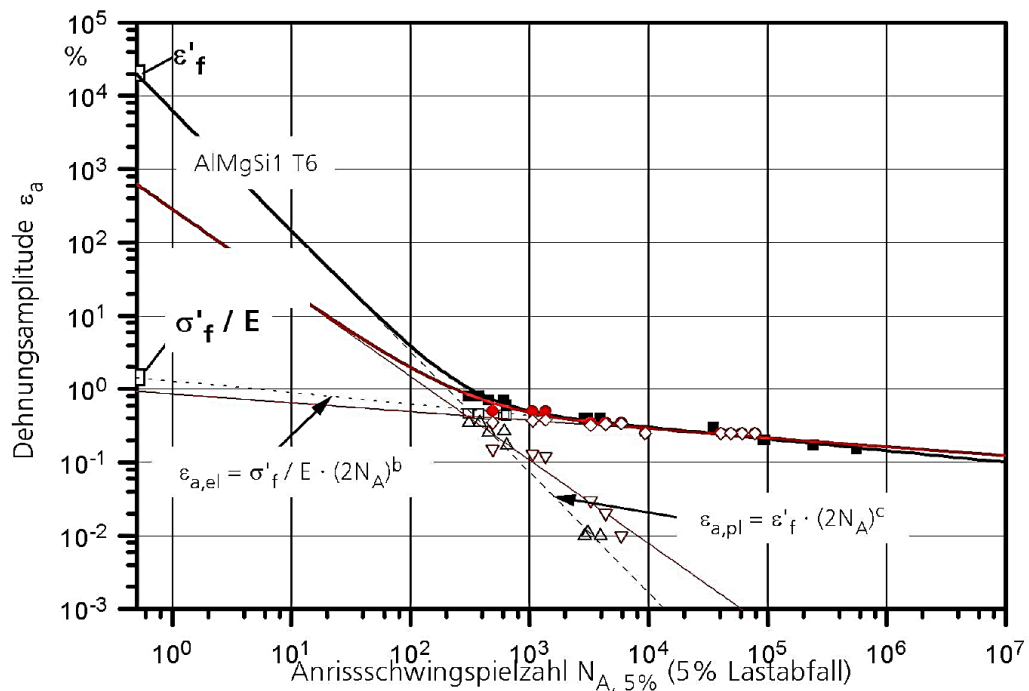


Abbildung 2.6: Wöhlerlinie der AlMg-Legierung ermittelt an Rundproben [6]

2.1.2. Mechanik und der Vakuumpfad

Die Schalenbauweise der Kammer erfordert im Gegensatz zu der Ausführung mit den Schotts eine aufwändigere Hub- und Verschlussmechanik. Aufgrund der bis zu 300 °C hohen Temperaturen in der Reflowlötanlage, kommen grundsätzlich zwei Ausführungsformen der Hubeinheiten in Frage: pneumatisch oder elektromechanisch. Zuerst wurden die energetischen und umweltrelevanten Aspekte beider Antriebsarten recherchiert und verglichen.

In der Abbildung 2.7 ist vergleichend der Energieverbrauch beider Antriebsarten und zusätzlich der Hydraulik für sehr ähnliche Betriebsparameter dargestellt. Die Energiebilanz zeigt deutlich, dass der elektromechanische Antrieb einen um den Faktor 10 geringeren Energiebedarf im Vergleich zur Pneumatik aufweist. Auch die aktuellen Untersuchungen zur gesamten Produktökobilanz belegen, dass auch unter Berücksichtigung der Produktions- und Recyclingkosten die elektromechanische Hubeinheit für die geplante Anwendung umweltschonender ist [7].

Aus prozesstechnischer Sicht kommen elektromechanische Antriebe insbesondere bei Bewegungen mit großen Geschwindigkeiten und Hublängen zum Einsatz. Bei Aufgaben mit stufenloser Regelung und hohen Anforderungen an die Robustheit, sind dagegen die pneumatischen Antriebe von Vorteil. Zusätzlich sind die pneumatischen Antriebe um den Faktor 7 günstiger in der Anschaffung.

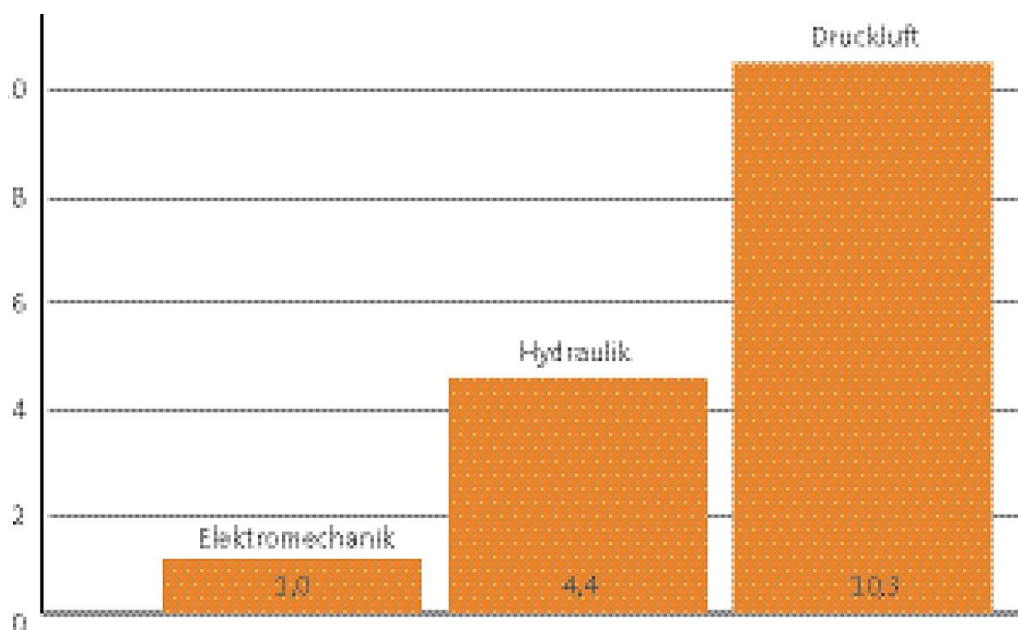


Abbildung 2.7: Jährlicher Energieverbrauch für 50 cm Hublänge und 1000 N Hubkraft [8]

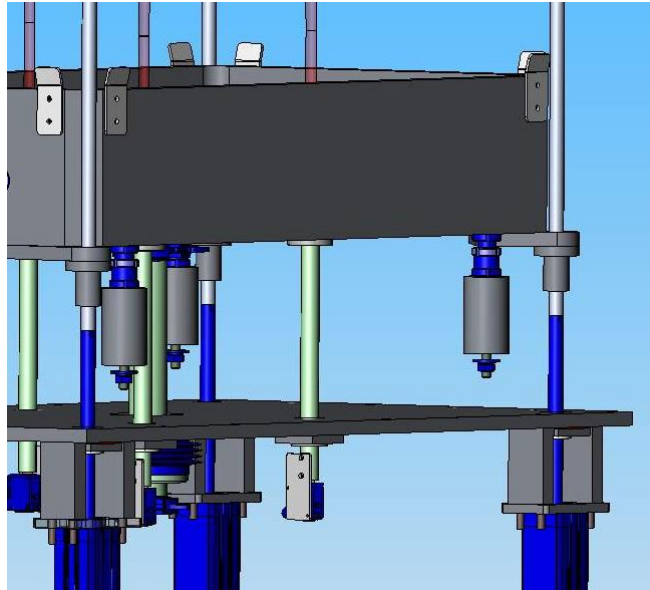


Abbildung 2.8: Konstruktion der Vakuumkammer mit pneumatischen Antrieben

Aufgrund hoher Temperaturbelastung und der latenten Verschmutzungsgefahr durch kondensierenden Lötrauch im Inneren der Anlage wurde die Verschlussmechanik des ersten Prototyps mit pneumatischen Antrieben konstruiert und aufgebaut. Die Abbildung 2.8 zeigt die 3D-Konstruktion des Verschlusses.

Im Anschluss wurde die Verschlussmechanik der Vakuumkammer getestet und folgende Schwachpunkte der Konstruktion festgestellt:

- Schwere und ungenaue Dosierung der Volumenströme
- Schlechtes Abbremsverhalten bei guter Beschleunigung
- Asynchrones Verfahren aufgrund hoher Temperaturdifferenz

Des Weiteren zeigte sich, dass selbst bei einem präzisen Einstellen der Hub-einheiten im kalten Zustand, sich nach dem Aufheizen das Schließverhalten deutlich verschlechterte. Ursächlich für diese Diskrepanz sind nicht voraussagbare thermische Ausdehnungen der Konstruktion. Diese konnte durch die Optimierung der Werkstoff-auswahl und Anbindung der Komponenten leider nicht vollständig beseitigt werden.

Aufgrund dieser Abweichungen musste im Rahmen eines Redesigns der Verschluss mit elektromechanischen Antrieben konstruiert werden. Mit Hilfe nur einer Antriebs-einheit und Kettentransmission wurde ein sehr gleichmäßiges und synchrones Verfahren der oberen Kammerhälfte ermöglicht. Die für die Zykluszeit wichtige Dauer des Zu- und Auffahrens der Kammer konnte auf 1,2 Sekunden gesenkt werden. Um die Anfälligkeit des Systems für Verschmutzungen zu reduzieren, wurde die Antriebs-einheit außerhalb der Prozesskammer installiert. Die wesentlichen Vorteile des realisierten Systems sind:



Abbildung 2.9: Verbindung der Vakuumkammer mit den Hubzylindern

- Geringerer Energieverbrauch
- Gute Synchronisation der Stellantriebe
- Gute Positionsgenauigkeit
- Wartungsarm

Als Nachteil stellte sich während der Testphase der Geräuschpegel insbesondere bei hohen Drehzahlen heraus. Da die ersten Schallmessungen an einem offenen unverkleideten Prototypen gemacht worden sind, kann davon ausgegangen werden, dass im eingebauten Zustand der Schallpegel durch die thermische Isolierung deutlich gesenkt wird.

Bei überwiegender Anzahl der Anwendungen ist das Anschließen der Vakuumpumpe direkt an die Vakuumkammer nicht möglich. Es sind fast immer ein Rohrleitungssystem, Ventile, Abscheider oder Kühlfallen notwendig. Der Vorteil einer direkten oder sehr kurzen Verbindung zwischen der Pumpe und der Vakuumkammer liegt in den sehr niedrigen Verlusten des Saugvermögens S_{eff} . Wenn der gesamte Strömungsleitwert L des Vakuumpfades gegen unendlich geht, steht dann das gesamte Saugvermögen zur Verfügung $S = S_{eff}$ [4].

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L} \quad (2.3)$$

Bei dem hier vorliegenden Anwendungsfall ist, insbesondere aufgrund der bis zu 300 °C hohen Prozess-Temperaturen, eine direkte Anbindung nicht möglich. Die **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt das Konzept des Vakuumpfades.

Der Aufbau des Unterdrucks wird bei konstanter Drehzahl der Vakuumpumpe durch ein Stellventil gesteuert. Ein Messsensor erfasst die Druck-Werte und steuert das

Ventil entsprechend an. Beim Evakuieren der Vakuumkammer kann die darin enthaltene Atmosphäre mit flüchtigen Bestandteilen der Lotpaste kontaminiert sein.

