

Thema

Identifikation möglicher Schwachstellen und Optimierung der Prozesskette zur Reduzierung von Haftungsproblemen am Beispiel von Gasgeneratoren

Ersteller: Benedikt Christoph Risse

Semester: SoSe 2018

Prüferin: Fr. Prof. Dr. Osterchrist

Abgabedatum: 28. September 2018

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Aufgabenstellung	4
2.1 Identifikation der kritischen Prozessschritte	7
2.2 Grundlagen des Wissensmanagements	8
2.2.1 Das SECI-Modell	9
2.2.2 Schnittstellen des Wissenstransfers	10
3. Aufbau des Gasgenerators	13
3.1 EPDM Boot	13
3.2 Migrationssperre	14
3.3 Linerkappe	15
3.4 Primer	15
3.5 Treibstoff	16
4. Ablösungen im Gasgenerator	16
5. Darstellung des Fertigungsprozesses des Gasgenerators	19
6. Vorgabe und Umsetzung der Arbeitsabläufe	33
6.1 Beschreibung des Arbeitsablaufs und der Verantwortlichkeiten	33
6.2 Abweichungen vom vorgeschriebenen Fertigungsprozess	35
7. Identifikation möglicher Fehlerquellen im Fertigungsprozess	38
7.1 Diffusion von Xylol und Weichmachern	39
7.1.1 Diffusion von Xylol beim Vorprimern	40
7.1.2 Bildung von Diffusionsbrücken	41
7.2 Fehlerquellen bei der Reinigung der EPDM Boots	42
7.2.1 Verwendung von zu viel Aceton	43
7.2.2 Verwendung von zu wenig Aceton	44
7.2.3 Durchführung der Reinigung	44
7.3 Prozessänderung beim Vorprimern	46
8. Handlungsempfehlungen	48
8.1 Prozesstechnische Maßnahmen	48
8.1.1 Festlegung der Prozessfenster	49
8.1.2 Prozesse automatisieren	55
8.2 Organisatorische Maßnahmen	56
8.2.1 Informationsfluss erhöhen durch geringere Transferkosten	57
8.2.2 Klare Verantwortlichkeiten schaffen	59
8.2.3 Einhaltung und Pflege der Fertigungsprozesse	60
9. Kritische Betrachtung der Ergebnisse	61
10. Zusammenfassung	62

Literatur

Lebenslauf

Erklärung

1. Einleitung

Bei der XXXXXX-Rakete handelt es sich um eine Luft-Luft Rakete welche sich durch ihre hohe Geschwindigkeit (>4 Mach), Reichweite (100 km+) und präzise Zielerfassung auszeichnet. Genaue Daten über Leistung und Aufbau sind aus Geheimhaltungsgründen öffentlich nicht zugänglich. Die hohe Geschwindigkeit und Reichweite wird durch den Einsatz von Staustrahltriebwerken erreicht, welche konstruktionsbedingt ohne bewegliche Teile wie Verdichter aus kommen.

Die Wirkungsweise der Staustrahltriebwerke basiert auf dem Prinzip der isentropen Zustandsänderung von idealen Gasen. Demzufolge erfahren ideale Gase bei Kompression eine Temperaturerhöhung und bei Expansion eine Temperaturniedrigung. Bei einem Staustrahltriebwerk (Abb. 01) tritt Umgebungsluft mit Überschallgeschwindigkeit in den Lufteinlass des Triebwerkes ein. Über Verdichtungsstöße und einem Verdrängungskörper im Inneren des Triebwerkes wird die Luft komprimiert, bei gleichzeitiger Erwärmung der Luft in Strömungsrichtung. Wird an entsprechender Stelle im Triebwerk dem erhitzten Luftstrom ein Brennstoff zugeführt, entzündet sich dieser selbstständig. Die Verbrennung des Treibsatzes in der Brennkammer bewirkt eine Ausdehnung der Gase, welche durch die Düse beschleunigt werden und für den gewünschten Schub sorgen.

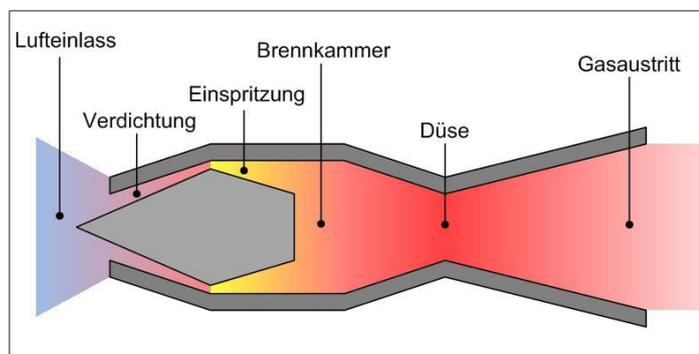


Abb.: 01 – Grundprinzip des Staustrahltriebwerks.

Dadurch dass das Staustrahltriebwerk den für die Verbrennung notwendigen Sauerstoff aus der Umgebungsluft bezieht, muss dieser nicht zusätzlich mitgeführt werden woraus sich deutliche Gewichtsvorteile ergeben. Nachteilig am Staustrahltriebwerk ist jedoch die erforderliche Mindestgeschwindigkeit welche notwendig ist um eine ausreichend hohe Verdichtung und Erwärmung der Umgebungsluft zu gewährleisten. Staustrahltriebwerke können daher nicht aus dem Stand betrieben werden und benötigen einen Booster für die Startphase.

Der Aufbau einer Rakete mit Staustrahltriebwerk lässt sich grob in die folgenden Einzelteile gliedern (Abb. 02): Suchsystem, Gefechtskopf, Gasgenerator, Staubrennkammer mit Lufteinlässen und Düse, sowie einem Booster.

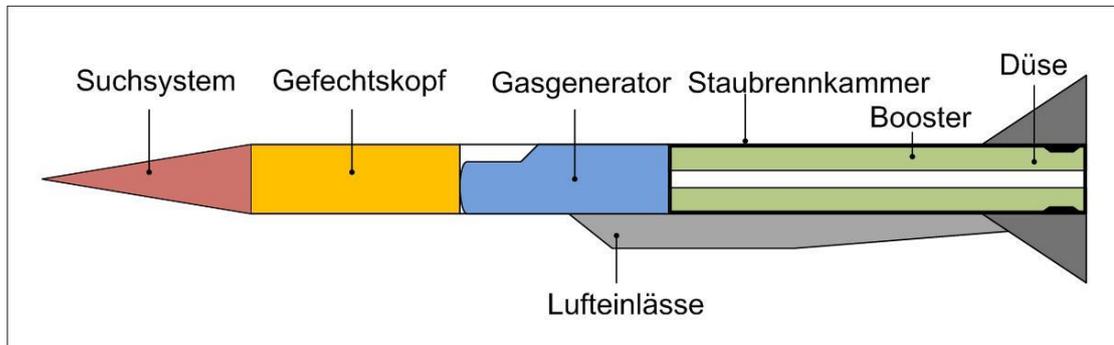


Abb.: 02 –Schematischer Aufbau einer Feststoffrakete mit Staustrahltriebwerk.

Bei dem Booster handelt es sich um einen pyrotechnischen Treibsatz, welcher dazu dient die Rakete nach dem Abschuss auf ihre erforderliche Geschwindigkeit zu beschleunigen. Der Booster ist als Zentralbrenner ausgelegt, um eine möglichst hohe Beschleunigung zu ermöglichen und brennt innerhalb weniger Sekunden vollständig ab. Nach Abbrand des Boosters und Erreichen der benötigten Geschwindigkeit wird der Gasgenerator gezündet und die Lufteinlässe der Rakete geöffnet.

Der Gasgenerator ist ein pyrotechnischer Treibsatz mit negativer Sauerstoffbilanz. Im Vergleich zum Booster brennt der Gasgenerator relativ langsam ab. Die partikelbeladenen Gasschwaden, die beim Abbrand entstehen, fungieren als gasförmiger Treibstoff für das Staustrahltriebwerk. Die vollständige Oxidation der Gase erfolgt erst innerhalb des Staustrahltriebwerks, wo sie sich mit der Luft aus den Lufteinlässen vermischen, entzünden und so den gewünschten Schub erzeugen. Ein Ventil, welches zwischen Booster und Gasgenerator verbaut ist, regelt den Gasstrom und damit den Schub des Staustrahltriebwerks. Der Gasgenerator wird in kartuschierter Form in der Rakete verbaut. Das bedeutet dass der Treibstoff in eine Elastomer-Hülse (Boot) gegossen wird und nach dem Aushärten ähnlich wie eine Patrone in das Gehäuse der Rakete eingebaut werden kann.

2. Aufgabenstellung

Das Problem welches in dieser Arbeit behandelt wird, befasst sich mit der mechanischen Bindung zwischen dem pyrotechnischen Treibstoff und dem Boot. Diese Problematik wurde bereits in der Fachliteratur in zahlreichen Publikationen behandelt und betrifft sowohl kartuschierte als auch

kammergebundene Treibsätze (Bhuvanewari, Sureshkumar, Kakade & Gupta, 2006, S. 310-314; Giants, 1991, S. 11-19; Kakade, Sureshkumar, Bhuvanewari & Gupta, 2007, S. 144-145).

Die stabile mechanische Verbindung zwischen Treibstoff und Gehäuse ist von essentieller Bedeutung wenn es um die Lebensdauer einer Rakete und deren sichere Einsatzfähigkeit geht. Der Schub und die Schubdauer einer Feststoffrakete hängen maßgeblich von der verfügbaren freien Oberfläche ab, an welcher der Abbrand stattfindet (Abb. 03). Treten im Laufe der Raketenlebensdauer Ablösungen oder Risse innerhalb des Treibsatzes auf, kann es beim Zünden des Treibsatzes zu einem unkontrollierten Druckanstieg und damit zum Versagen der Rakete kommen.

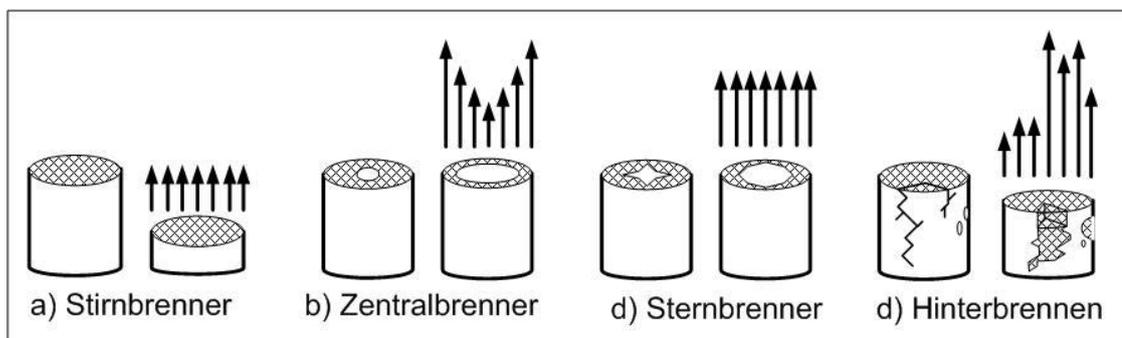


Abb.: 03 – Unterschiedliche Treibsatzgeometrien in Feststoffraketen.

Insbesondere zwei Bautypen werden aufgrund ihrer einfachen Bauweise häufig verwendet. Der Stirnbrenner wird beispielsweise in einfachen Raketen eingesetzt wie sie beim Feuerwerk verwendet werden. Der Treibstoff liegt vollflächig in der Raketenkammer vor. Nach der Zündung des Treibstoffs brennt dieser gleichmäßig von der Stirnfläche herab und liefert einen konstanten Schub über eine längere Schubdauer.

Der Zentralbrenner ist wie eine leere Röhre aufgebaut. Ein Hohlraum im Treibstoff wird durch einen Verdrängungskörper geschaffen der, nachdem sich der Treibstoff verfestigt hat, wieder entfernt wird. Nach dem Zünden des Zentralbrenners brennt der Treibstoff an seiner freien Oberfläche von innen nach außen ab. Da sich mit fortschreitendem Abbrand die zur Verfügung stehende Oberfläche permanent vergrößert, erhöht sich damit auch der Schub. Die Gesamtschubdauer ist jedoch kürzer als beim Stirnbrenner.