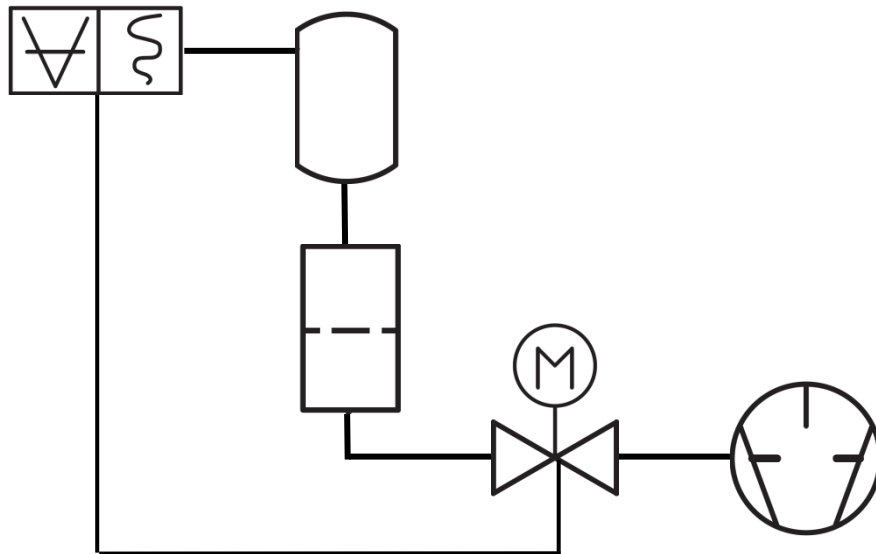


Abbildung 2.10: Konzept des Vakuumpfades

Bei ca. 270 °C liegen diese Kontaminationen sowohl als feste Partikel als auch Feinstaerosole vor. Ab ca. 150 °C kondensieren die meisten flüchtigen Bestandteile; es entsteht eine klebrige und zähe Masse. Daher ist es notwendig, zum Schutz der Pumpenmechanik einen Filter zu installieren. Dieser filtert die festen Partikel heraus und er dient gleichzeitig als Kondensatfalle für die flüssigen Bestandteile. Alle anderen Bestandteile des Vakuumpfades wurden in Anlehnung an die Kondensationslötanlage ausgelegt und aufgebaut. An einem Prototyp wurde die Funktionalität des Vakuumpfades getestet und die Abpumpzeiten gemessen. Die Abpumpzeiten wurden in Abhängigkeit der Ventilstellung und des Endunterdrucks aufgenommen. Die Abbildung 2.11 zeigt die direkt in der Vakuumkammer gemessene Abpumpzeiten bis 10 mbar bei verschiedenen Ventilstellungen.

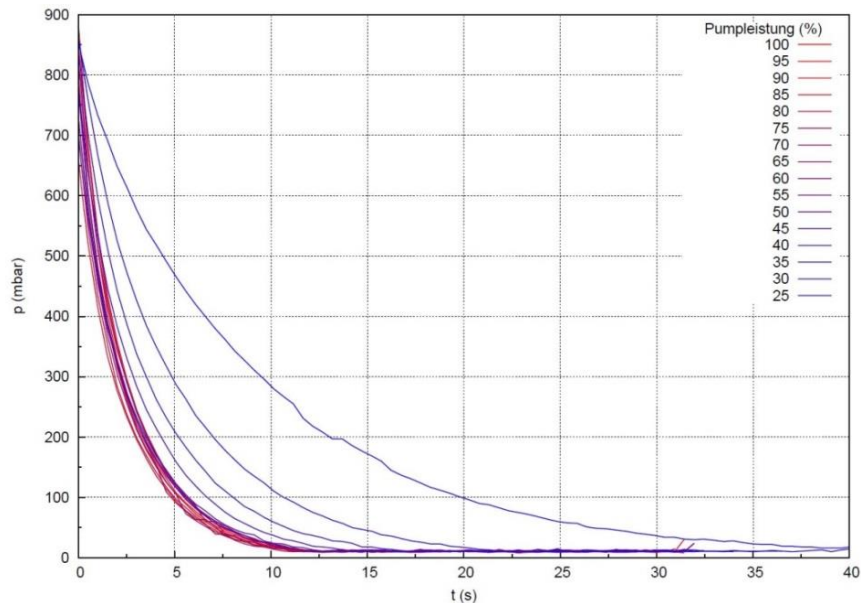


Abbildung 2.11: Abpumpzeiten der Vakuummkammer in Abhängigkeit von der Ventilstellung Parallel dazu wurden die Druckwerte vor der Pumpe gemessen. In Abbildung 2.12 ist vergleichend der berechnete sowie der in der Vakuummkammer und an der Pumpe gemessene Druck-Zeit-Verlauf dargestellt. Zwischen den berechneten und gemessenen Werten liegt insbesondere beim zeitlichen Verlauf der Druckwerte ein Unterschied vor. Zu berücksichtigen ist, dass der berechnete Verlauf für die direkt an die Kammer angeschlossene Pumpe, also ohne Verluste durch die Verrohrung und die Ventile, dargestellt ist. Gute Übereinstimmung wurde bei der berechneten und gemessenen Abpumpzeit auf 10 mbar erreicht. Die Berechnung aus Abschnitt 2.1.1 prognostizierte 13,6 Sekunden und die Messung an der Pumpe 12 bzw. in der Vakuummkammer 12,5 Sekunden.

Vakuumdurchführungen in einer Kammer dienen zur Übertragung von mechanischen Bewegungen, Elektrischen- oder Sensorsignalen in die oder aus der Kammer. Diese Durchführungen stellen auch die größte Gefahr für Bildung von Leckagen aufgrund des mechanischen Verschleißes oder temperaturbedingter Degradation dar. Der Transport in der Vakuummkammer muss aufgrund hoher Temperaturen von außen angetrieben werden. Dazu wurden mechanische Durchführungen mit einer dauerhaften Temperaturbeständigkeit bis 300 °C ausgewählt. Andere Schnittstellen mit geringerer thermischer Belastung wurden mit O-Ringen abgedichtet. Im Laufe der Testphase wurden mehrere Dichtungstypen getestet und bei einigen eine deutliche Degradation des Materials festgestellt.

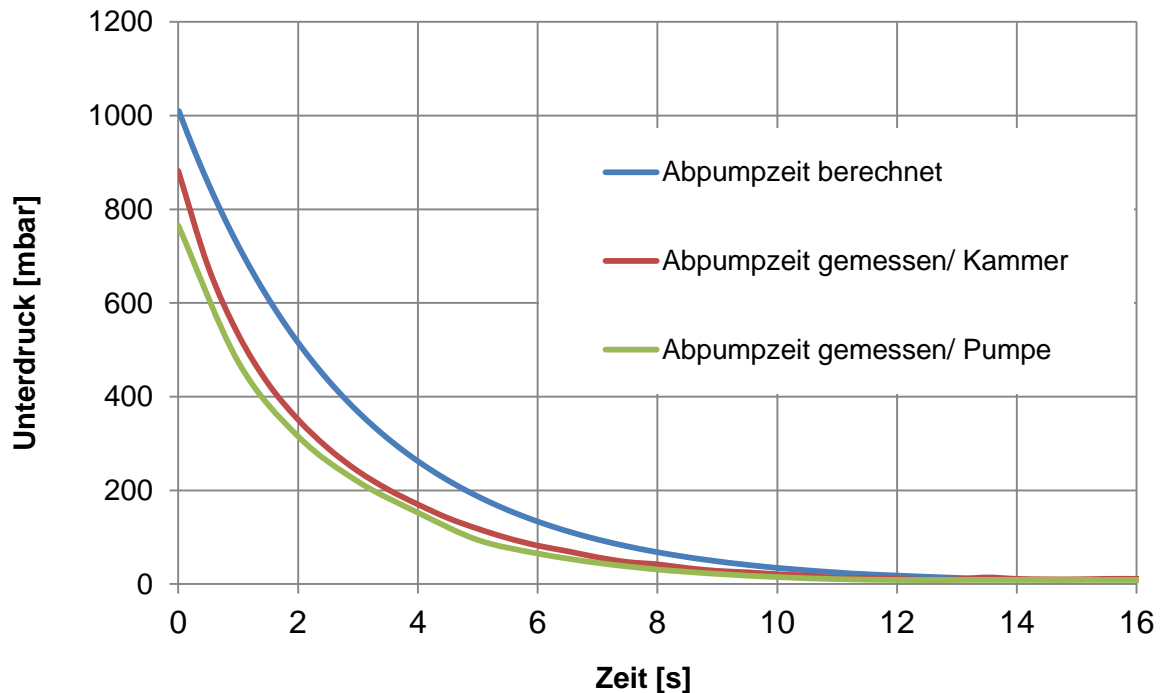


Abbildung 2.12: Berechnete und gemessene Abpumpzeit bis 10 mbar Unterdruck

2.1.3. Entwicklung und Erprobung des Mehrspurtransportsystems

Um die angestrebte Energieeffizienz der Anlage pro Löt-Baugruppe zu erreichen, wurde im nächsten Schritt ein Mehrspurtransport entwickelt. Da die Vakuumkammer das kontinuierliche Transportieren der Baugruppen unterbricht, muss der Transport aus drei Bereichen bestehen: Vorheiz-, Vakuum- und Kühlbereich. An beiden Seiten des Vakuumbereichs findet die Übergabe der Baugruppen statt. Die Anforderungen an das Transportsystem sind aufgrund der Temperaturbelastung und der Verschmutzungsproblematik sehr vielfältig:

- Kompensation der Wärmeausdehnung
- Parallelität der Transportwangen
- Vibrationsarm
- Unempfindlich gegen Feinpartikel und klebriger Ablagerungen
- Präzise Positionierung
- Wartungsarm

Der Transport in der Vakuumkammer muss zusätzlich mit sehr geringen Schmiermittelmengen oder im Idealfall schmierfrei über längere Betriebszeit bei hohen Temperaturen funktionieren. Die Forderung nach der Schmiermittelfreiheit ist zum einen durch hohe Temperaturen in der Kammer und zum anderen durch die möglichen Kontaminationen der Baugruppen durch Verdunstung des Schmiermittels beim Vakuumern begründet. Das Schmieren des Transports hat die Aufgabe, die Beweglichkeit der Transportkette zu ermöglichen und den Abrieb insbesondere an den Umlenkungen zu reduzieren. Die Reibungskraft F_R und damit der Abrieb hängen von der Normalkraft und dem Reibungskoeffizient μ ab.

Vakuum	Vakuumfett oder -öl auf Fluorbasis (Dampfdruck variiert je nach Marke) <small>Anm. 1</small>	Fomblin Fett (Solvay Solexis) Fomblin Öl (Solvay Solexis) Barrierta IEL/V (Klüber Lubrication) Isoflex (Klüber Lubrication) Krytox (Dupont) Demnum (Daikin Industries, Ltd)
--------	--	--

Abbildung 2.13: Vakuumschmierstoffe für besondere Bedingungen (Quelle: tech. THK)

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (2.4)$$

Die Normalkraft kann durch die Vorspannung der Kette oder die Größe der Auflagefläche beeinflusst werden. Der Reibungskoeffizient μ ist von der Materialpaarung, Oberflächengüte und dem eingesetzten Schmiermittel abhängig. Die mechanische Konstruktion des Transports wurde so ausgeführt, dass die Bewegung der Kette an den Orten mit größter Normalkraft mit Umlenkhilfen unterstützt wurde. Die ersten Tests zeigten jedoch, dass die Realisierung eines schmiermittelfreien Transports in der Vakuumkammer mit sehr hohen Fertigungs- und Materialkosten verbunden ist. Aus diesem Grund kann bei der Mechanik im Kammerinneren auf eine geringe Menge an Schmierstoffen nicht verzichtet werden.

Die Einsatztemperaturen für die gängigsten Schmierfette liegen zwischen -30 °C bis $+140\text{ °C}$, was für einen Einsatz in der Vakuumkammer nicht ausreicht. Des Weiteren muss das Schmierfett möglichst geringe Verdampfungsverluste beim Vakuumziehen ausweisen, sonst droht die Gefahr von Mangelschmierung. Daher ist hier ein vakuumtauglicher und für den Hochtemperaturbereich geeigneter Schmierstoff anzuwenden. Abbildung 2.13 zeigt eine kurze Übersicht der auf dem Markt verfügbaren Vakuumschmierfette.

Eine gute Alternative zum Schmieren beweglicher Teile bei hohen Temperaturen bieten die Festschmierstoffe. Diese bestehen aus kleinen Partikeln, z.B. Grafit, MoS_2 (Molybdänsulfid) oder PTFE (Polytetrafluorethen), in Kombination mit einem Fett oder Öl. Festschmierstoffe eignen sich insbesondere für hohe Betriebstemperaturen. Dabei kommt es bei hohen Temperaturen und Unterdruck zum im Idealfall rückstandlosen Verdunsten der flüchtigen Bestandteile, während die Partikel zurückbleiben und die Schmieraufgabe übernehmen

Bei einer Anwendung im Vakuum können auch deutlich höhere Temperaturbereiche abgedeckt werden, da die sonst vorhandene Oxidation der Partikeln deutlich durch das Vakuum verringert wird. In Abbildung 2.14 ist eine Übersicht der gängigsten Partikeltypen mit den entsprechenden Einsatzbedingungen dargestellt [9]. Die Anwendung eines Festschmierstoffes in einer Vakuumkammer für die Elektronikfertigung ist aufgrund der Ausdunstungen und möglicher Kontaminationen der Baugruppen durch die Partikel ebenfalls nur bedingt möglich.

Handelsform	Aufbau	Einsatztemperatur	Anwendung
Pulver	Aus Mineralien oder Synthese gewonnene Festschmierstoffe versch. Korngröße	Grafit: 450°C MoS ₂ : 450°C PTFE: 260°C	Behandlung von Massenteilen - Entfettung erforderlich, Aufrauung ratsam (Oberflächentechniken)
Hochtemperaturpasten	Anteigen von Festschmierpulvern in nahezu rückstandsfrei verdampfenden Ölen, Feststoffanteil: ca. 50 Gew.-%	entsprechend der Festschmierstoffart	Niedrigtourige Lager bei Temperaturen über ca. 200°C, wie z.B. Brennofenwagenlager. Nachschmierung erfolgt mit Suspensionen, welche den gleichen Ölträger wie die Hochtemperaturpasten besitzen. Paste nur dünn auftragen.
Gleitlacke	Dispersionen von Festschmierstoffpulvern mit organischen Bindemitteln und geeigneten Lösemitteln	Organische Gleitlacke: lufttrocknend: 80/150°C hitzehärtend: 180/300°C Anorg. Gleitlacke: 600°C	Niedrigtourige Lager, oszillierende Bewegungen, intermittierender Betrieb, Verhinderung von Freßerscheinungen. Anorg. Gleitlacke neigen im Ultrahochvakuum nicht zum Verdampfen und sind strahlungsstabil.

Abbildung 2.14: Typen der Trockenschmierstoffe und Einsatztemperaturen [9]



Abbildung 2.15: Ölrückstände an der Transportkette nach einem Test bei 270°C/ 30 Tage

Im Laufe der Untersuchungen wurden mehrere Schmierfette bei betriebsnahen Bedingungen getestet. Als Ergebnis wurden dann die Menge an Rückständen (insbesondere auf der Transportkette) und der Abrieb beurteilt. Parallel dazu wurden auch die verschiedenen Kombinationen aus Kettenwerkstoffen, Umlenkrollen und mechanischen Ausführungen der Wangen untersucht.

Anhand der Testergebnisse wurde die Konstruktion des Doppelspursystems festgelegt. Zum Minimieren der Reibung und des Abriebs wurde die Schmierung in dem Vorheiz- und Kühlbereich mit Kettenöl realisiert. In der Vakuumkammer zeigte das Vakuumfett Klüberalfa die besten Ergebnisse. Mit keiner der Modifikationen konnte ein schmierfreier Transport, der sich durch geringe Vibrationen und wenig Verschleiß auszeichnet, erreicht werden. Die größte Herausforderung der Entwicklungsaufgabe „Mehrspurtransportsystem“ lag jedoch bei der Konzeption der Mittenunterstützung und der Übergabe der Leiterplatten in die bzw. aus der Kammer. Das liegt daran, dass bei konventionellen Lötanlagen der Transport durchgängig ist, und

für einen geteilten Transport nur wenige praktische Erfahrungen vorliegen. Es hat sich aber gezeigt, dass durch die Minimierung der Übergabelänge und exakter Ausrichtung der Vakuumkammer für die überwiegende Anzahl der Produkte ein gutes Ergebnis erreicht werden kann. Abbildung 2.16 zeigt das doppelspurige Transportsystem.

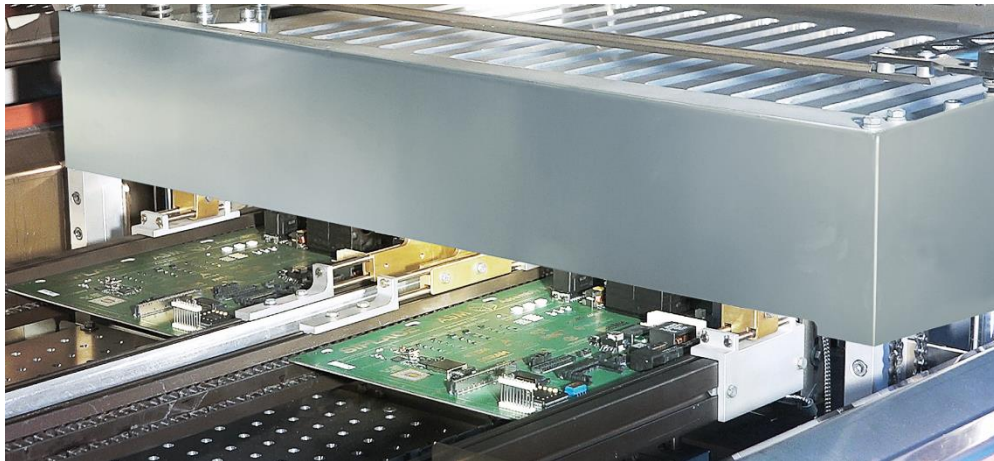


Abbildung 2.16: Doppelspur-Transportsystem, Übergabebereich in die Kammer

2.1.4. Entwicklung des thermischen Reaktors

Wie im Abschnitt 1 beschrieben, werden beim Löten flüchtige Bestandteile aus der Lotpaste, der Leiterplatte und den Komponenten freigesetzt. Zu den flüchtigen Aerosolen kommen noch die Feinpartikeln hinzu. Aus den firmeneigenen Voruntersuchungen ist bereits bekannt, dass das neue Abscheidesystem sowohl flüchtige als auch partikelförmige Substanzen abbauen muss. Nur zu einem geringen Anteil ist die Fließfähigkeit von Residues durch die Temperatur der Abscheidesysteme beeinflussbar. Kristalline Abscheidungen sind nicht in jedem Fall wieder aufschmelzbar, wie auf Abbildung 2.17 zu sehen ist, so dass Abscheidesysteme für ausschließlich flüssige Residues nur in begrenztem Umfang einsetzbar sind. Aus diesem Grund wurde ein Abscheidungssystem auf Basis eines thermischen Reaktors, der thermischen Pyrolyse (auch als Cracken bekannt), entwickelt.

Beim Cracken werden die langkettigen Kohlenwasserstoffverbindungen durch das Erhitzen auf Temperaturen $> 400\text{ °C}$ in Schwingung versetzt und in kurzkettinge Komponente gebrochen [10]. Neben der Temperatur beeinflusst die Verweilzeit und der Partialdruck das Cracken. Da sich der Druck in einem thermischen Reaktor mit einem vertretbaren Aufwand nur bedingt anpassen lässt, sind für die Auslegung des Reaktors die Temperatur und der Durchsatz ausschlaggebend.

Eine weitere Möglichkeit das Cracken zu beeinflussen, bietet die Anwendung von Katalysatoren. Ein Katalysator reduziert sowohl die Zersetzungstemperatur als auch die Verweildauer, woraus sich eine Ersparnis an Energie und Zeit ergibt. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt in einer sehr guten Abstimmung des Katalysators an

das umzuwandelnde Produkt und es dürfen nur geringe Mengen an störenden Elementen vorhanden sein. Beim Missachten dieser Regeln oder beim Vorliegen von Schwefelverbindungen wird der katalytische Prozess deaktiviert [11]. Aus diesem Grund ist die thermische Pyrolyse ein robusteres Verfahren. Insbesondere unter der Bedingung, dass die chemische Lotrauchzusammensetzung sich je nach Lotpasten-, Komponenten- und Leiterplattentyp stark unterscheidet.

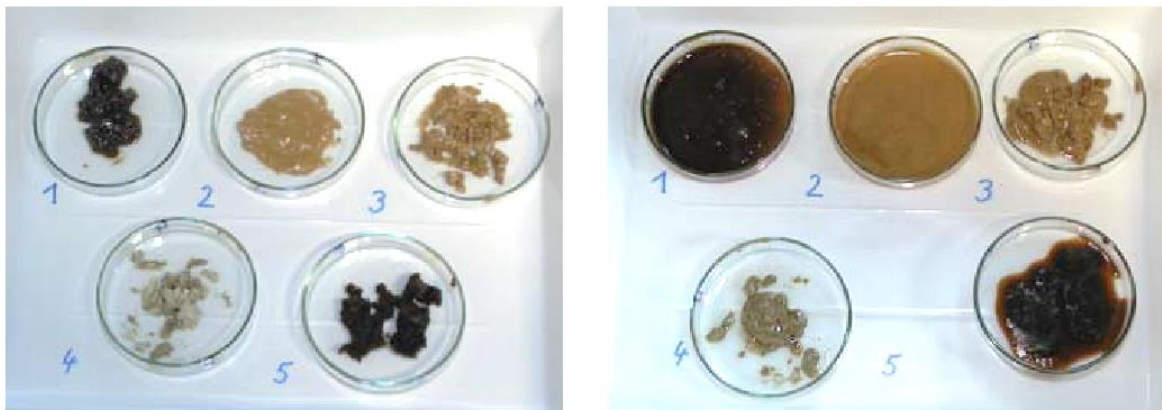


Abbildung 2.17: Verschiedene Residuetypen vor (links) und nach dem Aufschmelzversuch (rechts)



Abbildung 2.18: Filtergranulat des thermischen Reaktors

Aufgrund oben dargelegter Erkenntnisse aus der Konzeptionsphase wurde für den thermischen Reaktor ein Arbeitspunkt um ca. 500 °C ausgewählt. Der Durchsatz der Pyrolyse und damit die Verweilzeit, sind durch die zur Verfügung stehende Menge an Treibmedium (Stickstoff) und den Einbauraum limitiert. In einer Produktionsanlage, wie einer Reflowlötanlage, steht nicht grenzenlos Platz zur Verfügung, um neue zusätzliche Aggregate aufzunehmen. Um eine hohe Verweildauer des Rohgases (Lötrauch) im Reaktor zu erreichen, muss entweder der Volumenstrom gering oder der zu durchströmende Querschnitt ausreichend groß sein, um die Strömungsgeschwindigkeit zu reduzieren. Aus Platzgründen hat sich ein Flächenverhältnis von 1/8 als ein gutes Kompromiss erwiesen. Um den Wärmeübergang von den Heizpatronen und das Abscheiden von Feinstaubpartikeln zu verbessern, wurden

mehrere Granulattypen in Bezug auf Druckverlust, Wartungsfreundlichkeit und Wärmeleitfähigkeit untersucht. Zum Schluss dieses Entwicklungsabschnittes wurde der Zwischenraum im Reaktor mit einem geeigneten Granulat gefüllt (siehe Abbildung 2.18).