Eine Sonderform der Treibsätze stellen die Sternbrenner und andere Geometrien dar (Germani et al., 2005, S. 2). Beim Sternbrenner macht man sich die große Oberfläche des Zentralbrenners zu Nutze die gleich zu Beginn einen hohen Schub erzeugt. Um im Gegensatz zum Zentralbrenner jedoch einen konstanten Schub zu gewährleisten, befindet sich im Treibstoff ein

Sternprofil dessen brennende Oberfläche mit fortschreitendem Abbrand weitestgehend konstant bleibt.

Durch Risse im Treibstoff, größere Lufteinschlüsse oder Ablösungen von der Wandung besteht die Gefahr, dass zusätzliche Abbrandfläche freigelegt wird, was zu einem Hinterbrennen des Treibstoffes und folglich zu einem unkontrollierten Druckanstieg in der Brennkammer führen kann. Ein solcher Druckanstieg kann unter ungünstigen Bedingungen zum mechanischen Versagen der Brennkammer und schließlich zur Explosion führen. Um sicherzustellen, dass keine Risse oder Ablösungen im Treibstoff vorhanden sind, werden diese vor Auslieferung mittels Röntgen einer hundertprozentigen Qualitätskontrolle unterzogen.

Im Frühjahr 2017 wurden auf mehreren Röntgenbildern aus verschiedenen Gasgenerator Chargen Ablösungen des Treibstoffes von der Kammerwand beobachtet (Abb. 04). Die Ablösungen wurden sowohl nach der Lagerung bei Raumtemperatur als auch nach einem definierten Temperaturzyklus von mehreren Stunden entdeckt.

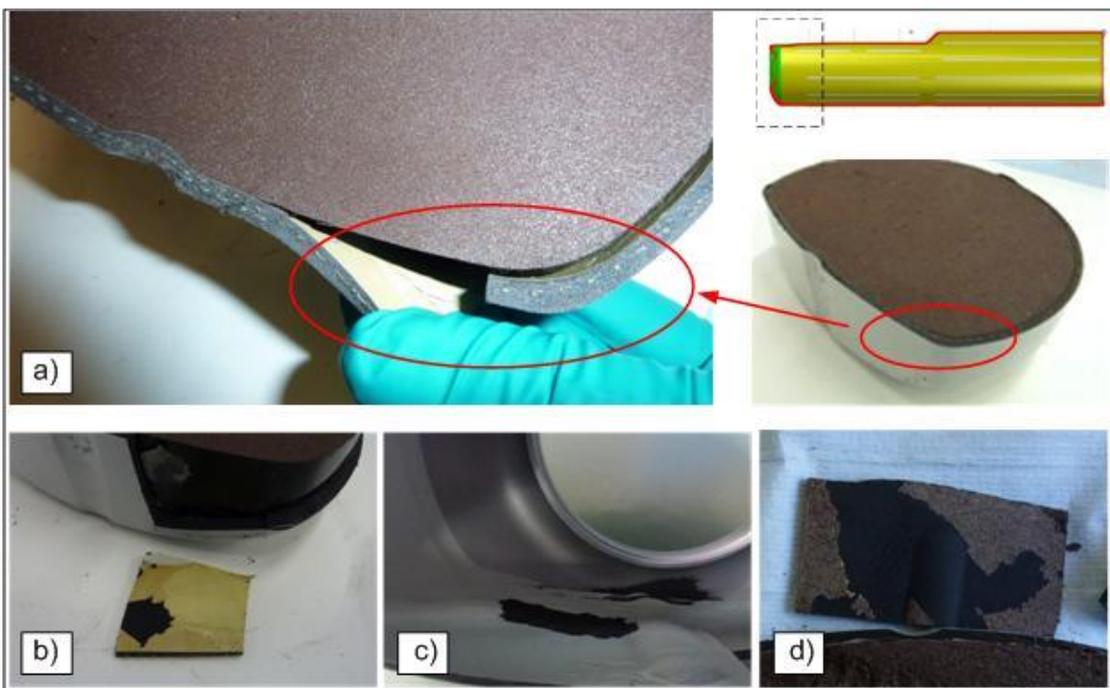


Abb.: 04 – a) Treibstoffablösungen im Kopfbereich des Gasgenerators, b) Fehlerbild: Ablösung zwischen Migrationssperre (gelb) und Primer (schwarz), c) Fehlerbild: Ablösung der Migrationssperre vom Boot, d) Sollzustand: Abrisskante innerhalb des Treibstoffes (braun).

Alle Ablösungen befanden sich im Kopfbereich des Gasgenerators zwischen den einzelnen Grenzschichten (siehe dazu Kap. 4). Die betroffenen Chargen wurden daraufhin für eine Auslieferung gesperrt und für die Fehlersuche herangezogen.

Die Fertigung des Gasgenerators umfasst mehrere Prozessschritte welche teilweise von externen Dienstleistern durchgeführt werden. Ziel dieser Arbeit ist es, durch eine Optimierung der Prozesskette und der Prozesssicherung die Treibstoffablösung im Gasgenerator zu eliminieren.

Die Bearbeitung dieses Themas erfolgt anhand zweier Ansätze. Zum einen sollen die kritischen Fertigungsschritte identifiziert werden welche eine zentrale Rolle bei den Ablösungen spielen können, zum anderen soll untersucht werden mit welchen organisatorischen Maßnahmen eine nachhaltige Prozesssicherung erreicht werden kann.

2.1 Identifikation der kritischen Prozessschritte

Wie bereits erwähnt, ist das Problem der Treibstoffablösung ein bei Feststoffraketen weit verbreitetes und in der Literatur oft diskutiertes Thema. Als Hauptursache für Ablösungen gilt im Allgemeinen die ungenügende Haftung zwischen den einzelnen Grenzschichten:

Treibstoff / Liner (Primer) / Isolierung (Boot)

Das in dieser Arbeit beschriebene System aus Treibstoff, Liner und Isolierung ist in ähnlicher Form schon seit vielen Jahren Teil der Forschung verschiedenster Forschungsgruppen (Fu & Zhao, 2015, S. 1936; Giants, 1991, S. 11-13; Gottlieb & Bar, 2003, S. 12-13; Kakade et al., 2007, S. 144-146; Li, Lu, Jiang, Ge, Wang & Wang, 2015, S. 675-676; Liao & Lee, 2015, S. 1452-1453; Zhou, Xu, Chen & Zhou, 2016, S. 404-405). Zahlreiche Publikationen auf diesem Gebiet zeugen von der Vielfalt vorhandener Fehlermechanismen welche von vorhandener Restfeuchte im Material, über Weichmacherdiffusion bis hin zu Alterung der Ausgangsmaterialien reichen. Dennoch hat sich dieses System seit mehreren Jahren bewährt und verzeiht manche Fehler (Giants, 1991, S. 19). Durch die spezielle Geometrie des Boots treten im Kopfbereich höhere Belastungen als im zylindrischen Teil auf, weshalb die Ablösungen meistens dort ihren Ursprung finden. Es wird angenommen, dass es im Zuge der Herstellung der Gasgeneratoren zu Abweichungen oder Prozessschwankungen kommt, welche die Ablösungen innerhalb der Grenzschichten hervorrufen.

Zur Identifikation der kritischsten Prozessschritte soll nun eine Abwandlung des ‚Lean Thinking‘ Konzepts eingesetzt werden, welches in der Arbeit von Tyagi, Choudhary, Cai und Yang beschrieben wird (2015, S. 202-207). Das von Tyagi et al. beschriebene Konzept ist eine Methode mit der sich die Produktentwicklung effizienter gestalten lassen soll, unter Beibehaltung von Performance und Qualität. Kern dieses Konzeptes ist es, dass im Rahmen eines Value Stream Mapping (VSM) jeder einzelne Prozess hinterfragt wird

und in wertschöpfend, nicht wertschöpfend aber notwendig und Verschwendung unterteilt wird. Das Ziel dieser Methode ist, die Identifikation der wertschöpfenden Kernprozesse aus einer Vielzahl von Prozessschritten um Fehlersuchen und Prozessoptimierungen zu vereinfachen.

Anstelle eines neuen Produktes steht hier jedoch ein Fertigungsprozess im Fokus der Untersuchung welcher so robust aufgebaut sein muss, dass zuverlässig und mit hoher Wiederholgenauigkeit eine mechanisch stabile Verbindung zwischen den einzelnen Grenzschichten entsteht. Zur Identifikation der relevanten Kernprozesse wird jeder einzelne Arbeitsschritt im Detail begutachtet. Anhand der in der Fachliteratur beschriebenen Fehlermechanismen lassen sich damit die kritischsten Prozessschritte identifizieren. Ein besonderes Augenmerk beim VSM ist dabei auf den Gemba-Walk, die Begehung des Ortes der Wertschöpfung, gerichtet. Der Gemba-Walk wird eingesetzt, um sich ein direktes Bild davon zu machen wie die Prozesse in der Realität umgesetzt werden (Ar & al-Ashraf, 2012, S. 1728-1730; Tyagi et al., 2015, S. 207). VSM und Gemba-Walk sind zudem effektive Methoden um Lean Techniken erstmals einzusetzen und um sie später auf Beständigkeit zu überprüfen (Dickson, Singh, Cheung, Wyatt & Nugent 2009, S. 178).

Die Bedeutung von VSM und Gemba-Walk wird besonders bei langlebigen Prozessen deutlich, die sich über Jahre entwickelten. Historisch entstandene Prozesse und Prozessänderungen, beispielsweise als Reaktion auf ein Fehlerbild, werden irgendwann nicht weiter in Frage gestellt (Pfeffer, 1995, S. 62). Im Falle von sehr komplexen Fertigungslinien können sich so über Jahre hinweg viele unnötige oder gar falsche Prozesse anreichern. Im Zusammenhang mit dieser Arbeit wird der Gemba-Walk angewendet, um etwaige Risiken durch Prozessschwankungen aufzudecken welche einen Einfluss auf die Haftung zwischen den einzelnen Grenzschichten haben können. Dazu gilt es den Aufbau des Gasgenerators aus physikalischer und chemischer Sicht Schritt für Schritt zu begleiten, um potentielle Schwachstellen zu identifizieren.

2.2 Grundlagen des Wissensmanagement

Die Art und Weise wie präzise und schnell innerhalb einer Fertigungslinie kommuniziert wird, entscheidet maßgeblich darüber wie schnell bei sich ändernden Umgebungsbedingungen und Prozessanomalitäten der Prozess angepasst und gegengesteuert werden kann (Su, Lindermann, Schroeder & Van de Ven, 2014, S. 442). Die Autoren Cabrera und Cabrera (2002, S. 688) bezeichnen das Wissen als einen immateriellen Vermögensgegenstand welcher einzigartig, wegabhängig und schwer zu imitieren oder zu ersetzen ist. Um diesen immateriellen Wert zu erhalten und weiter zu steigern, bedarf

es eines funktionierenden Wissensmanagements und Kenntnis über die unterschiedlichen Mechanismen, die ihm zugrunde liegen. Der Wissenstransfer zwischen Management und Produktion ist ein essentielles Element für den Aufbau einer stabilen Serienproduktion. Dort wo nicht automatisch Informationen über Abweichungen im Prozessablauf abgerufen werden können, ist man auf kontinuierliches Feedback der Produktionsmitarbeiter angewiesen. Zahlreiche Publikationen der vergangenen Jahre beschäftigten sich mit dem Thema des Wissensmanagements und untersuchten die Faktoren welche den Wissenstransfer beeinflussen. In diesem Zusammenhang wird vor allem der Austausch von impliziten und expliziten Wissen als Kernelement des Wissenstransfers bezeichnet.

Als **explizites Wissen** wird die Form von Wissen bezeichnet, welches sich eindeutig, beispielsweise durch Fakten, Regeln oder Lehrbücher vermitteln lässt. Dies geschieht in diesem Fall durch die Fertigungsprüfvorschriften, Fertigungsanweisungen und Arbeitsaufträge.

Das **implizite Wissen** bezeichnet eine Form von Wissen welches schwierig in Form von Regeln zu vermitteln ist. Implizites Wissen entwickeln die Mitarbeiter oft selbständig in Form von "learning-by-doing" und tauschen es miteinander aus, beispielsweise im Rahmen der Einarbeitung neuer Kollegen. Ein oft verwendetes Beispiel für implizites Wissen ist Fahrradfahren (Cabrera & Cabrera, 2002, S. 690). Fahrradfahren lässt sich mit ein wenig Übung schnell erlernen, hingegen es äußerst schwierig ist wenn man versucht es in Worten zu erklären.