Abbildung 2.19: Prototypentest des thermischen Reaktors

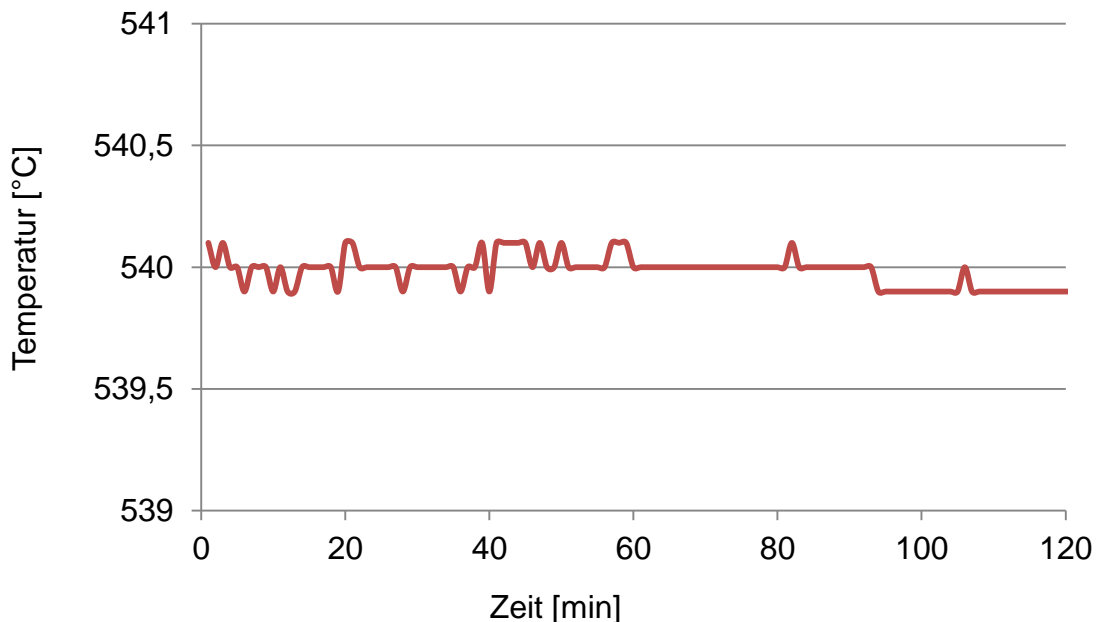


Abbildung 2.20: Temperaturverlauf im thermischen Reaktor

Nach dem Aufbau wurde der erste Prototyp an eine bestehende Anlage angeschlossen und die Tests gefahren. Abbildung 2.19 zeigt den Versuchsaufbau mit dem thermischen Reaktor. Bei den Tests wurden die Temperatur und der Volumenstrom überwacht (siehe Abbildung 2.20). Die Abscheidungsrate von Kohlewasserstoffen und Partikeln wurde an den Prototypen nicht gemessen. Der Grund hierfür liegt in

der Schwierigkeit, dass die Simulation betriebsähnlicher Zustände nur an der gesamten Reflowlötanlage möglich ist.

2.1.5. Wärmetauscher

Die Temperatur der Atmosphäre in der Vakuumkammer beträgt ca. 250 bis 270 °C. Der aufgeheizte Volumeninhalt der Vakuumkammer wird zur Erzeugung des Vakuums innerhalb von ca. 12 Sekunden auf 10 mbar evakuiert und die Kammer anschließend mit kalter Luft oder Stickstoff (ca. 20 °C) befüllt, um wieder Normaldruck herzustellen. Das abgesaugte Gasvolumen wird in der Regel aus dem Prozess über das interne Hausabluftsystem entfernt. Um die Energiebilanz zu verbessern, sollte zwischen den beiden Strömungsvolumen ein Energieaustausch stattfinden. Die Energierückgewinnung erfolgt in der Regel mit Hilfe eines Wärmetauschers. Zur technischen Auslegung eines Wärmetauschers ist es notwendig, neben dem Volumenstrom auch die Temperaturen zu kennen. Aus diesem Grund wurde im nächsten Schritt die Temperatur der aus der 270 °C heißen Kammer abgesaugten Atmosphäre im 1,5 Meter langen Rohrsystem gemessen.

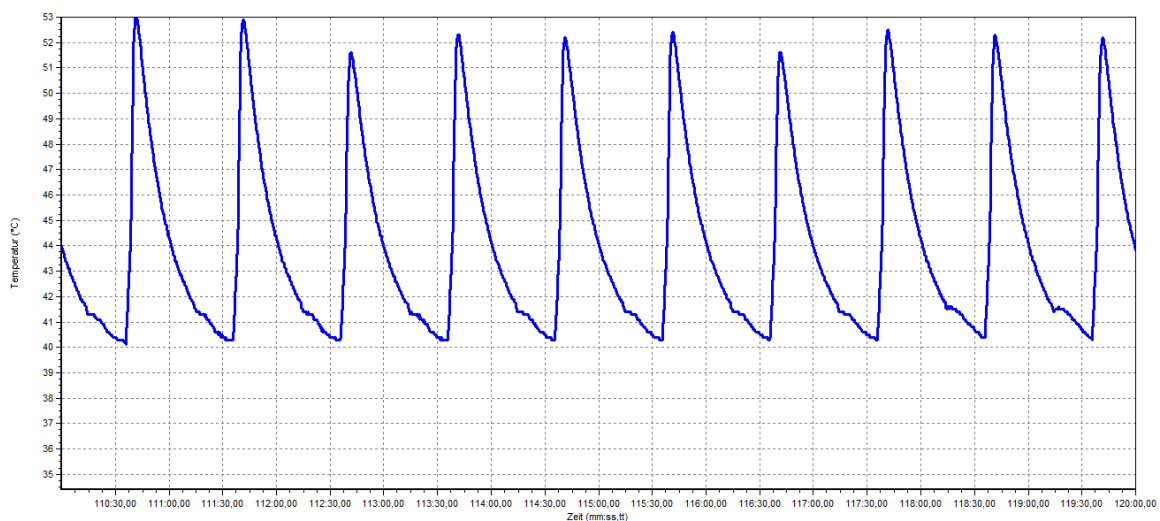


Abbildung 2.21: Temperatur der evakuierten Atmosphäre

Wie in Abbildung 2.21 zu sehen ist, schwankt die Temperatur an der Messstelle zwischen 40 °C vor dem Belüften (Normaldruck) und 53 °C direkt nach dem Evakuieren. Die gemessene Temperaturdifferenz und damit die gespeicherte Wärmemenge sind für eine effiziente Anwendung eines Wärmetauschers nicht ausreichend. Die niedrige Wärmemenge liegt darin begründet, dass die pro Zyklus abgesaugte Gasmenge zu gering ist. Nach Gleichung (2.2 beträgt die gespeicherte Wärmemenge einer Kammerfüllung bei 270 °C ca. 9176 J bezogen auf die Raumtemperatur. Auf eine Stunde hochgerechnet können maximal 0,18 kWh zurückgewonnen werden. Damit ist unter Berücksichtigung der Verluste an die Umgebung nur ein verschwindend geringer Energieeinsparpotential vorhanden. Als Folge für die

konstruktionstechnische Auslegung der Anlage ergibt sich daraus die Möglichkeit, die Vakuumpumpe direkt an den thermischen Reaktor anzuschließen und so die gereinigte Atmosphäre wieder dem Prozess zu zuführen.

Um die Gesamtenergiebilanz der Anlage zu verbessern, wurde das ursprüngliche Konzept überarbeitet und ein Wärmetauscher zum Vorwärmen/Abkühlen der Prozessgase vor bzw. nach der Pyrolyse konzipiert. Die Betriebstemperatur des thermischen Reaktors von mindestens 500 °C ist unbedingt notwendig, um die langkettigen Kohlenstoffverbindungen zu cracken. Dies hat aber auch zur Folge, dass die gereinigten Gase mit zu hoher Temperatur in die Prozesskammer zurückgespeist werden. Um die Rückspeisetemperatur zu reduzieren, wird aktuell (bei vergleichbaren Anlagen) mit wenig energieeffizienten Kühlkonzepten gearbeitet. Daher wurden in der Konzeptionsphase die Einsatzmöglichkeiten verschiedener Konstruktionen des Wärmetauschers untersucht. Grundsätzlich kommen für diese Anwendung zwei Wärmetauscherbauarten in Frage: Rohr in Rohr (Doppelrohr) oder ein Kreuzwärmetauscher. Zuerst wurden die Abmessungen für ein Rohr-in-Rohr-System geprüft. Dafür wurden zwei verschiedene frei verfügbare Software-Tools eingesetzt. In Tabelle 3 und Abbildung 2.22 sind die Ergebnisse für die Dimensionierung eines Rohr-in-Rohr-Wärmetauschers dargestellt [12].

Tabelle 3: Ergebnisse der Auslegung eines Rohr-in-Rohr-Wärmetauschers [12]

Ergebnisse		
Reynolds Zahl - Re - (-)	4169.7	4854.4
Prandtl Zahl - Pr - (-)	0.709	0.661
Nußelt Zahl - Nu - (-)	14.6	16.8
Wärmeübergangszahl - α - ($W/(m^2 \cdot K)$) [1]	17.5	11.8
Wärmedurchgangskoeffizient - k - ($W/(m^2 \cdot K)$)	6.94	
Wärmeaustauschfläche - A - (m^2)	1.30	
Rohrlänge - l - (m)	5.19	

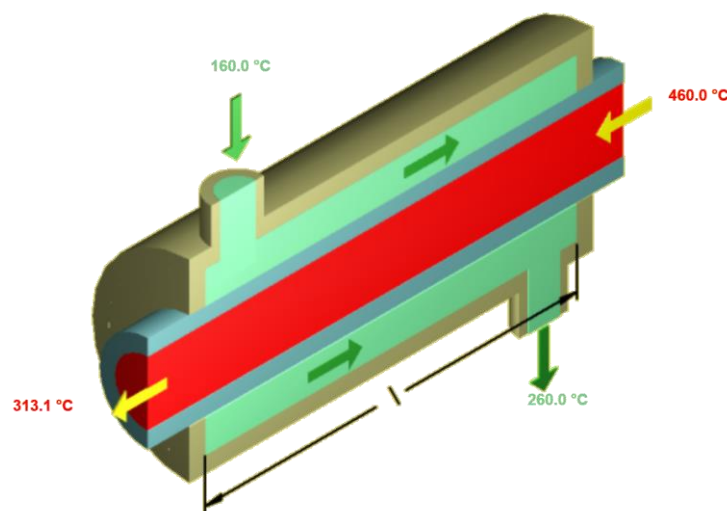


Abbildung 2.22: Berechnete Ein – und Ausgangstemperaturen an dem Doppelrohrwärmetauscher

Das zweite Auslegungstool lieferte geringfügig kleinere Abmessungen des Wärmetauschers, die deshalb hier nicht aufgeführt sind. Die Ergebnisse zeigen, dass das Rohr-in-Rohr-System eine Länge von 5,19 Meter aufweisen muss, um eine Temperaturänderung von 100 °C zu erreichen. Der übertragene Wärmestrom würde damit 1,6 kW betragen und dadurch die gleiche Menge an elektrischer Energie eingespart werden könnte.

Ein Doppelrohrwärmetauscher erfordert neben seinen Vorteilen, wie einfache und kostengünstige Bauweise, viel Platz in einer Anlage. Weiterhin ist die Inspektion oder Reinigung von 5,2 Meter langen Innen- und Außenrohren nur begrenzt gewährleistet. Ein Kreuzwärmetauscher in Plattenbauweise bietet die Möglichkeit, eine größere Austauschfläche beider Luftströme in einem kompakten Volumen zu realisieren. Eine wichtige Größe bei der Auslegung von Wärmetauschern ist der sogenannte Wärmedurchgangskoeffizient. Dieser setzt sich aus den Wärmeübergangskoeffizienten α auf beiden Seiten einer längs angeströmten ebenen Wand und der Wandeigenschaften (Dicke s und Wärmeleitfähigkeit λ) zusammen:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a}} \quad (2.5)$$

Die Wärmeübergangskoeffizienten können für eine längs angeströmte ebene Wand nach folgender Beziehung bestimmt werden:

$$\alpha = 5,8 + 4 \cdot v \quad (2.6)$$

Aus beiden Gleichungen ergibt sich für ein 1 mm dickes Edelstahlblech mit $\alpha = 8,57$ W/(m²K) die Wärmedurchgangszahl von 3,6 W/(m²K). Mit diesen Werten wurde dann die zum Wärmetransfer notwendige Austauschfläche mit zwei frei verfügbaren Berechnungsprogrammen bestimmt. Die Ergebnisse aus [13] sind in Abbildung 2.23 und aus [14] in Abbildung 2.24 dargestellt. Um eine dem Doppelrohrwärmeüberträger ähnliche Rückgewinnung von 1,6 kW zu erreichen, muss die Austauschfläche > 2 m² betragen.

Ausgabe

Austrittstemperatur 1	364,0	[°C]
Austrittstemperatur 2	262,1	[°C]
übertragene Wärmeleistung	1,7	[kW]

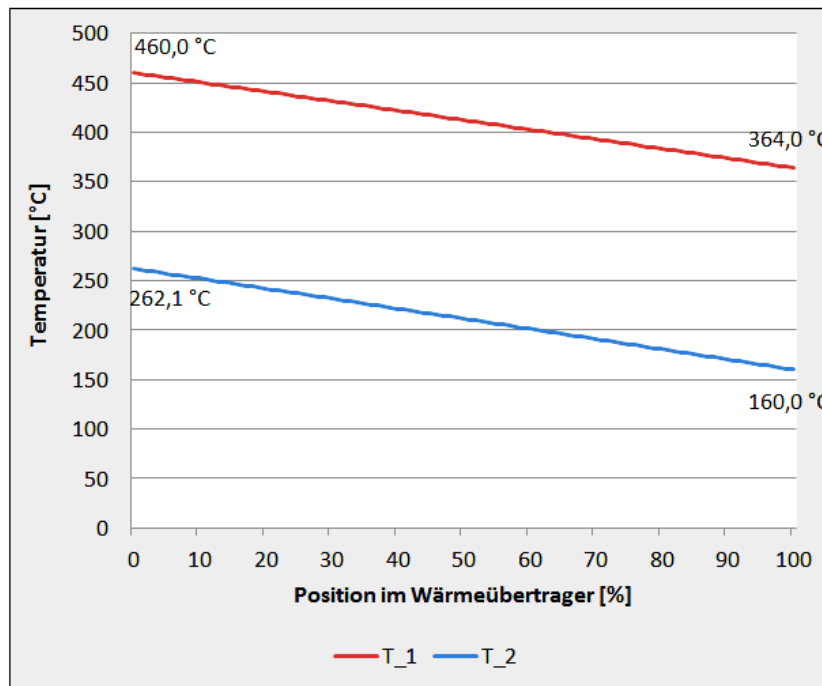


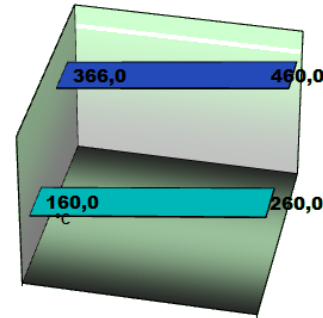
Abbildung 2.23: Mit [13] berechnete Betriebstemperaturen

General Lay-Out of AB&CO Heat Exchangers

Transfer of heat between two fluids - liquids or gasses

AB&CO · TT BOILERS www.abco.dk

		Fluid 1	Fluid 2
Mass Flow	kg/h	56	56
Specific Heat	kJ/kgK	1,018	1,083
Temperature, inlet	°C	160,0	460,0
Temperature, outlet	°C	260,0	366,0
Capacity	kW	1,6	
Log. Mid. Temp. Diff. (MTD)	K	203,0	



Correction Factor - Counter/Cross Flow (CCCF)

The CCCF corrects the MTD value when the flow is not pure counter flow i.e. the two fluids move towards each other, especially when the hot fluid outlet temperature is lower than the cold fluid outlet temperature. The CCCF then becomes lower than 1,0.

Correction Factor (CCCF)	K	0,9
MTD Corrected	K	182,7

What kind of heat exchanger will you use ? (see the explanation below)

Plate Type (1) Shell & Tube (2); Winded-up Tube Coil (3); Extented Surface / Fins (4); Others (5)

PLATE HEAT EXCHANGER - compact solution and the most economical type for liquid

Heat transfer coefficients each side - liquid up to 20.000 W/m²K, gas up to 500 W/m²K
Quite sensitive to high temperatures, high pressures, pressure variations. Not good for gas/air

Heat Transfer Coefficient (HTC)

The size of the Heat Transfer Coefficients (HTC) can be almost any value up to the limit above. It depends on the velocity, flow profile, geometry of the heat exchanger and the properties of the fluid (viscosity, heat conductivity and specific heat). When considering the size of the Heat Transfer Coefficient (HTC) it is important to use low values as a worse-case. To be sure to find the right size of the AXA heat exchanger, and an acceptable pressure drop, the HTC should be calculated (which is quite theoretical and extensive procedure). Putting in the HTC below is without any responsibility for ABCO.

Heat Transfer Coefficient, Side 1 (alfa 1)	W/m ² K	9
Heat Transfer Coefficient, Side 2 (alfa 2)	W/m ² K	9
Overall Heat Transmission Coefficient (k-value)	W/m ² K	4
Necessary Heat Surface (F')	m ²	2,0
Extra surface (general safety margin)	%	15
Actual Heat Surface (F'')	m ²	2,3

Abbildung 2.24: Mit [14] berechnete Betriebstemperaturen und die erforderliche Austauschfläche

Theoretisch kann mit einem Wärmetauscher bis zu 3 kW Wärmeleistung zurückgewonnen werden. Da aber das abgekühlte Prozessgas dem Prozess zurückgeführt und wieder aufgeheizt werden muss, ist es aus der Sicht der Gesamtenergiebilanz nicht zielführend. Die fast vollständige Wärmerückgewinnung verlangt eine größere Austauschfläche und damit noch mehr Bauraum. Alternativ könnte ein Hochleistungswärmetauscher mit einem Wirkungsgrad von bis zu 90 % zur Anwendung kommen. Diese sind aber aufgrund der hohen Kosten und insbesondere ihrer höheren Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen nicht auf Dauer sicher zu betreiben.

Im nächsten Schritt der Untersuchungen wurde der Kreuzwärmetauscher konstruiert und aufgebaut. Die Herausforderungen während der mechanischen Konstruktion lagen insbesondere darin, den Wärmetauscher möglichst kompakt und zerlegbar zu gestalten. Es war zu erwarten, dass es aufgrund von Temperatur und Drucksprüngen zum Ansammeln von Partikeln und zur Kondensatbildung im Wärmetauscher kommen kann. Vor dem Einbau des Wärmetauschers wurde dessen Funktionalität geprüft.

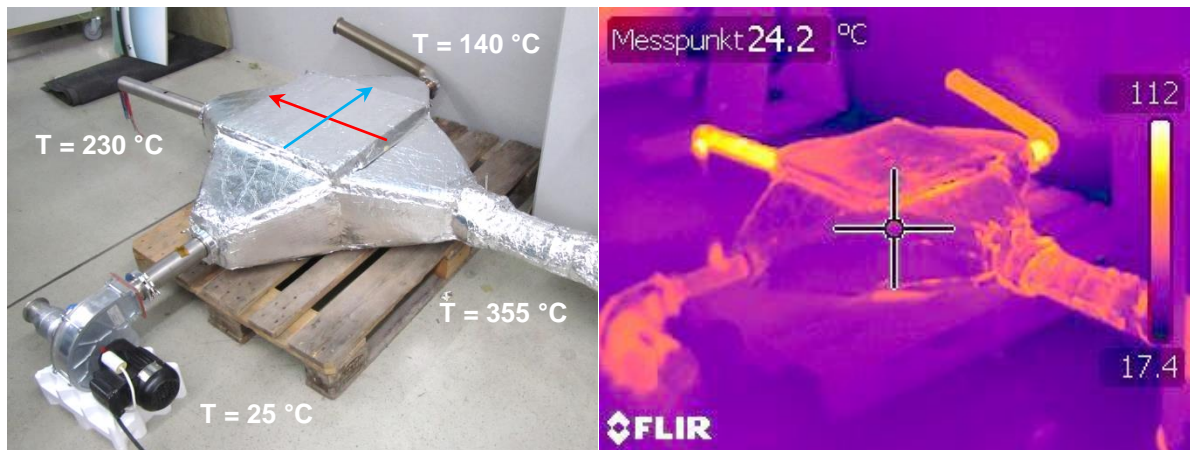


Abbildung 2.25: Versuchsaufbau zum Testen des Wärmetauschers und die gemessenen Ein- bzw. Auslauftemperaturen

Die Abbildung 2.25 (links) zeigt den Versuchsaufbau und den isolierten Kreuzwärmetauscher. Als Rohgas wurde hier die Umgebungsluft bei ca. 25 °C verwendet. Das Reingas nach der Pyrolyse wurde mit einem Heißluftgebläse simuliert. Die Luft konnte mit dem Heißluftgebläse auf maximal 355 °C aufgeheizt werden. Der Volumenstrom wurde an beiden Austrittskanälen auf ca. 45 m³/h eingestellt. Zu berücksichtigen ist, dass diese Bedingungen den realen Betriebsbedingungen einer Konvektionslötanlage und den Berechnungen zur Dimensionierung des Wärmetauschers nicht entsprechen.

Die gewonnen Messergebnisse wurden dazu genutzt, um die getroffenen Annahmen zu überprüfen und damit eine belastbare Prognose für die realen Prozessparameter zu treffen. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen zeigen, dass bei einem Volumenstrom von 45 m³/h der Pfad mit warmer Luft (Reingas) um 125 °C abgekühlt und die Umgebungsluft (Rohgas) auf 140 °C aufgeheizt wird. Zusätzlich wurden im Laufe der Untersuchungen die Konstruktion und die Isolierung auf Vorliegen von Wärmebrücken geprüft (Abbildung 2.25 rechts). Die Messergebnisse wurden mit [14] nachmodelliert. Diese stimmten mit den Versuchswerten sehr gut überein.

2.2 Entwicklung des Gesamtenergiekonzepts

Nach der Entwicklung einzelner Komponenten wurde mit der Integration dieser Komponenten in das Anlagenkonzept begonnen. Die Zielsetzungen waren wie folgt: Installation der Vakuumkammer in der Prozesszone, energieeffiziente Einbindung des thermischen Reaktors und des Wärmetauschers in den Reinigungskreislauf.

Die entwickelte Vakuumkammer (inklusive des Vakuumpfads und der Hubeinheiten) ist in einer Vakuumkonvektionslötanlage die komplizierteste mechanische Komponente. Die Vakuumkammer besitzt viele Durchführungen für den Transportantrieb, die Sensoren, die Heizung und die Vakuumtechnik, welche eine gute Isolation der Kammer erschweren. Daher war der erste Entwurf der Kammerumgebung ohne eine starke Isolierung ausgeführt. Die anschließenden Messungen ergaben durch insbesondere hohe Temperatur am Kammerboden einen Energieverlust bis zu 0,5 kW. Die Ergebnisse dieser Messung sind in der Abbildung 2.26 dargestellt. Mit Hilfe einer 40 mm starken Isolierung der Unterseite wurde der Energieverlust um 0,3 kW reduziert.

Der thermische Reaktor verbraucht im Betrieb bis zu 3kW zusätzlicher Energie, wobei diese zum Teil dem Prozess wieder zugeführt wird. Das Prozessgas muss vor seiner Rückspeisung seine überschüssige Wärme im Wärmetauscher an das zu reinigende Gas abgeben, da es nur bei optimal niedriger Temperatur wieder zurückgespeist werden kann. Die Abbildung 2.27 zeigt das dafür ausgearbeitete Konzept für die gesamte Anlage.