2.2.1 Das SECI-Modell

Das Zusammenspiel aus impliziten und expliziten Wissen wird durch das SECI-Modell von Nonaka und Takeuchi (1995, zitiert nach Nonaka, Toyama & Konno, 2000, S. 12) sehr gut beschrieben. Nonaka und Takeuchi sehen die Wissensgenerierung als einen ständigen Kreislauf der Interaktion von impliziten und expliziten Wissen an. Dieser Kreislauf (Abb. 05) besteht aus den vier Stufen **Socialisation**, **Externalisation**, **Combination** und **Internalisation**.

Socialisation

Die Sozialisation stellt den Ursprung des Kreislaufes dar. Hier wird implizites Wissen gewonnen, mit anderen Individuen geteilt und gemeinsam neues implizites Wissen geschaffen.

Externalisation

Bei der Externalisierung wird das neu geschaffene implizite Wissen durch geeignete Modelle und Analogien in explizites Wissen umgewandelt. Die

Kernelemente des impliziten Wissens werden geprüft, extrahiert und bilden die Grundlage neuen, allgemeingültigen Wissens.

Combination

Bei der Kombination wird das gesammelte Wissen der Externalisierung mit weiterem expliziten Wissen aus internen und externen Quellen zu komplexerem, systematischem Wissen kombiniert und den Mitgliedern der Organisation bereitgestellt.

Internalisation

Bei der Internalisierung wird das neu erworbene, bzw. zur Verfügung gestellte, explizite Wissen aktiv angewendet und verinnerlicht. Somit wird das vorhandene implizite Wissen erweitert und steht für den nächsten Kreislauf des SECI-Modells zur Verfügung.

Im Idealfall entsteht dadurch ein Prozess bei dem kontinuierlich neues Wissen generiert und der Organisation zur Verfügung gestellt wird.

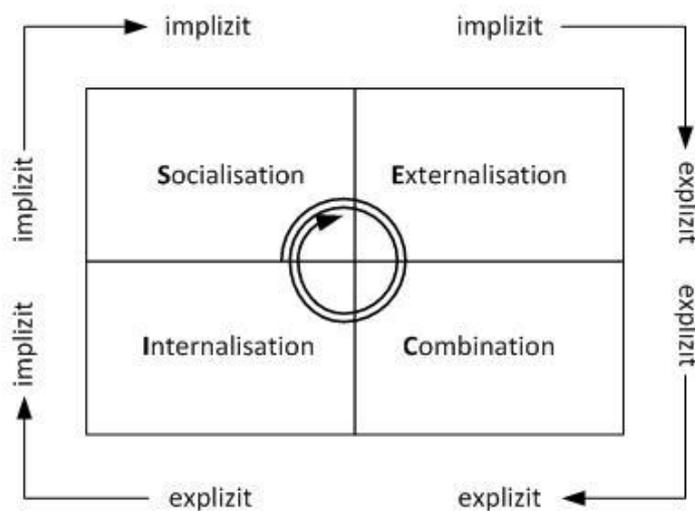


Abb.: 05 – Kreislauf des SECI – Modells.

2.2.2 Schnittstellen des Wissenstransfers

Obwohl das SECI-Modell den Umwandlungsprozess vom impliziten zum expliziten Wissen leicht verständlich darstellt, zeigen sich die Schwierigkeiten bei der Realisierung erst bei genauerer Betrachtung. Vor allem die Bereiche Externalisierung und Internalisierung werden als kritisch betrachtet, weil hier die Kommunikation zwischen den Arbeitern und Vorgesetzten stattfindet. Es ist offensichtlich, dass Blockaden innerhalb dieser Schnittstellen den gesamten SECI-Kreislauf zum Stocken bringen können, weshalb in dieser

Arbeit das Hauptaugenmerk beim Wissenstransfer auf die Schnittstellen und Mechanismen der internen Kommunikation gerichtet sind.

Bei der Betrachtung der Kommunikationswege muss klar berücksichtigt werden in welche Richtung die Kommunikation verläuft:

Externalisierung: Arbeiter → Vorgesetzten

Implizites Wissen (Erfahrung, learning-by-doing, Beobachtungen) wird mit dem Vorgesetzten / Verantwortlichen ausgetauscht und durch Regeln oder Modelle zu expliziten Wissen umgewandelt.

Internalisierung: Vorgesetzter → Arbeiter

Neues explizites Wissen wird in Form von geänderten Arbeitsvorschriften oder Kontrollen vorgegeben und wird von den Mitarbeitern durch dessen Anwendung verinnerlicht.

Einflussfaktoren

In zahlreichen Untersuchungen zum Wissenstransfer stellen die interne Kommunikation und Interaktion zwischen Arbeitern und Führungskraft, sowie untereinander, einen Schlüsselfaktor dar (Karanges, Johnston, Beatson & Lings, 2015, S. 130; Breevaart, Bakker & Demerouti, 2014, S. 32; Siemsen, Roth, Balasubramanian & Anand, 2009, S. 429-430; Cabrera & Cabrera, 2002, S. 690).

Die treibende Kraft der **Externalisierung** ist die Motivation des Arbeiters mit seinem Vorgesetzten Wissen auszutauschen. In der vorliegenden Literatur werden vor allem die Suche nach Anerkennung für sein Tun (Cabrera & Cabrera, 2003, S. 694-696), die Identifikation mit dem Unternehmen und den Unternehmenswerten (Sluss, Klimchak & Holmes, 2008, S. 458-462) und die Gestaltung des eigenen Arbeitsplatzes und der verfügbaren Ressourcen aufgeführt (Boudreau, Hopp, McClain & Thomas, 2003, S. 184-186; Breevaart et al., 2014, S. 33; Gill, 2003, S. 315).

Neben den unterschiedlichen Gründen, die für einen Wissensaustausch mit dem Vorgesetzten sprechen, gibt es ebenso zahlreiche Gründe und Mechanismen welche sich denen entgegensetzen, wie zum Beispiel: Furcht vor Verlust des geistigen Eigentums, Verlust einer privilegierten Position, Verlust von Überlegenheit, aber auch nicht genügend Wertschätzung für das erarbeitete Wissen und hohe Transferkosten dieses Wissen mitzuteilen (Szulanski, 1996, S. 30-31). Erschwerend kommt hinzu, dass negativ belastete Informationen wie Prozessanomalitäten seltener kommuniziert werden als positive (Milliken, Morrison & Hewlin, 2003, S.1454-1456). Aus Furcht davor als Störenfried angesehen zu werden oder dass das Überbringen der negativen Information für sie nachteilige Konsequenzen trägt, tendieren

Mitarbeiter dazu solche Informationen eher zu verschweigen oder Inhalte zu beschönigen (Milliken et al., 2003, S. 1455; Tourish & Robson, 2003, S.153). Faktoren, welche die Kommunikation schlechter Nachrichten in der Hierarchie von unten nach oben fördern, sind vor allem das Vorgesetzten – Mitarbeiter Verhältnis, als auch die Wahrnehmung wie zugänglich und empfänglich der Vorgesetzte für derlei Informationen ist (Glausser, 1984, S. 634; Saunders, Sheppard, Knight & Roth, 1992, S. 250-251).

Von den oben aufgeführten Faktoren wird in diesem Fall den **Transferkosten** die größte Hebelwirkung zugesprochen. Die Transferkosten stehen für die Arbeit die der Mitarbeiter aufwenden muss sein Wissen anderen mitzuteilen, um daraus persönlich einen bestimmten Nutzen zu erzielen (Cabrera & Cabrera, 2003, S. 695; Siemsen et al., 2009, S. 433; Glausser, 1984, S.614). Je höher die Transferkosten sind, umso geringer ist die Motivation dieses Wissen zu teilen. Hat der Mitarbeiter jedoch die Möglichkeit ohne großen Aufwand sein Wissen mit dem Vorgesetzten zu teilen, so wird er dies tun.

Die Motivation der **Internalisierung** ist offensichtlich. Durch neue gesicherte Erkenntnisse sollen beispielsweise die Qualität erhöht, der Durchsatz gesteigert oder Produktionskosten reduziert werden. Dieses explizite Wissen wird in Form von neuen Richtlinien, geänderten Arbeitsanweisungen oder Trainings den Mitarbeitern der Organisation zugänglich gemacht. Die Schwierigkeit besteht nun darin dass der Wissenstransfer oftmals auf Widerstand trifft. Szulanski (1996, S. 36) untersuchte die Mechanismen welche die Weitergabe von "best practice" Wissen innerhalb einer Firma blockieren. Gemäß seiner Untersuchungen sind die drei größten Barrieren:

- a) Mangelnde Fähigkeit neues und komplexes Wissen zu verarbeiten
- b) Kausale Mehrdeutigkeiten zwischen Ursache – Wirkung
- c) Beschwerlicher Wissensaustausch zwischen Sender und Empfänger

Die Fähigkeit des Empfängers oder der Organisation neues Wissen verarbeiten zu können hängt stark vom bereits existierenden Wissensstand ab (Dierickx & Cool, 1989, S. 1507-1508). Ein Kernelement bei der erfolgreichen Internalisierung ist somit die Vermittlung von ausreichend **Hintergrundwissen** (Boudreau et al., 2003, S. 180; Gill, 2003, S. 308). Dies ist essentiell damit das neue Wissen verinnerlicht und mit dem vorhandenen Wissen kombiniert wird. Genügend Hintergrundwissen ist auch deshalb notwendig, um während der Phase der Sozialisierung, bei der die Mitarbeiter sich untereinander austauschen, der Entstehung und Verbreitung von falschem Wissen vorzubeugen (Siemsen et al., 2009, S 443).

Der beschwerliche Wissensaustausch zwischen Sender und Empfänger lässt sich wieder auf das Problem der **Transferkosten** zurückführen. Je kürzer und

direkter der Austausch zwischen Sender und Empfänger ist, insbesondere im Hinblick auf Rückfragen, umso einfacher erfolgt der Wissenstransfer.

Im Folgenden werden die Methoden des Value-Stream-Mappings und des Wissenstransfers beim Aufbau und der Fertigung der Gasgeneratoren angewendet.

3 Aufbau des Gasgenerators

Wie in Kapitel 1 beschrieben, wird der Gasgenerator in kartuschierter Form in die Rakete eingebaut. Er besteht im Wesentlichen aus fünf Komponenten die alle aufeinander abgestimmt sind: (1) Boot aus EPDM mit Alukappe, (2) Migrationssperre (Lack), (3) Linerkappe, (4) Primer und (5) pyrotechnischer Treibstoff (Abb. 06).

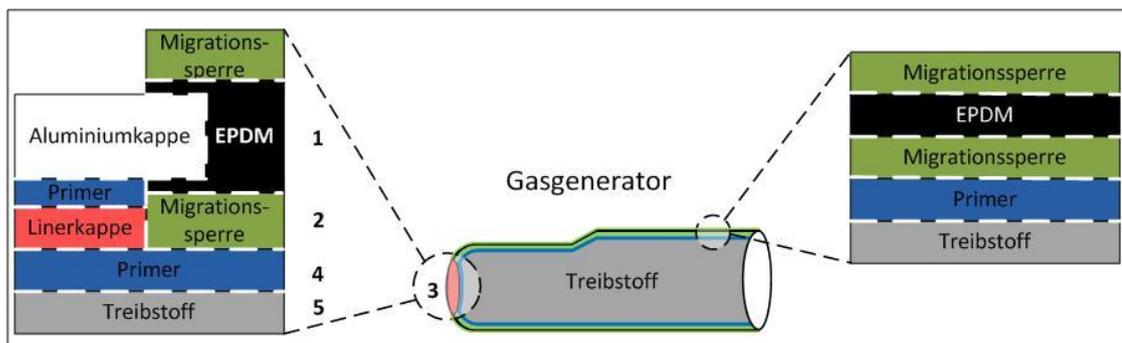


Abb.: 06 – Unterschiedlicher Aufbau des Gasgenerators im Kopf- und Schaftbereich.

3.1 EPDM Boot

Der Boot bildet das physische Gehäuse für den gegossenen Treibstoff. Ein bei der Fertigung von Feststoffraketen häufig verwendetes Material ist Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM). EPDM wird aufgrund seiner geringen spezifischen Masse, elektrisch und thermisch isolierenden Eigenschaften, elastischen Verhalten selbst bei tiefen Temperaturen und seiner ausgeprägten Alterungsbeständigkeit sehr häufig in Feststoffraketen als Isolierung zwischen Wandung und Treibsatz eingesetzt (Giants, 1991, S. 11-12; Kakade et al., 2007, S. 145).