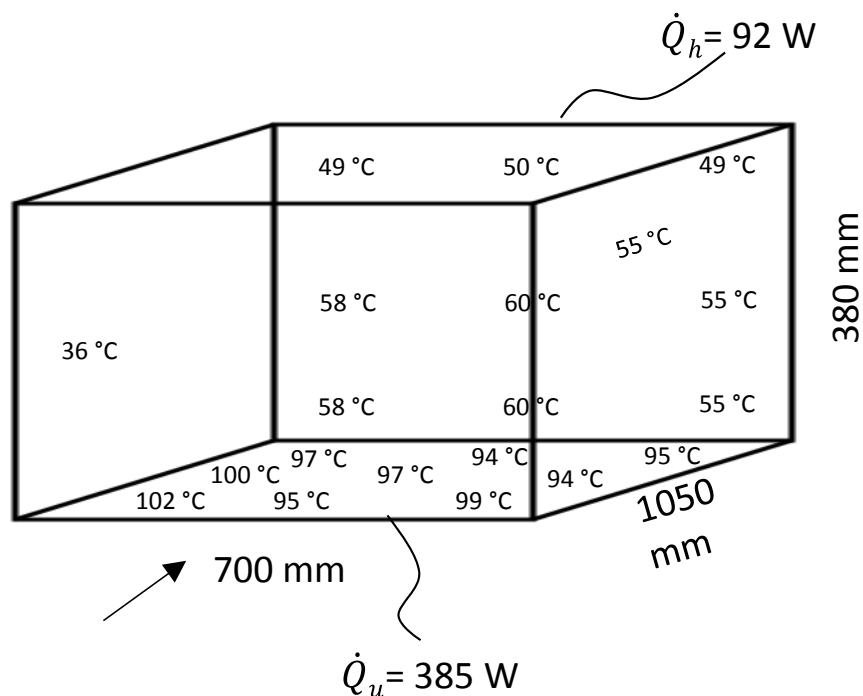


Abbildung 2.26: Temperaturverteilung des Kammergehäuses ohne Isolierung

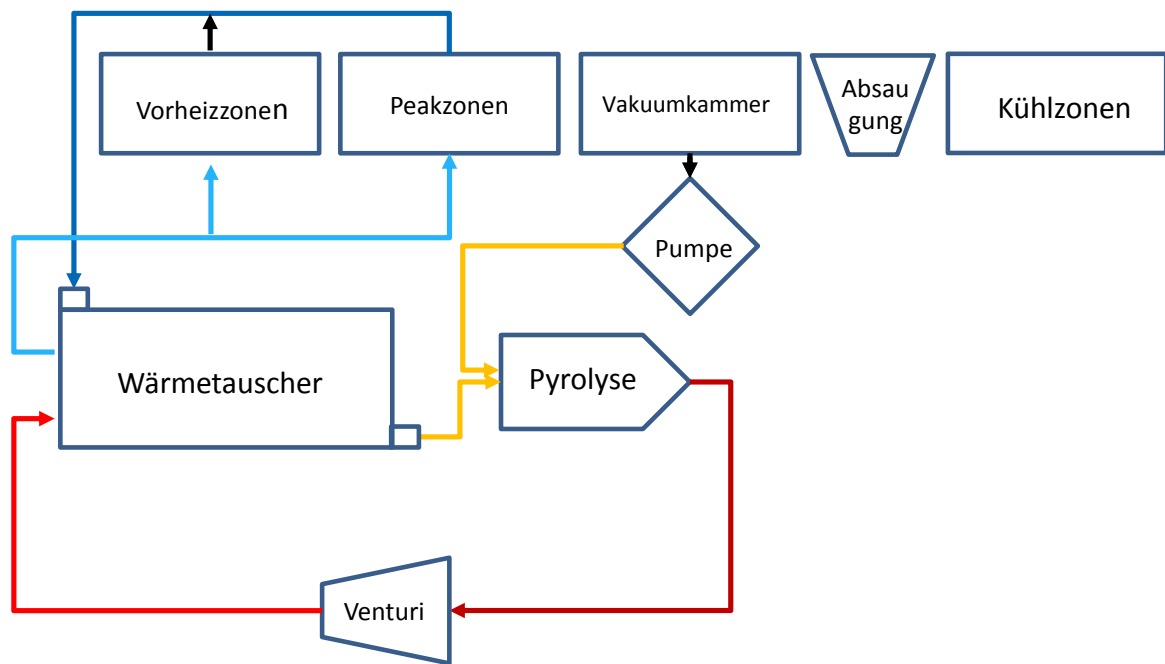


Abbildung 2.27: Gesamtkonzept zur Integration einzelner Komponenten

Bei der Verbindung aller Komponenten zu einer vollständigen Anlage müssen auch die gegebenen konstruktiven Bauräume berücksichtigt werden. Nach der Auslegung und Überprüfung des Wärmetauschers im Abschnitt 2.1.5 wurden seine Anschlussmöglichkeiten an die Anlage geprüft. Ein Wärmetauscher inklusive der Rohrleitungen verursacht einen zusätzlichen Druckverlust. Dieser muss messtechnisch bestimmt und bei der Anlagenkonzeption berücksichtigt werden. Der Versuchsaufbau dafür ist in Abbildung 2.28 zu sehen. Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass das Gesamtsystem mit zu 100 m³/h nur bei einer geringen Erhöhung des Treibgasvolumenstroms der Pyrolyse betrieben werden kann.



Abbildung 2.28: Versuchsaufbau für Voruntersuchungen zur Integration des Wärmetauschers in das Gesamtanlagenkonzept

Wie bereits im Abschnitt 2.1.5 erwähnt wurde, ist der ursprünglich geplante Wärmetauscher für die aus der Vakuumkammer angesaugte Atmosphäre aufgrund des zu geringen Volumenstroms wenig effizient. Daher kann die Vakuumpumpe direkt an den thermischen Reaktor angeschlossen werden, um die mit Residues beladenen Prozessgase zu reinigen und dem Prozess wieder zuzuführen (siehe Abbildung 2.27).

2.3 Aufbau und Charakterisierung der Versuchsanlage

Nach dem Aufbau der Versuchsanlage wurden zuerst die Transportmechanik und die Funktionalität der Vakuumkammer im kompletten System getestet. Nachdem die Funktionalität mechanischer Komponenten sichergestellt wurde, wurden FID-Messungen zur Ermittlung der Verteilung der Residues im Ofen und zur Untersuchung deren Erfassbarkeit durch das neue System, durchgeführt. FID (Flammenionisationsdetektor) ist ein weitverbreitetes Messverfahren zur Detektion von flüchtigen Kohlenwasserstoffverbindungen. Dabei wird das zu analysierende Gas mit einem Trägergas über eine Flamme geleitet und ionisiert. Beim Vorliegen von Kohlenstoffen im zu untersuchenden Gas werden bei der Ionisierung Elektronen freigesetzt und es wird ein Strom im pico-Ampere-Bereich gemessen. FID misst direkt die Anzahl an oxidierbaren Kohlenstoffatomen, im Idealfall linear proportional zum Kohlenstoffgehalt [15].

2.1.6. Versuchsaufbau und Messmethodik

Zur Erfassung der Ausgasungen beim Löten musste der Betriebszustand einer Anlage simuliert werden. Dafür wurde auf die Leiterplatten ein Lotpastengemisch aufgebracht. Das Gemisch bestand aus vier Lotpastentypen, um möglichst eine breitere Palette repräsentativer Inhaltsstoffe zu berücksichtigen. In Abbildung 2.29 ist die Zusammensetzung des Gemisches und die damit bedruckte Leiterplatte dargestellt. Die Lotpastenmenge auf jeder Leiterplatte betrug ca. 1,7 Gramm. Um Austrocknungseffekte zu vermeiden, wurden die Testsubstrate direkt vor dem Versuchsbeginn bedruckt.

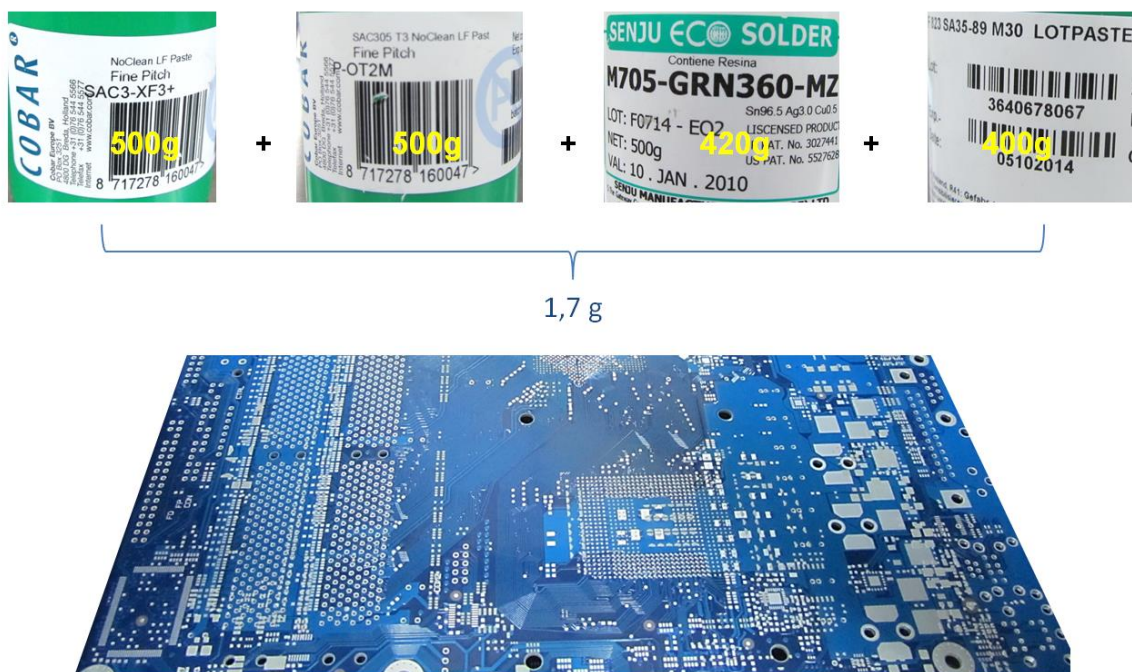


Abbildung 2.29: Zusammensetzung des Lotpastengemisches und die damit bedruckte Leiterplatte

Zur Messung der Kohlenstoffverbindungen wurden insgesamt 6 Entnahmestellen vorbereitet:

- Vorheizzone 1
- Vorheizzone 6

- Peakzone 2
- Abluft Vakuumkammer

- Kühlzone 1
- Kühlzone 3

Die Prozessgase aus dem Vorheiz- und Kühlbereich wurden mit Hilfe von Kupferrohren aus den jeweiligen Prozesszonen angesaugt. Die Abbildung 2.31 zeigt den Messaufbau mit den Messslanzen im Inneren des Ofens. Das Erfassen des aus der Vakuumkammer abgesaugten Prozessgasses ist mit einem ähnlichen Ansatz nicht möglich. Daher wurde auf der Ausblasseite der Pumpe ein Ballon zum Auffangen der Gase installiert. Diese Messmethodik hat leider den Nachteil, dass die Prozessgase durch den ganzen Vakuumpfad inklusive Pumpe durchgeleitet wurden. Dadurch kann es zu einer zusätzlichen Kontamination des Gases mit z.B. Öldämpfen oder zur frühzeitigen Kondensatbildung flüchtiger Bestandteile kommen. Andererseits werden die evakuierten Gase direkt nach der Pumpe zum thermischen Reaktor geleitet, so dass diese Messung die Beladung der Gase mit Schadstoffen direkt vor deren Cracken widerspiegelt.