Am rund zulaufendem Ende des Bootkopfes sitzt eine in EPDM eingeklebte Aluminiumkappe mit Gewinde (Abb. 07).

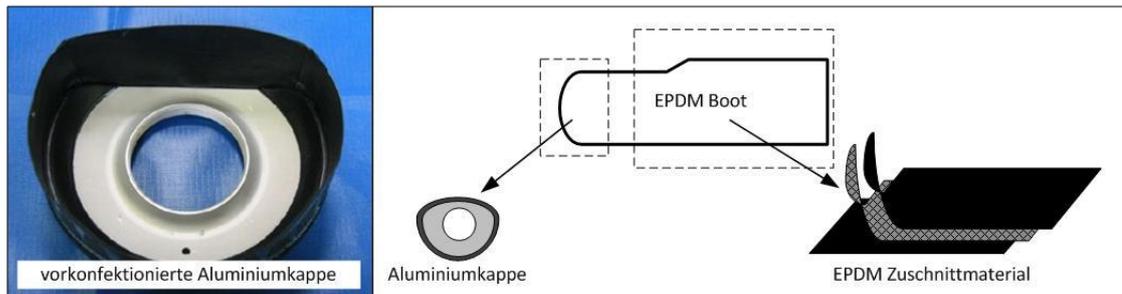


Abb.: 07 – Einzelteile und Aufbau des EPDM Boot.

Das Gewinde in der Aluminiumkappe dient zur mechanischen Befestigung des Gasgenerators in der Rakete. Während des Fertigungsprozesses dient die Aluminiumkappe auch als Zentrierung des EPDM Boot für einzelne Arbeitsschritte. Technisch bedingt ist es nicht möglich die Aluminiumkappe komplett in EPDM einzukleben. Aufgrund der Krümmung und der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten, besteht die Gefahr starker Ablösungen im Kopfbereich des Gasgenerators. Um unkontrollierbaren Ablösungen entgegenzuwirken, wird auf eine vollständige Füllung mit Treibstoff verzichtet und der Kopfbereich mit der Linerkappe aufgefüllt (Kap. 3.3.).

3.2 Migrationssperre

Die Migrationssperre besteht aus einem Decklack und wird beidseitig auf das EPDM aufgebracht um eine Diffusionsbarriere für Weichmacher und andere Stoffe zu bilden, die zwischen dem EPDM, Treibstoff und der Umwelt diffundieren können (Abb. 08).

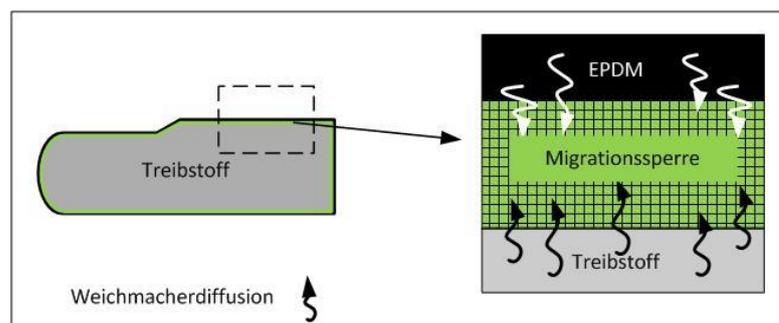


Abb.: 08 – Darstellung der Weichmacherdiffusion zwischen EPDM und dem Treibstoff.

Die Weichmacherdiffusion hat einen bedeutenden Einfluss auf die Lebensdauer der Rakete. Nach Gustavson, Greenlee & Ackley (1966, zitiert nach Zhou et al., 2016, S. 408) können über sehr lange Zeiträume die kurzkettigen und mobilen Weichmachermoleküle durch das Polymer, selbst über Grenzflächen hinweg, in Richtung weichmacherarme Bereiche diffundieren. Aufgrund der Weichmacherdiffusion zwischen EPDM und Treibstoff kann es passieren dass der Treibstoff im Randbereich

unterschiedlich stark versprödet und damit die Stabilität des Treibstoffes und die Festigkeit der Treibstoffanbindung beeinträchtigt wird (Gottlieb & Bar, 2003, S. 12).

3.3 Linerkappe

Die Linerkappe besteht aus einer mit Ruß angereicherten flüssigen Polymermischung namens IPB 669, eine Eigenentwicklung der Bayern-Chemie. Diese Polymermischung wird in die Aluminiumkappe gegossen und härtet dort bei Raumtemperatur aus. Die Linerkappe bildet eine Abdichtung zur Zentralschraube und verschließt den Gasgenerator nach vorne hin (Abb. 09).

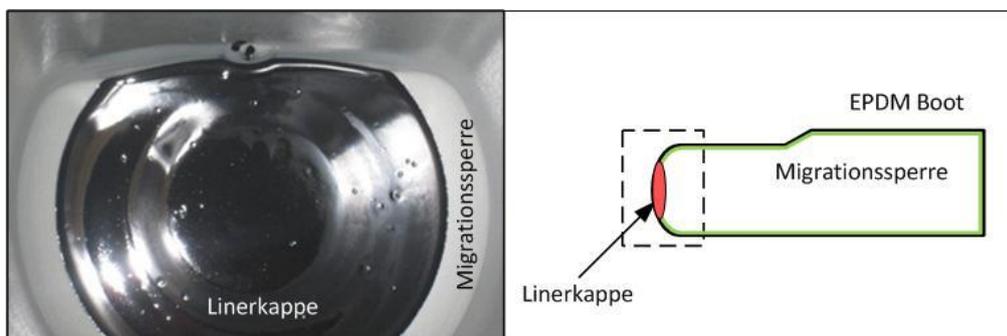


Abb.: 09 – Ausgehärtete Linerkappe (schwarz) und Migrationssperre (grau).

3.4 Primer

Als Primer wird ein Haftvermittler der Firma LORD verwendet, welcher eine gute Haftung verschiedener Polymere auf den meisten Metallen und deren Legierungen verspricht. Im Bereich der Raketentreibstoffe wird dieser Primer als Haftvermittler zwischen dem Treibstoff und der Migrationssperre eingesetzt (Choudhury, Ginic-Markovic, Dimopoulos & Matisons, 2004, S. 576) (Abb. 10).

Laut Sicherheits- und Produktdatenblatt besteht der Primer aus einer Mischung in Xylol dispergierter und gelöster Polymere. Des Weiteren sind auch noch größere Mengen Ethylbenzol, Ruß und C14-C17 Chlorparaffine enthalten.

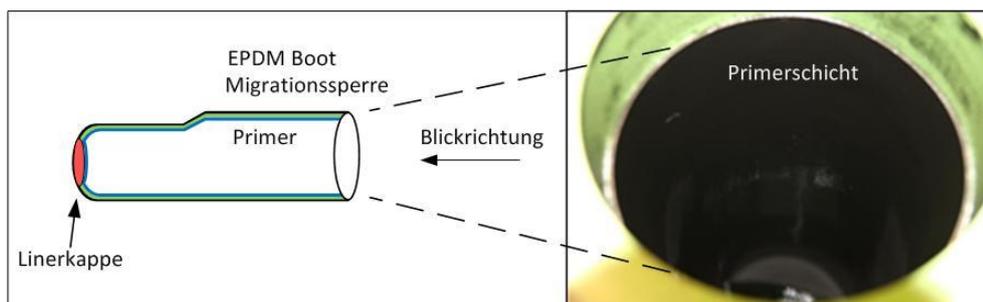


Abb.: 10 – Der Primer wird auf den lackierten Boot aufgesprüht.

3.5 Treibstoff

Bei dem Treibstoff handelt es sich um eine Mischung aus Ammoniumperchlorat, Magnesium und Bor, welche in einer Matrix auf Polyurethanbasis eingeschlossen sind. Charakteristisch für Polyurethane ist die polare Urethangruppe (Abb. 11) welche durch eine Polyadditionsreaktion von Diolen und Polyisocyanaten entsteht:

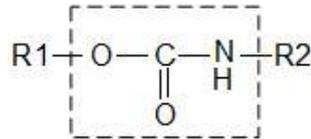


Abb.: 11 – Polyurethangruppe.

Aufgrund der schnellen Reaktion wird der erforderliche Härter erst kurz vor Mischende der Reaktionsmischung hinzugefügt. Der Treibstoff muss dann innerhalb einer festen Zeitspanne in die vorbereiteten EPDM Boots gegossen werden, in denen er dann anschließend bei erhöhter Temperatur aushärtet.

Eine Besonderheit bei der Herstellung von Polyurethanen stellt die Wechselwirkung mit Wasser dar. Die Anwesenheit von Wasser während der Polyaddition führt über Bildung eines instabilen Zwischenprodukts zur Bildung von gasförmigen CO₂. Je nach Gießbedingungen kann das gasförmige CO₂ entweichen, oder verbleibt im fertigen Polymer, daher muss der Prozess absolut wasserfrei ablaufen. Die Urethangruppe ist im Gegensatz zum EPDM sehr polar, weshalb der reine Treibstoff nur mäßig auf der unbehandelten EPDM Oberfläche haften würde.

4. Ablösungen im Gasgenerator

Betrachtet man den Aufbau des Gasgenerators im Detail ergeben sich zwei unterschiedliche Grenzschichtsysteme innerhalb derer Ablösungen zum Verwurf des Gasgenerators führen können (Abb. 12).

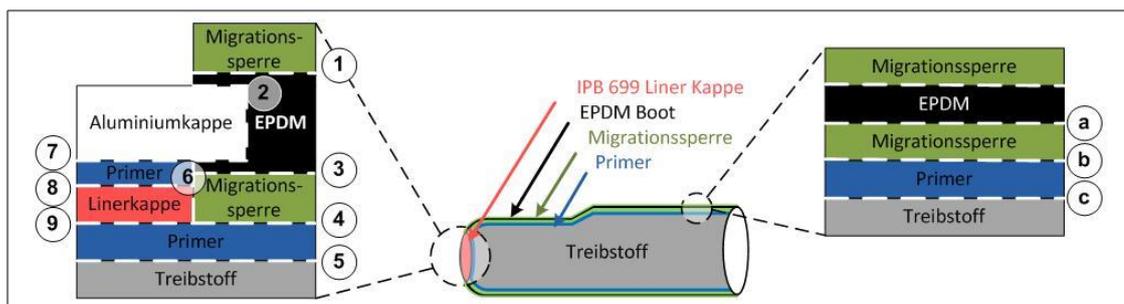


Abb.: 12 - Grenzschichten im Kopf- und Schaftbereich des Gasgenerators.

Schaftbereich - Grenzschichten

Der hintere Teil des Gasgenerators ist durchweg homogen aufgebaut und besteht aus insgesamt drei unterschiedlichen Grenzschichten. Die erste Grenzschicht (a) bildet der Übergang vom EPDM hin zur Migrationssperre. Dieses System findet sich zweimal am Boot wieder, sowohl auf der Innen- als auch Außenseite. Eine weitere Grenzschicht (b) bildet der Übergang zwischen Migrationssperre und dem Primer. Die letzte Grenzschicht (c) stellt der Übergang des Primers zum Treibstoff dar.

Ablösungen innerhalb einer dieser Grenzschichten können bereits zum Verwurf des Gasgenerators führen. Dieser Teil des Gasgenerators ist für die Reinigung und Lackierarbeiten leicht zugänglich und weist keine engen Radien oder Überlappungen auf, was das Fehlerrisiko deutlich reduziert.

Da die Ablösungen im Frühjahr 2017 nur im Kopfbereich des Gasgenerators auftraten, kann in dieser Arbeit davon ausgegangen werden, dass dieses Grenzschichtsystem:

Migrationssperre → EPDM → Migrationssperre → Primer → Treibstoff

weitestgehend stabil ist und kleinere Prozessschwankungen innerhalb der Produktionskette vernachlässigbar sind.

Kopfbereich - Grenzschichten

Am Kopf des Gasgenerators ergeben sich deutlich komplexere Grenzschichten und Geometrien als im Schaftbereich. Insgesamt befinden sich dort neun einzelne Grenzschichten innerhalb derer es zu ungewollten Ablösungen kommen und unter Umständen zum Verwurf des Gasgenerators führen kann. Die Grenzschichten sind im Einzelnen wie folgt aufgebaut:

1 – Migrationssperre auf EPDM. Die Migrationssperre auf der Außenseite des Boot verhindert die Diffusion von Weichmachern und Fremdmolekülen außerhalb des Gasgenerators in den Gasgenerator hinein.