Abbildung 2.30: Positionierung der Messslanzen zum Transfer der Atmosphäre aus den jeweiligen Zonen zum FID-Messgerät

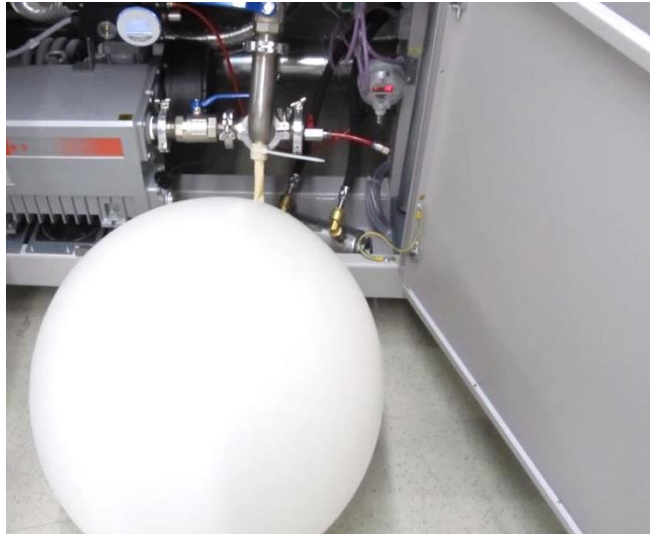


Abbildung 2.31: Ballon zum Auffangen der abgepumpten Prozessatmosphäre aus der Vakuumkammer

Die Abbildung 2.31 zeigt den an die Vakuumpumpe angeschlossenen Ballon während des Abpumpens der Vakuumkammer. Nachdem die Prozessgase im Ballon aufgefangen wurden, wurden diese mit dem FID-Messgerät angesaugt und der FID-Wert aufgezeichnet. Für die Charakterisierung der Anlage wurde ein Temperatur- und Vakuumprofil erstellt. Die Einstellungen der einzelnen Zonentemperaturen sind in Abbildung 2.32 dargestellt. Die Tabelle 4 enthält eine kurze Übersicht der Reflowlöt-Profilparameter. Die Vakuumanlage wurde zuerst auf einen stabilen thermischen Zustand aufgeheizt und anschließend mit Baugruppen bis zur Sättigung beladen. Die Messung an jeder einzelnen Messstelle dauerte ca. 10 Minuten, damit sich der Wert nach dem Wechseln der Messlanze stabilisieren konnte.

Die Messung des Energieverbrauches wurde mit einer externen Strommessstange durchgeführt. Die Software moderner Lötanlagen loggt zwar gemäß dem Trend der Industrie 4.0 alle Prozessdaten mit; die Anwendung eines kalibrierten externen Messgerätes trägt aber deutlich zur Genauigkeit der Messergebnisse bei.

Tabelle 4: Prozessparameter

Taktzeit	55 Sekunden
Anzahl BG pro Stunde	60
Lotmenge pro BG	1,7g
Restsauerstoffgehalt geregelt	1000 ppm
Stickstoffvolumenstrom Pyrolyse	3 m ³ /h
Temperatur Pyrolyse	485 °C
Stickstoffvolumenstrom gesamt (gemittelt 4 Stück)	21,5 m ³ /h
Vakuumprozess	10 mbar, 10 Sek

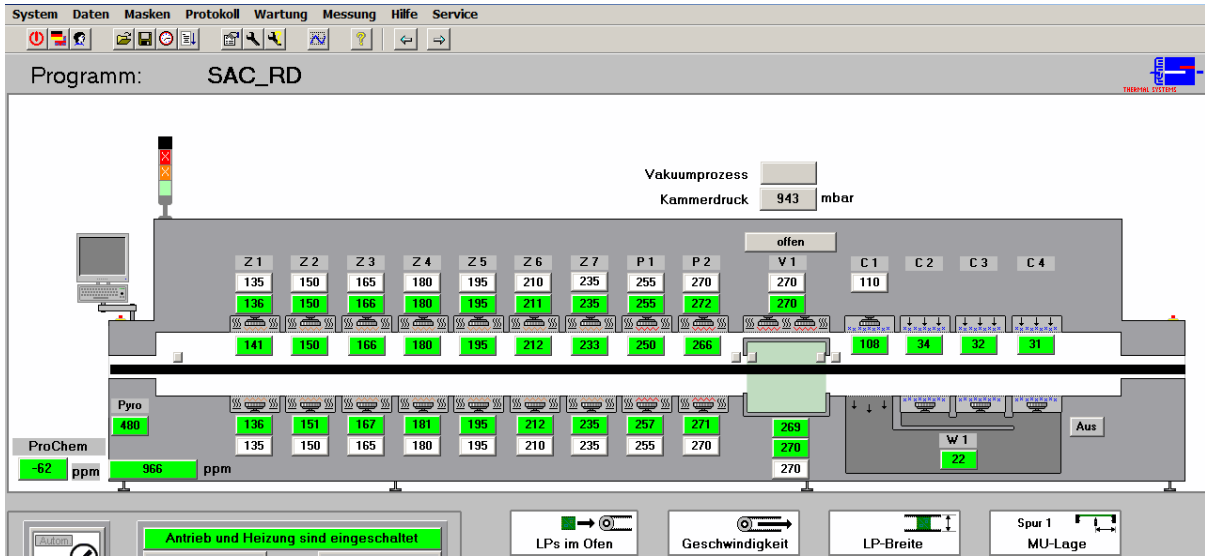


Abbildung 2.32: Temperatureinstellungen einzelner Heizzonen

Die Abbildung 2.33 zeigt den Messaufbau zum Ermitteln des Energieverbrauchs inklusive angeschlossener Strommesszange.



Abbildung 2.33: Versuchsaufbau zum Erfassen des Energieverbrauchs an der Vakuumkonvektionslötanlage

2.1.7. Residue-Management

Nach ca. 1 Stunde Beladung des Ofens mit bedruckten Leiterplatten wurde der Bereich der Sättigung für Kohlenwasserstoffverbindungen erreicht. Die Abbildung 2.34 zeigt den zeitlichen Verlauf der Messwerte über die Ofenlänge. Die Messwerte schwanken zwischen 15 und 50 ppm und sind von dem Messorten abhängig. Auf dem Diagramm ist deutlich eine kontinuierliche Schwankung der Messwerte um ca. $\pm 1,7$ ppm zu sehen. Die Ursache dafür liegt in den individuell ausgasenden Baugruppen, die in einem 60 Sekunden Takt an der Messstelle vorbei fahren.

Die Auswertung der Kohlenstoffkonzentration einzelner Messstellen ist in Abbildung 2.35 dargestellt. Bei der Auswertung wurden die Messwerte über eine Messdauer von 10 Sekunden gemittelt. Die höchste Konzentration der Kohlenstoffverbindungen wurde in der Vorheizzone 2 gemessen. Hier beträgt die Prozesstemperatur ca. 150 °C (siehe Abbildung 2.32); bei dieser Temperatur werden die in der Lotpaste enthaltenen Aktivatoren aktiv. In der Vorheizzone 6 und der Peakzone liegt die Kohlenstoffkonzentration bei 32 ppm, obwohl die Temperaturen sich um ca. 44 K unterscheiden. Am niedrigsten sind die Prozessgase in der Kühlstrecke der Anlage mit den Residues belastet. In der Kühlstrecke wird das Prozessgas nicht nur abgekühlt sondern auch gereinigt. Die Reinigung erfolgt durch das Auskondensieren und Filtern von Feinstaerosolen bei Temperaturen < 60 °C. Dieses Reinigungsprinzip ist jedoch für den heißen Bereich weniger effizient, da zum Abkühlen und anschließendem Aufheizen zusätzliche Energie notwendig ist.

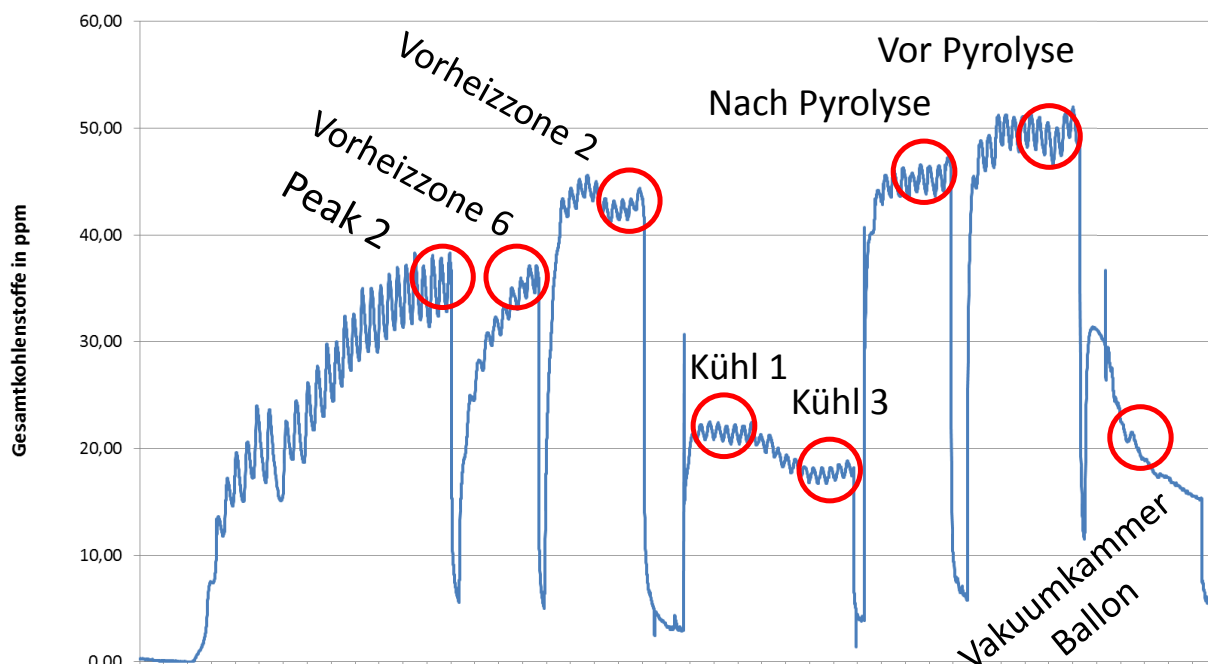


Abbildung 2.34: Zeitlicher Verlauf der Kohlenstoffkonzentration an verschiedenen Messstellen über die Anlagenlänge verteilt

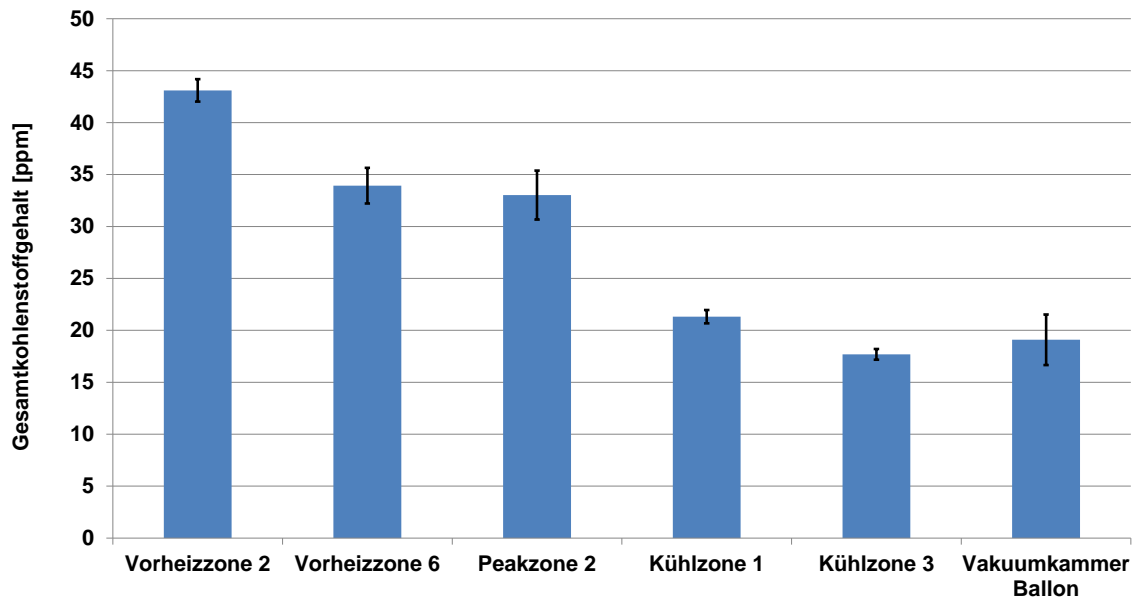


Abbildung 2.35: Verteilung der Kohlenstoffkonzentration in den einzelnen Zonen der Vakuunkonvektionslötanlage

Entgegen der Erwartungen zeigten die Messungen, dass die aus der Vakuunkammer evakuierte Atmosphäre nur im Schnitt mit ca. 20 ppm Gesamt-C belastet ist. Dieser Wert ist jedoch aufgrund der Messung nach der Vakuumpumpe und möglicher Kondensation der Residues im Ballon kritisch zu hinterfragen. Auch der Verlauf der Messwerte in Abbildung 2.34 weist einen deutlichen Abfall der Kohlenstoffkonzentration während der Messung der aus der Vakuunkammer aufgefangenen Atmosphäre auf.