2 – EPDM auf Aluminium. Wie in obiger Abbildung dargestellt (Abb. 12) wird die Aluminiumkappe von dem EPDM umschlossen. Ablösungen des EPDM vom Aluminium sind bislang nicht bekannt. Durch eine unzureichende Verklebung der Aluminiumkappe mit dem EPDM können jedoch Kavitäten entstehen in denen sich Lösemittel oder Verunreinigungen ansammeln. Der gekrümmte Bereich der Aluminiumkappe ist ebenfalls kritisch weil hier enge Radien und unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten aufeinander-

treffen. Des Weiteren können hier Torsionsspannungen zwischen der festen Kappe und dem Gummimaterial beim Hantieren der Boots auftreten.

3 – Migrationssperre auf EPDM. Der Materialmix in dieser Grenzschicht entspricht dem in Grenzschicht -1. Die Besonderheit an dieser Stelle ist jedoch, dass diese im Bereich der Aluminiumkappe eine starke Krümmung aufweist was die Grenzschicht generell empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen macht. Des Weiteren besitzt diese Grenzschicht eine offene Flanke hin zur Aluminiumkappe, welche bei Reinigungsprozessen beschädigt werden kann und durch die Lösungsmittel eindringen können.

4 – Primer auf Migrationssperre. In dieser Grenzschicht traten die im Folgenden beschriebenen Ablösungen auf. Der Primer ist essentiell um eine gute Haftung des Treibstoffs auf der Migrationssperre zu gewährleisten.

5 – Treibstoff auf Primer. Ablösungen in diesem Bereich sind sehr kritisch, da sie zu einer Vergrößerung der freien Oberfläche beitragen, was wiederum beim Abbrand des Treibstoffes zu einem unkontrollierten Druckanstieg führt.

6 – Grenzschichten zwischen EPDM, Migrationssperre, Primer und der Linerkappe. Dieser Bereich entsteht in der Überlappung der Aluminiumkappe mit dem EPDM. Rings um das Gewinde bildet das EPDM eine ca. 2-3 mm hohe Flanke die von Lösemitteln oder anderen Bestandteilen angegriffen werden können.

7 – Primer auf Aluminium. Die Aluminiumkappe wird mit Primer lackiert. Anschließend wird die Linerkappe hineingegossen und aushärten gelassen. Von Ablösungen in diesem Bereich ist bislang nichts bekannt.

8 – Linerkappe auf Primer. Eine Ablösung der Linerkappe vom Primer ist bislang nicht bekannt.

9 – Primer auf Linerkappe. Diese Grenzschicht ist identisch mit der Grenzschicht aus -8. Hier kann jedoch durch Weichmacherdiffusion aus dem Treibstoff in Richtung Linerkappe, oder umgekehrt, die Anbindung und die Festigkeit des Treibstoffes beeinträchtigt werden. Ablösungen zwischen Linerkappe und Treibstoff werden in diesem Bereich jedoch toleriert.

Generell stellen Ablösungen des Treibstoffes das größte Risiko dar. Aufgrund der sehr dünnen Schichtdicken mit welcher die Migrationssperre und der Primer aufgetragen werden kann in den Röntgenbildern nicht zweifelsfrei festgestellt werden wo eine Ablösung genau stattgefunden hat. Es muss daher jede Ablösung als eine Ablösung des Treibstoffes angesehen werden.

Erst durch Zerteilen des kartuschierten Treibsatzes kann bestimmt werden zwischen welchen Grenzschichten die Ablösungen genau aufgetreten sind (Abb. 13).

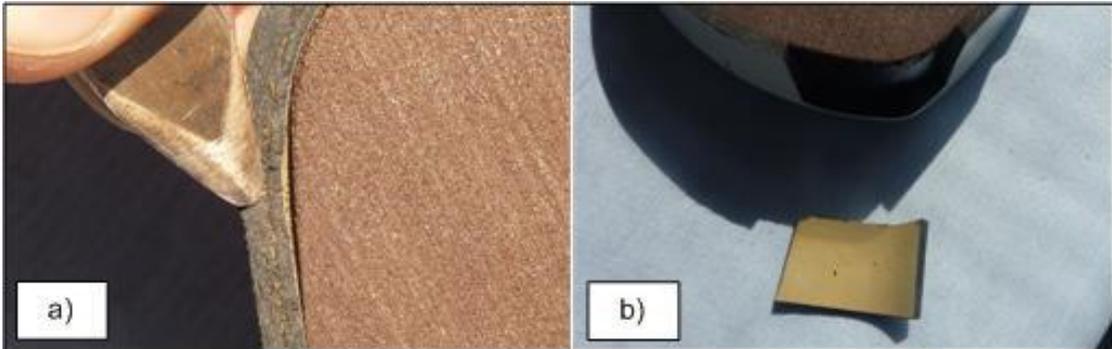


Abb.: 13 – a) Schnitt durch den Gasgenerator, b) die Migrationssperre (gelb) haftet gut sichtbar auf dem EPDM, die Ablösung fand zwischen Primer (schwarz) und der Migrationssperre statt.

5. Darstellung des Fertigungsprozesses der Gasgeneratoren

Im Zuge der Untersuchung der Treibstoffablösungen erfolgte Mitte 2017 eine Überarbeitung der Arbeitsvorschriften. Des Weiteren wurden neue Arbeitsschritte eingefügt, und der bislang extern durchgeführte Lackierprozess wieder eingegliedert. Da die Ablösungen ausschließlich zwischen den Grenzschichten auftraten, ist der Aufbau der einzelnen Grenzschichten von besonderem Interesse. In Tabelle 1 sind die zugrundeliegenden Arbeitsvorschriften für den Fertigungsprozess aufgelistet:

Tab.: 01 – Übersicht der vorliegenden Prüf- und Fertigungsanweisungen.
 (* neu eingeführte Arbeitsschritte)

Dokument Nr. / Titel	Stand
TLA-633-13113-0001-E01 / Technische Lieferanweisung Technische Lieferanweisung Boot	13.02.17
FPV-633-13117-0000-A / Fehlerkatalog Boot	19.01.18
FEA-633-13117-0010-A02 / Fertigungsanweisung Reinigen, Ablüften Boot	11.01.18
FEA-633-13117-0020-A02 / Fertigungsanweisung Ausheizen Boot (schwarz)	11.01.18
FEA-633-13117-0030-A00 / Fertigungsanweisung * Lackieren Boot	12.01.18
FEA-633-13117-0040-A02 / Fertigungsanweisung Ausheizen Boot (lackiert)	11.01.18
FPV-633-13117-0000-A02 / Fehlerkatalog Boot (lackiert)	19.01.18
FPV-633-13117-0000-A02 / Fertigungs- und Prüfvorschrift Boot lackiert ausgeheizt	15.01.18
FLK-633-12112-0000-F02 / Fertigungslaufkarte	07.07.17
TLA-633-12113-0002-E00 / Technische Lieferanweisung Boot (lackiert)	03.09.15
FEA-633-12112-0012-A00 / Fertigungsanweisung * Lack aufrauen	17.10.17
FEA-633-12112-0017-A02 / Fertigungsanweisung Wiegen Boot	01.09.17
PRA-633-12112-0040-B02 / Prüfanweisung Prüfung Boot komplett	01.12.17
FEA-633-12112-0020-C / Fertigungsanweisung Einsetzen Boot in Giessvorrichtung	23.07.17
FEA-633-12112-0030-E01 / Fertigungsanweisung Reinigen	01.09.17
FEA-633-12112-0060-E02 / Fertigungsanweisung Linerkappe Giessen und Härten	01.09.17
FEA-633-12112-0065-A00 / Fertigungsanweisung * Primern und Ablüften (Boot)	01.09.17
FEA-633-12112-0090-B02 / Fertigungsanweisung Tempern	01.09.17
FEA-633-12112-0100-D02 / Fertigungsanweisung Montage Giessvorrichtung mit Vakuumtest	01.09.17
FEA-633-12112-0110-C02 / Fertigungsanweisung Aufheizen Giessvorrichtung mit Boot	05.09.17
FPV-633-12112-0000-H01 / Fertigungs- und Prüfvorschrift GG Grain Live	11.11.15
FEA-633-12112-0120-D02 / Fertigungsanweisung Giessen und Verdränger setzen	09.10.17

Die Herstellung des Gasgenerators ist anhand der Dokumente in die folgenden sechs Fertigungsabschnitte untergliedert (Abb. 14).

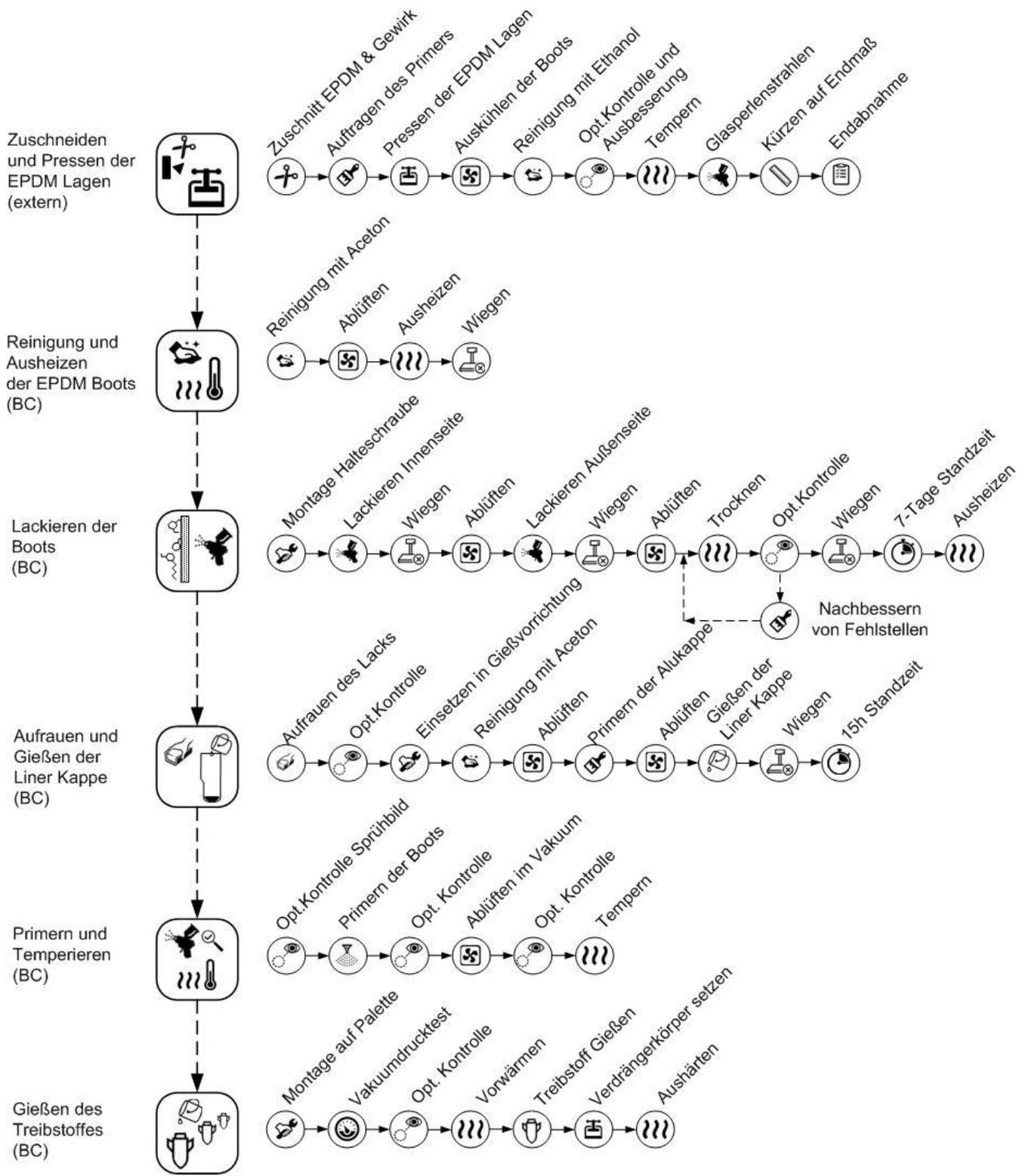


Abb.: 14 – Übersicht der Fertigungsabschnitte des Gasgenerators.

1. Fertigungsschritt: Zuschneiden und Pressen der EPDM Lagen

Dokumente: TLA-633-13113-0001-E01, FPV-633-13117-000-A

Die Fertigung des EPDM Boot erfolgt komplett durch die Firma Gummitechnik Kreißler GmbH mit Sitz in Gendorf. Der EPDM Boot besteht aus einem doppellagigen System aus kevlarfaserverstärktem EPDM in dessen Mitte eine Gewirkschicht eingelegt ist, welche die mechanische Stabilität des fertigen EPDM Boot erhöht. Produktionsbedingt orientieren sich die Kevlarfasern beim Kalandrieren in Längsrichtung (Kalanderrichtung). Das EPDM weist daher in diese Richtung eine höhere Zugfestigkeit auf als quer zur Kalanderrichtung. Diese Wirkrichtung gilt es beim Zuschneiden der Einzelteile zu berücksichtigen.

Das Gewirk wird vor dem Zuschneiden beidseitig dünn mit dem Primer eingestrichen und anschließend, zur Entfernung des Lösemittels, für 12 h offen abgelüftet. Mittels Schablonen werden aus der EPDM Folie und dem Gewirk entsprechende der Kalanderrichtung passende Stücke für die Fertigung des Boot und der Kappe herausgeschnitten.

Die Aluminiumkappe wird vor dem Einkleben mit Aceton gereinigt und anschließend allseitig mit Glasperlen gestrahlt. Die Standzeit nach dem Glasperlenstrahlen beträgt maximal zwei Tage. Da nicht die gesamte Metalloberfläche in EPDM eingekleidet wird, wird nur der zu verklebende Bereich dünn mit dem Primer eingestrichen. Nach dem primern der Aluminiumkappe muss diese mindestens 2 h ablüften. Die maximale Standzeit nach dem Auftragen beträgt 14 Tage (Abb. 15). Anschließend werden die Aluminiumkappe, EPDM und die Gewirkzuschnitte miteinander verklebt.

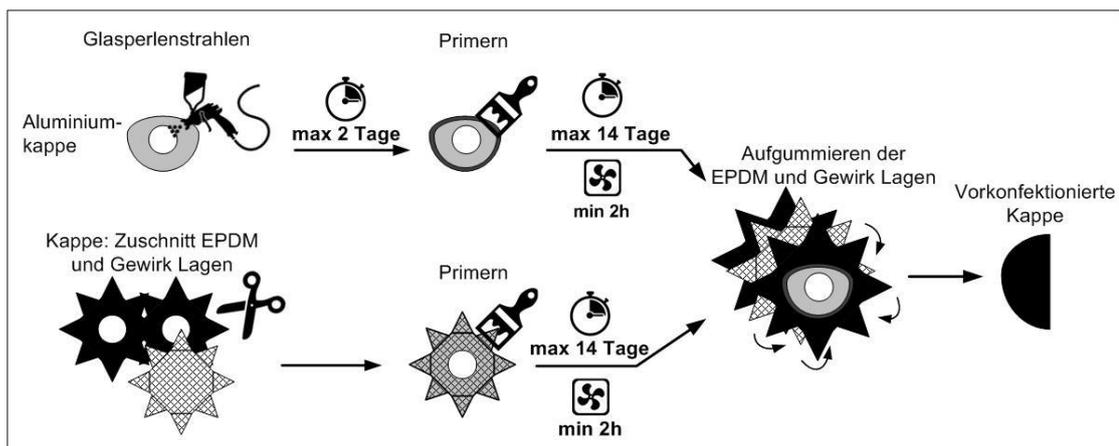


Abb.: 15 – Vorkonfektionieren der Kappe.

Die Vulkanisation der einzelnen EPDM Lagen zum fertigen Boot erfolgt mittels einer beheizten Pressform. In die Pressform werden die restlichen Zuschnitte von EPDM und Gewirk für den Boot eingelegt. Die vorkonfektionierte Kappe wird auf den Kern montiert und in die Pressform gelegt. Anschließend werden

die Lagen EPDM und Gewirk für den Boot auf der Kernoberseite zusammengelegt und die Pressform mit dem Oberteil verschlossen (Abb. 16). Die EPDM Folien mit dem Gewirk werden bei $150\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ vulkanisiert. Die erforderliche Vulkanisationszeit hängt ganz von dem Ausgangsmaterial EPDM ab und muss für jede Charge neu ermittelt werden.

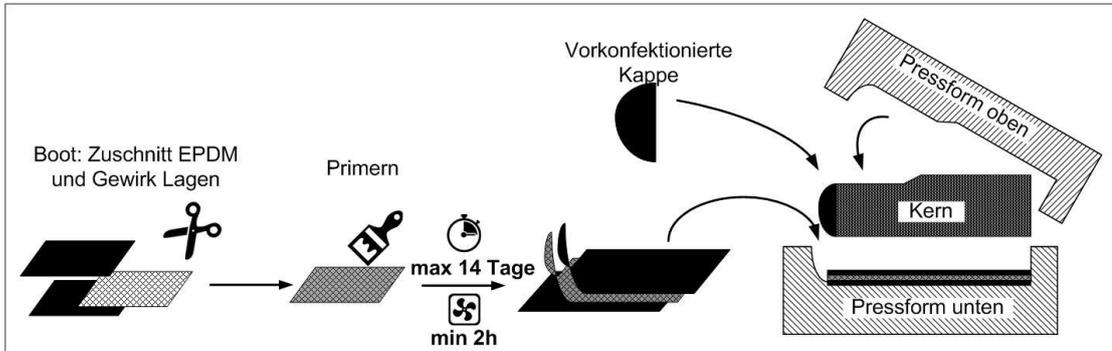


Abb.: 16 – Vulkanisation der EPDM Lagen und vorkonfektionierte Kappe zum Boot.

Nach der Vulkanisation werden die noch warmen Boots vom Kern gelöst und zum Auskühlen auf ein Stützrohr geschoben (Abb. 17). Um das Trennmittel von der Pressform zu entfernen werden die Boots nach dem Auskühlen innen und außen mit Ethanol gereinigt. Nach dem Abkühlen werden die Boots einer optischen Kontrollen unterzogen und falls nötig Fehlstellen, Lunker und ausgerissene Stellen mit Flüssiggummi ausgebessert und in dem Endprüfungsprotokoll dokumentiert. Im anschließenden Temperprozess werden die gereinigten Boots noch weitere $48\text{ h} \pm 2\text{ h}$ bei $100 - 110\text{ °C}$ erwärmt um noch vorhandene Lösemittelreste und Vulkanisationsrückstände zu entfernen.

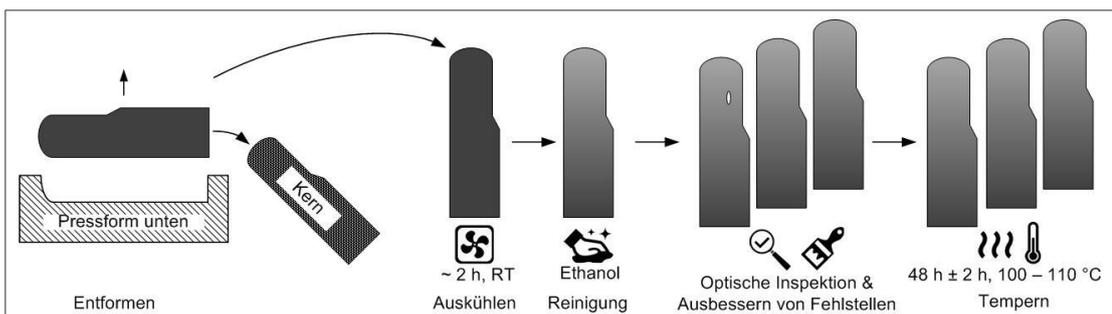


Abb.: 17 – Nachbehandlung der Boots nach dem Pressen.

Die fertigen Boots werden anschließend auf das richtige Endmaß gekürzt und die Oberfläche durch Glasperlenstrahlen aufgeraut (Abb. 18).

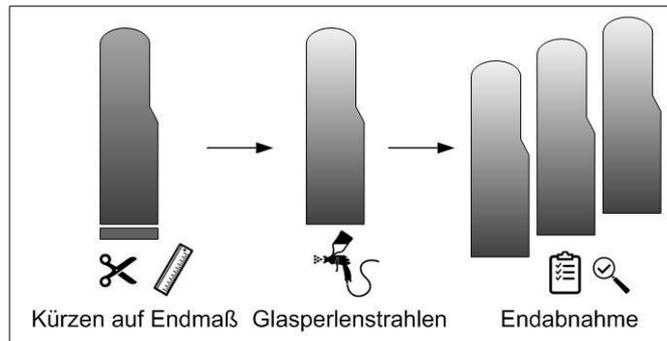


Abb.: 18 – Kürzen auf Endmaß, Glasperlenstrahlen und Endabnahme.

Die Endabnahme der Boots durch die Bayern Chemie erfolgt nach einem definierten Abnahme- und Fehlerkatalog. Der Boot muss über seine gesamte Länge gewissen Minstdicken aufweisen. Kleinere Fehlstellen im Material müssen in der Laufkarte dokumentiert und dürfen gegebenenfalls mit flüssigem EPDM ausgebessert werden. Boots mit größeren Beschädigungen am EPDM oder der Aluminiumkappe, Verformungen oder Beschädigungen an der Gewirkeinlage dürfen nur noch zu Testzwecken weiterverwendet werden.

2. Fertigungsschritt: Reinigung und Ausheizen der EPDM Boots

Dokumente: FEA-633-13117-0010-A02, FEA-633-13117-0020-A02

Zunächst werden die gelieferten Boots händisch mit Aceton getränkten Tüchern von Verunreinigungen auf der Innen- und Außenseite befreit. Danach müssen die gereinigten Boots mindestens 15 min auf einer sauberen Fläche ablüften. Um Lösemittel und Vulkanisationsrückstände zu entfernen werden die gereinigten Boots in einem Vakuumtrockenschrank ausgeheizt wobei sie abwechselnd für eine Stunde bei Umgebungsdruck auf 80°C erwärmt und dann für 3 Stunden bei 200 mbar Absolutdruck ausgegast werden (Abb. 19). Dieser Zyklus wird fortlaufend für 72 h ± 4 h durchgeführt.

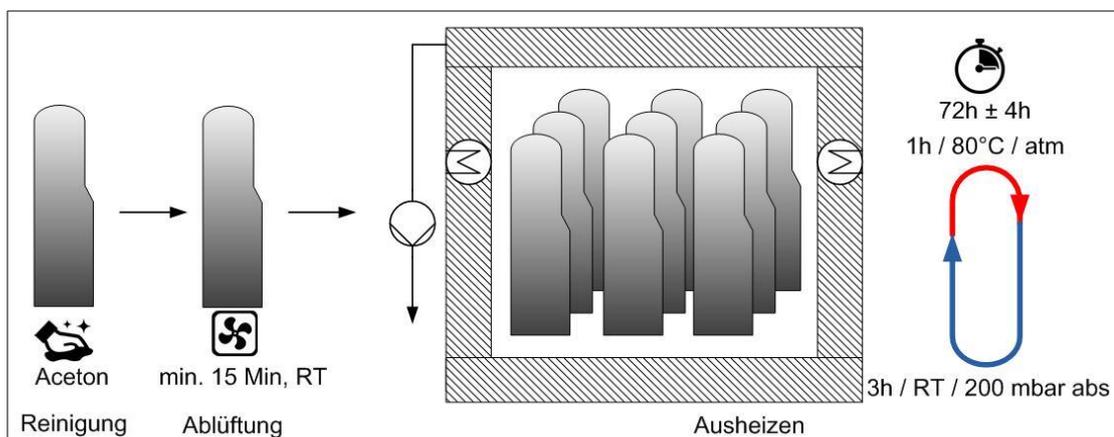


Abb.: 19 – Eingangsreinigung und Ausheizen der EPDM Boots.

Nach dem Ausheizen werden die Boots einzeln gewogen und das Gewicht in der Fertigungslaufkarte vermerkt. Zum Schluss werden die ausgeheizten Boots mit der Aluminiumkappe nach oben in ausgekleidete Transportkisten verpackt. Als mechanischer Schutz wird in die Boots ein Stützzylinder aus Schaumstoff eingesetzt.