2.1.8. Energieverbrauch

Nachdem das neu entwickelte System zum Erfassen und Abscheiden von Kohlenwasserstoffverbindungen auf seine Funktionalität geprüft wurde, fanden anschließend die Messungen des Energieverbrauchs statt. Um eine gute Vergleichbarkeit mit den bereits bestehenden Systemen zu gewährleisten, wurden zwei Betriebszustände gemessen: mit und ohne den Vakuumprozess. Die Abbildung 2.36 zeigt die Messergebnisse inklusive der Aufheizphase.

Der Energieverbrauch einer herkömmlichen Anlage liegt bei 16,5 kW. Die über die Messzeit gemittelten Ergebnisse zeigen, dass der Energieverbrauch der Vakuunkonvektionslötanlage bei $15 \pm 0,5$ kW mit Vakuum- und 13,4 kW ohne Vakuumprozess liegt. Der Mehrverbrauch mit Vakuumoption entsteht überwiegend durch die kontinuierlich laufende Vakuumpumpe. Daher beträgt die erzielte Energieersparnis 9 % mit Vakuum- und 18,8 % ohne Vakuumoption.

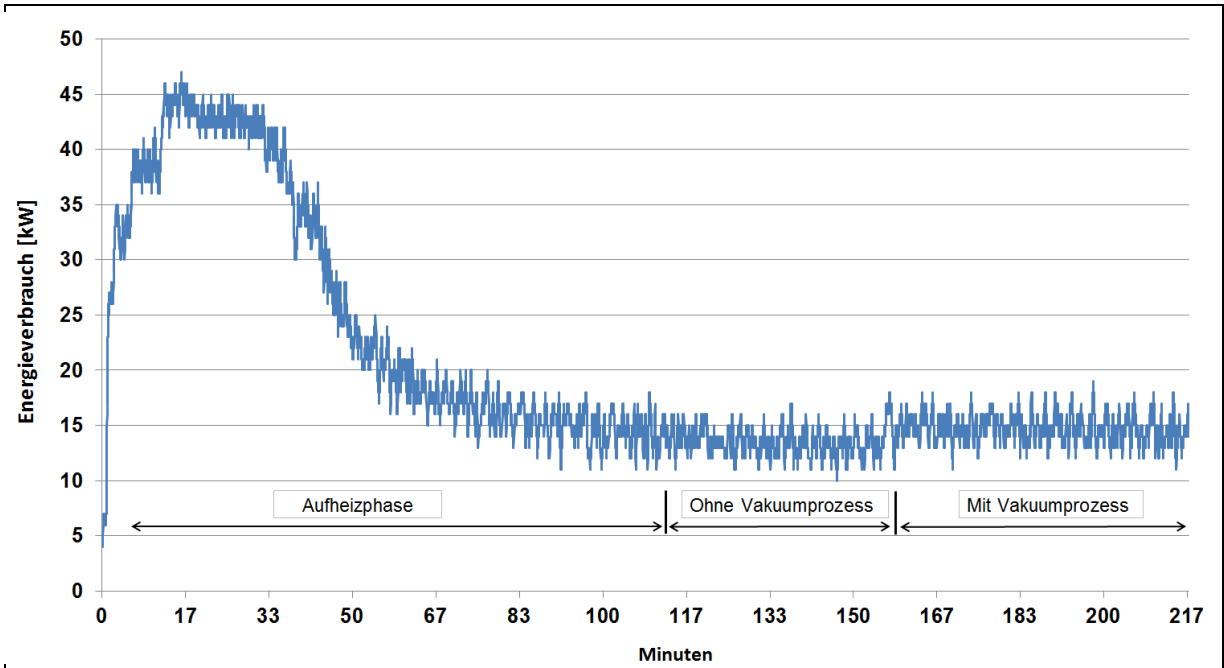


Abbildung 2.36: Energieverbrauch der Anlage mit und ohne Vakuumprozess

- Diese Seite wurde für die gebundene Version absichtlich leer gelassen -

3. Fazit und Ausblick

Ziel dieses Vorhabens war die Entwicklung einer energieeffizienten Konvektionslötanlage mit neuartiger und erstmaliger Kombination einer Vakuumkammer und eines thermischen Reaktors. Die im Vorhaben gesetzten Ziele wurden erreicht. Am Anfang der Untersuchungen wurden mit Hilfe der FEM-Methode und analytisch/empirischen Hilfsmitteln die einzelnen Komponenten der Vakuumanlage ausgelegt. Nach dem Aufbau der Anlage und mehreren Optimierungsschleifen wurden beim neuen System die Funktionalität des Reinigungssystems und der Energieverbrauch gemessen.

Die entwickelte Konvektionslötanlage mit Vakuum weist unter Berücksichtigung des Energiebedarfs der Vakuumpumpe eine Energieeinsparung von 18,8 % im Vergleich zu heutigen Konvektionslötanlagen auf. Der ursprüngliche Ansatz der Verwendung eines Wärmetauschers zur Wärmerückgewinnung aus dem abgepumpten Prozessgas konnte durch Messungen nachgeprüft werden und in der finalen Lösung entsprechend modifiziert werden. Das Erreichen dieser Ziele hat zu einer spürbaren Steigerung der Kompetenz des Antragstellers im Bereich der Wärmerückgewinnung beigetragen. Dennoch fehlen hier noch zuverlässige Aussagen darüber, wie das neue System sich im Feld bei verschiedenen Prozessbedingungen verhält.

Durch den Einsatz des thermischen Reaktors, der die Rauchgase durch thermische Pyrolyse zersetzt, kann eine deutliche Minimierung der Kontamination der Vakuumkammer und des Prozessraumes erreicht werden. Mit der Simulation eines Fertigungsprozesses mit bedruckten Leiterplatten wurde erstmalig die Konzentration der Kohlenwasserstoffverbindungen in einzelnen Bereichen der Anlage ermittelt. Diese Erkenntnis erlaubt es, die Reinigungsmaßnahmen direkt dort wirken zu lassen, wo auch die meisten Residues entstehen. Es zeigte sich aber auch, dass ein weiterer Forschungsbedarf insbesondere zum zuverlässigen Erfassen der beim Löten entstehenden flüchtigen Bestandteile und feinen Partikeln besteht. Die modernen Messsysteme zur Partikelzählung sind in der Lage auch die feinsten Aerosole zu erfassen; leider nur bei Raumtemperatur und ohne kondensationsfähige Bestandteile im zu untersuchenden Gasvolumen.

Durch die Entwicklung und den Aufbau eines in drei Teile geteilten Mehrspursystems nach dem Durchlaufprinzip wurde das Reflowlötssystem für größere Durchsätze ausgerüstet, wodurch eine merkliche Steigerung der Anlageneffizienz pro Baugruppe erreicht worden ist. Zu bemerken ist, dass der ursprüngliche Ansatz einen schmierfreien Transport in der Vakuumkammer zu realisieren, aus Kostengründen und fertigungsspezifischer Vorschriften (mögliche Kontamination der Baugruppen mit Abriebpartikeln) nicht vollständig umgesetzt werden konnte.

Die als positiv zu bewertenden Projektergebnisse und technischen Erkenntnisse haben eine große Bedeutung für den Antragsteller und seine weiteren Entwicklungen. Das grundlegende Verständnis für die Möglichkeiten der Energieeinsparung und für Residue-Managements wird bei der Entwicklung nicht nur von Lötanlagen, sondern anderer thermischen Systeme wie Trockner, Öfen für Solarindustrie usw. miteinfließen. So werden künftige Systeme den strengeren Vorgaben für die Energieeffizienz und der Entlastung der Umwelt noch besser gerecht.

In weiteren Entwicklungsschritten sollten deshalb neben den bereits durchgeführten Arbeiten weitere Möglichkeiten zur Wirkungsgradsteigerung von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen oder auch der Einsatz neuartiger Technologien ausgelotet werden. Durch die Entwicklung eines für die Lötanlagen tauglichen Messsystems zur zuverlässigen Erfassung von Residuen soll das Verständnis und damit auch die umweltfreundliche Beseitigung dieser Stoffe beim Löten verbessert werden. Darüber hinaus sollten die Einsatztauglichkeit geänderter Anlagentechnik und deren Erfüllen sämtlicher Vorschriften der Elektronikfertigung geprüft werden, um energieeffiziente und prozesstechnisch sichere Systeme anbieten zu können.

4. Literaturverzeichnis

- [1] S. Längen, Untersuchungen zur Realisierung einer optimalen Lötqualität beim Vakuumkondensationslöten, TU Dresden: Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik, 2015.
- [2] M. H. Poech, „Voiding- Ursachen und Wirkung,“ EE-Kolleg, Mallorca, 2009.
- [3] Wutz, Handbuch Vakuumtechnik, Theorie und Praxis, Wiesbaden: Vieweg, 2004.
- [4] W. Umrath, Grundlagen der Vakuumtechnik, Köln, 1997.
- [5] R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Kilgus und V. Menges, Tabellenbuch Metall, Europa Lehrmittel Verlag, 2014.
- [6] C. Morgenstern, Kerbgrundkonzepte für die schwingfeste Auslegung von Aluminiumschweißverbindungen, TU Darmstadt: Fachbereich Maschinenbau, 2006.
- [7] A. Karius, „www.produktion.de,“ 22 April 2013. [Online]. Available: <http://www.produktion.de/technik/betriebstechnik/elektrische-antriebe-besser-als-pneumatische-aber-274.html>. [Zugriff am 09 Dezember 2015].
- [8] C. Pohl, J. Hesselbach und C. Becker, „Der Vergleich zeigt das Potenzial-Energieeinsparung durch den Einsatz elektromechanischer Antriebe,“ Der Konstrukteur, pp. 122-124, April 2013.
- [9] K. Erich, Einsatz von Wälzlagern bei extremen Betriebs- und Umgebungsbedingungen: Optimierung durch geeignete Konstruktion und Entwicklung von Wälzlagern, Schmierung und Abdichtung, expert verlag, 1998.
- [10] W. Adalbert, Organische Chemie: Eine Einführung für Lehramts- und Nebenfachstudenten, Berlin Heidelberg: Springer, 2014.
- [11] G. Tarsilla, Chemie für den Maschinenbau: Organische Chemie für Kraft- und Schmierstoffe, Polymerchemie für Polymerwerkstoffe, Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2008.
- [12] <http://www.schweizer-fn.de>, [Online].
- [13] www.wenger-engineering.de/software, [Online].
- [14] AB&CO Group , [Online]. Available
- [15] J. Feßmann und H. Orth, Angewandte Chemie und Umwelttechnik für Ingenieure: Handbuch für Studium und betriebliche Praxis, ecomed-Storck GmbH: Augsburg, 2002.