3. Fertigungsschritt: Lackieren der Boots

Dokumente: FEA-633-13117-0030-A00, FEA-633-13117-0040-A02, TLA-633-12113-0002-E00

Das Lackieren der Boots erfolgt erst seit Anfang 2018 auf dem Gelände der Bayern Chemie. Zuvor wurden die Boots bei einem externen Dienstleister lackiert und trocknen gelassen. Die Boots werden vor dem Lackieren auf eine Haltevorrichtung geschraubt (Abb. 20). Die Haltevorrichtung deckt von außen und innen die freiliegende Aluminiumoberfläche und das Innengewinde ab. Somit wird der Lack nur auf dem EPDM aufgetragen.

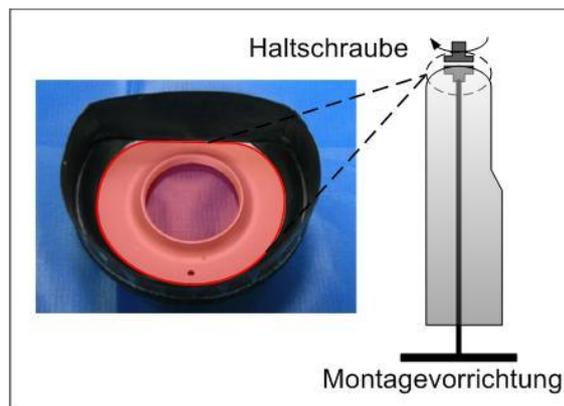


Abb.: 20 - Installation der Halteschraube. Das freiliegende Aluminium (rot markiert) wird durch die Haltschraube abgedeckt.

Die Haltevorrichtung dient dazu die Boots während des Lackiervorgangs auf Lackierbrettern fixieren und drehen zu können, ohne dass die vorher gereinigte EPDM Oberfläche berührt werden muss. Die kleine Bohrung in 6 Uhr Position in der Aluminiumkappe verhindert, dass die Abdeckung falsch oder verkantet montiert werden kann.

Der für die Migrationssperre verwendete Decklack besteht aus zwei Komponenten, welche kurz vor dem Lackieren im genau definierten Massenverhältnis abgewogen und gemischt werden.

Nach dem Mischen empfiehlt der Hersteller eine Vorreaktionszeit von 15 Minuten bevor der Lack aufgetragen wird. Zum besseren Sprühen mit der Sprühpistole wird mit zusätzlichem Verdünner die Viskosität des Lacks

reduziert. Da sich die Viskosität des Lacks nach dem Mischen von Lack und Härter noch merklich verändert, empfiehlt der Lackhersteller die Zugabe des Verdünners erst nach Ablauf der Vorreaktionszeit. Die Topfzeit des Lacks nach dem Mischen (die Dauer innerhalb derer der angerührte Lack verarbeitet sein muss) beträgt 4 Stunden.

Lackiert wird in einer temperierten Sprühkabine bei einer Temperatur zwischen 20 – 30 °C und einer relativen Luftfeuchte von 30 - 85 %.

Gemäß Fertigungsanweisung wird der Lack in je drei Lagen auf der Innen- und Außenseite der Boots aufgebracht werden. Die Innenseite der Boots wird dabei am Boden beginnend mit einer kreisförmig aufsteigenden Bewegung lackiert (Abb. 21). Aufgrund des geringen Durchmessers des Boots ist es nicht möglich mit der Sprühpistole im Boot selbst zu arbeiten, es kann daher nur von oben herab lackiert werden.

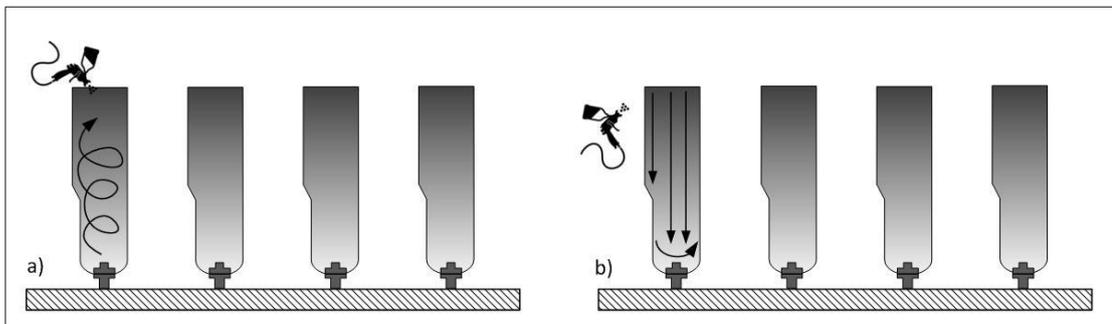


Abb.: 21 – Reihenweises Lackieren der Boot a) Innen- und b) Außenseite.

Die zu lackierenden Boots sind in einer Reihe aufgestellt, sodass auf jedem Boot nacheinander nur eine einzelne Schicht aufgebracht wird. Sobald die erste Schicht aufgetragen ist, wird zum nächsten Boot gewechselt, sodass die bereits aufgetragene Lackschicht antrocknen kann. Insgesamt wird die Innenseite 2x vor- und 1x endlackiert. Nach dem Endlackieren werden die Boots vor der Weiterverarbeitung mindestens 10 min abgelüftet. Analog dem Lackieren der Innenseite wird der Lack auf der Außenseite in drei Durchgängen aufgebracht. Reihum wird jeder Boot außen zweimal vorlackiert und anschließend endlackiert.

Gemäß Fertigungsanweisung soll die Gesamtmasse des innen und außen aufgetragenen Lacks (Trockenmasse) zwischen 90 und 130 g betragen. Sobald die lackierten Oberflächen eine gleichmäßige Deckung aufweisen (entspricht ca. 100 g Lack Feuchtmasse), werden die Boots in die Trockenkammer gestellt, wo sie mindestens 90 Minuten bei 52 °C antrocknen und bei ausgeschalteter Heizung in der Restwärme für mindestens 12 h fertig trocknen. Nachbesserungen aufgrund von Lackabplatzern oder zu geringer

Lackmenge sind auf dem angetrockneten Lack nur zwischen 2-72 h nach dem Lackieren zulässig.

Bei der optischen Kontrolle werden fehlerhafte Stellen ausgebessert. Lacknasen dünner 5 mm und kleiner 10 mm Länge werden toleriert, größere Lacknasen müssen abgeschliffen und mit einem Pinsel wieder neu nachlackiert werden. Bereiche in denen zu wenig Lack aufgetragen wurde und der schwarze EPDM Boot noch durchschimmert, z.B. im Kopfbereich, müssen händisch mit einem Pinsel nachgearbeitet werden. Im Kappenbereich wo das blanke Aluminium durch die Haltevorrichtung bedeckt ist, kann es bei der Demontage der Haltevorrichtung zu Lackabplatzern kommen. Lackabplatzer bis zu einer Länge < 1 mm sind akzeptabel, größere Fehlstellen (> 1 mm) müssen mit einem Pinsel nachgearbeitet werden.

Während des Lackiervorgangs ist es möglich, dass geringe Mengen Lack unter die Haltevorrichtung kriechen. Lackränder auf dem Aluminium bis zu einer Breite von 4 mm werden ebenfalls toleriert. Größere Lackreste oder Reste im Gewindegang müssen entfernt werden. Nachgearbeitete oder überlackierten Boots werden erneut zum Trocknen in die Trockenkammer gestellt wo sie mindestens 90 Minuten lang bei 52 °C antrocknen und anschließend wieder in der Restwärme für 12 h weitertrocknen. Die fertigen Boots werden nach dem Trocknen und erneuter optischer Kontrolle gewogen. Anschließend werden die abgenommenen Boots in die Transportbox gestellt, wo sie 7 Tage ruhen müssen bevor sie chemisch belastet werden dürfen.

Nach der 7 tägigen Standzeit werden die lackierten Boots ausgeheizt. Die Boots durchlaufen erneut den Ausheizzyklus, wie in Abbildung 19 dargestellt, wo sie abwechselnd für 3 Stunden bei 200 mbar Absolutdruck ausgasen und dann für 1 Stunde auf 80 °C bei Atmosphärendruck erhitzt werden. Dieser Ausheizzyklus wird für 72 h \pm 4 h fortgeführt. Nach dem Ausheizen werden in die ausgekühlten Boots die Stützzylinder wieder eingesetzt und die Boots mit der großen Öffnung nach unten in die Transportkartons verpackt.

4. Fertigungsschritt: Aufrauen und Gießen der Linerkappe

Dokumente: FEA-633-12112-0012-A00, FEA-633-12112-0017-A02, PRA-633-12112-0040-B02, FEA-633-12112-0020-C, FEA-633-12112-0030-E, FEA-633-12112-0060-E02

Die Linerkappe bildet die physische Trennung zwischen dem Gasgenerator und der Aluminiumkappe. Als Vorbereitung für das Gießen der Linerkappe und für die bessere Haftung des Primers wird der aufgetragene Lack im Kopfbereich aufgeraut. Dazu wird der lackierte Boot über eine

Schleifvorrichtung gestülpt, an welchem ein Schleiffließ befestigt ist. Gemäß Arbeitsanweisung muss der übergestülpte Boot 5x entgegengesetzt und 5x im Uhrzeigersinn gedreht werden (Abb. 22).

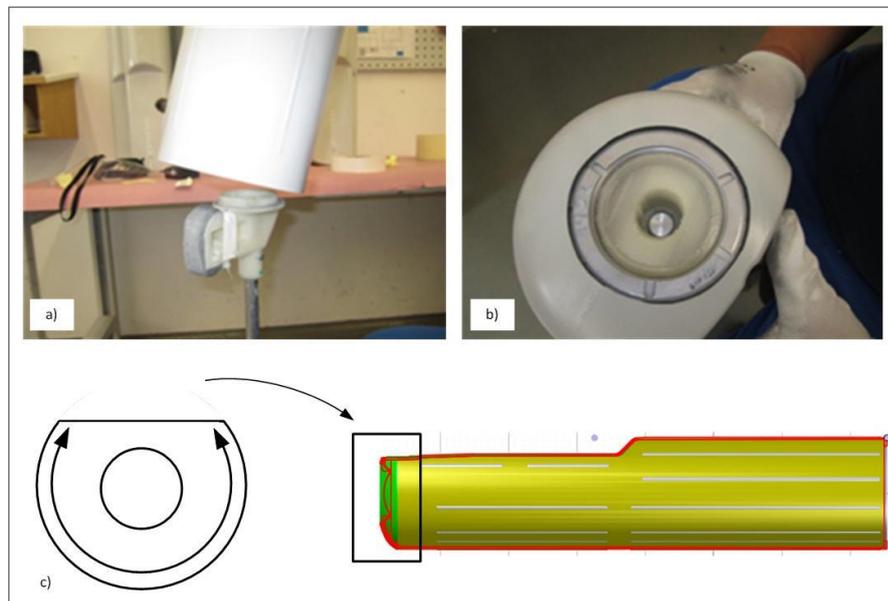


Abb.: 22 – a) Schleifvorrichtung, b) Draufsicht auf Boot, aufgesetzt auf Schleifvorrichtung, c) Querschnitt Boot.

Bedingt durch die Geometrie des Boot ist es nicht möglich den Kopfbereich gleichmäßig nach dieser Methode aufzurauen. Die Ecken und der abgeflachte Bereich müssen per Hand mit Schleiffließ angeraut werden. Anschließend erfolgt eine optische Kontrolle der angerauten Oberfläche. Nach der optischen Kontrolle werden vorhandene Schleifrückstände mit Stickstoff ausgeblasen und falls erforderlich Verunreinigungen mit einem trockenem Reinigungstuch entfernt. Zur weiteren Verarbeitung wird der Boot mit der Haltschraube verschlossen und in eine Gießvorrichtung eingesetzt (Abb. 23). Zur Abdichtung des Boots zur Gießvorrichtung wird anschließend noch ein O-Ring zwischen Boot und Gießvorrichtung eingelegt.

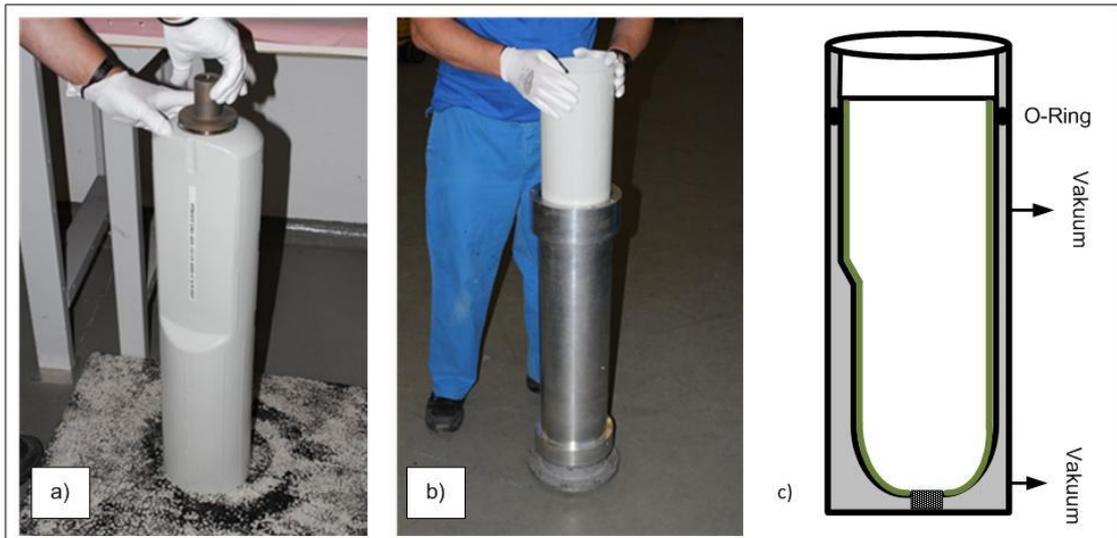


Abb.: 23 – a) Verschließen des Boot mit Halteschraube, b) Einsetzen des Boot in Gießvorrichtung c) Querschnitt durch Gießvorrichtung mit Vakuumanschlüssen.

Nach dem Einsetzen in die Gießvorrichtung wird der Boot nochmals mit Aceton getränkten Tüchern gereinigt. Anschließend lässt man die Boots schrägliegend für mindestens 2 h ablüften, woraufhin eine erneute Sichtprüfung erfolgt.

Vor dem Gießen der Linerkappe wird die freiliegende Aluminiumkappe mittels Pinsel dünn mit Primer eingestrichen (Abb. 24). Nach dem Primern der Kappe muss der Boot für mindestens 2 h bei 18 - 25 °C und einer maximalen Luftfeuchtigkeit von 7 g Wasser / kg Luft im Abzug auslüften.

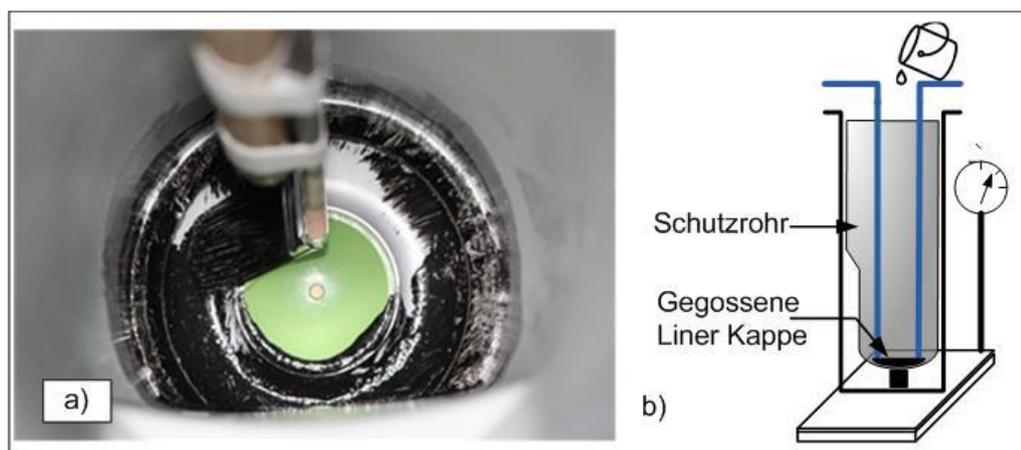


Abb.: 24 – a) Händisches Auftragen des Primers im Kopfbereich, b) Gießen der Linerkappe.

Nach vollständigem Antrocknen des Primers wird die Linerkappe gegossen. Die Linerkappe ist eine Isolationsschicht und besteht hauptsächlich aus hydroxyterminiertem Polybutadien (HTPB), Weichmacher, Ruß und Hilfsstoffen.

Die Polymermischung lässt sich soweit vorbereiten dass unmittelbar vor der Verwendung nur noch der Härter hinzugefügt werden muss. Die Ansatzgröße der Polymermischung ist so gewählt, dass nur zwischen 5 und 6 Linerkappen gegossen werden können. Aufgrund der kurzen Verarbeitungszeit von nur 10 Minuten erfolgt das Verrühren beider Komponenten erst unmittelbar vor dem Gießen. Zum Eingießen der Polymermischung wird der Boot in seiner Gießvorrichtung auf eine Waage gestellt und tariert. Aufgrund elektrostatischer Anziehung kann es beim Gießen passieren, dass dünne Fäden abgelenkt werden und sich an der Boot Mantelfläche ablagern. Um eine Verunreinigung der Bootwandung durch das Polymer zu verhindern, wird daher ein Schutzrohr aus dickwandigem Papier eingeführt, welches bis kurz vor den Boden des Boot reicht (Abb. 24b).

Jeder Boot muss gemäß Arbeitsanweisung mit mindestens 100 g der Isolierung gefüllt werden. Die exakte Füllmenge wird in der Fertigungslaufkarte notiert. Zum Aushärten der Isolierung wird der abgedeckte Boot im Anschluss mindestens 15 h bei Raumtemperatur im Abzug gelagert.

5. Fertigungsschritt: Aufbringung der Primerschicht und Temperieren

Dokumente: FEA-633-12112-0065-A00, FEA-633-12112-0090-B02

Nach dem vollständigen Aushärten der Linerkappe wird die restliche Innenseite des Boot mit dem Primer beschichtet. Die Auftragung des Primers erfolgt mit Hilfe eines Sprühautomaten, wie er auch für die Innenbeschichtung von Rohren verwendet wird (Abb. 25).

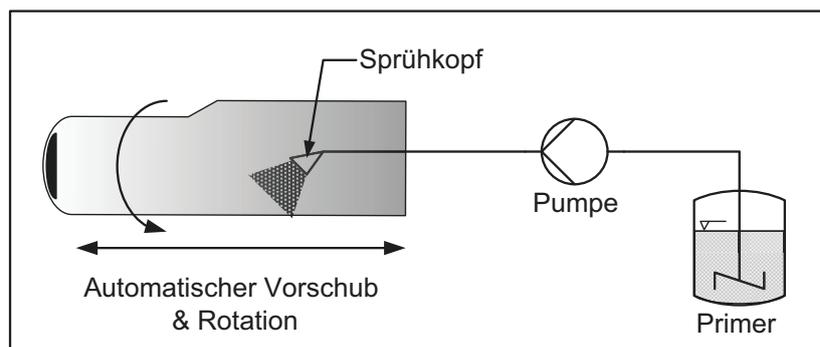


Abb.: 25 - Primern der Innenseite mittels Sprühautomat.

Da der Primer dispergierte Feststoffe enthält, muss dieser während des Sprühvorgangs ständig gerührt werden. Zum Einstellen der Viskosität wird zusätzlich Xylol, bis zu einem Massenanteil von maximal 25%, dem Primer beigefügt.

Vor Arbeitsbeginn wird zunächst das Spritzbild kontrolliert. Dies erfolgt mit Hilfe von Bleheimern, in welche einen kurzen Moment lang der Primer hineingesprüht wird. Die Beurteilung des Sprühbildes erfolgt anhand von Erfahrungswerten. Hat das Sprühbild eine über die gesamte Breite gleichmäßige Deckung wird mit Test-Boots der Sprühvorgang kontrolliert. Das Sprühbild kann durch schrittweises Verstellen der Düse verändert werden, wobei ein Metallhorn in der Düse verschoben wird und diese damit mehr oder weniger verschließt.

Um eine gleichmäßige Beschichtung der Innenseite zu erreichen rotiert der Boot während des Lackiervorgangs während er automatisch einmal vor und zurück bewegt wird. Jeder Boot wird unmittelbar nach dem Primern optisch auf ein gleichmäßiges und geschlossenes Spritzbild kontrolliert. Der Primer soll nur so dünn aufgetragen werden, dass die Migrationssperre vollständig bedeckt und an keiner Stelle der Lack mehr sichtbar ist. Anschließend werden immer 15 geprimernte Boots zusammen im Vakuumtrockenschrank abgelüftet. Dort werden die Boots dreimal für 30 Minuten bei 5 mbar Absolutdruck evakuiert und zwischendurch mit Frischluft belüftet (Abb. 26).

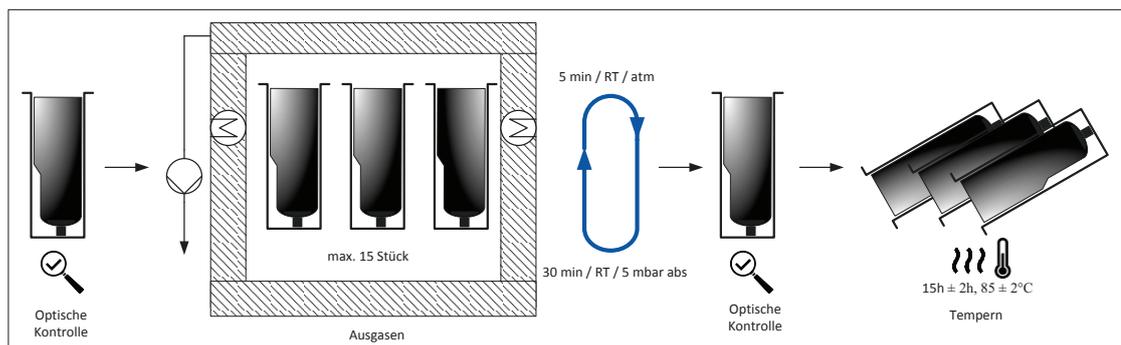


Abb.: 26 – Optische Kontrolle und Ausgasen der geprimerten Boots unter Vakuum.

Nach dem Ausgasen erfolgt eine weitere optische Kontrolle der geprimerten Oberfläche. Hier wird auf eine gleichmäßige Deckung des Primers, insbesondere primerfreie Stellen, Flecken und Ablösungen geachtet. Gegebenenfalls können primerfreie Stellen händisch ausgebessert werden. Anschließend werden die geprimerten Boots zur Aktivierung des Primers getempert. Dazu werden die Boots in ihren Gießrohren schräg, mit der Öffnung nach unten liegend, auf einer Palette im Wärmeschrank für 15 h ± 2 h bei $85 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ gelagert.

6. Fertigungsschritt: Gießen des Treibstoffes

Dokumente: FEA-633-12112-0100-D02, FEA-633-12112-0110-C02, FPV-633-12112-0000-H01, FEA-633-12112-0120-D02

Um eine Reaktion mit Wasser aus der Umgebungsluft zu unterbinden und um den Einschluss von Luftblasen im Treibstoff zu verhindern, findet das Gießen unter Vakuum statt. Dazu werden die getemperten Boots zunächst einem Vakuumtest unterzogen. Hierfür werden die Boots mit den Gießvorrichtungen auf spezielle Aufnahmeverrichtungen geschraubt (Abb. 27) und der zu testende Boot mit einem Deckel verschlossen. Das Vakuum muss entsprechend einer festgelegten Reihenfolge an dem Boot angelegt werden. Zuerst wird das Vakuum an der Boot Außenseite angelegt, erst danach darf das Vakuum am Deckel angelegt werden. Vertauscht man die Reihenfolge in der die Vakuumanschlüsse befestigt werden, besteht die Gefahr dass der Boot zusammengezogen wird und Risse im Lack auftreten. Die Gießvorrichtung wird anschließend auf einen Druck < 15 mbar evakuiert. Nach Absperren der Vakuumleitung darf der Druck maximal um 8 mbar/min ansteigen. Die Testdauer beträgt 3 min. Nach dem Vakuumtest wird zuerst das Vakuum auf der Innenseite gebrochen, dazu wird der Schlauch gequetscht und 3 Sekunden später vom Deckel abgezogen, anschließend werden die restlichen Vakuumanschlüsse oben und unten getrennt. Nach dem Vakuumtest erfolgt eine optische Kontrolle der Bootinnenseite auf etwaige Verformungen oder Risse.

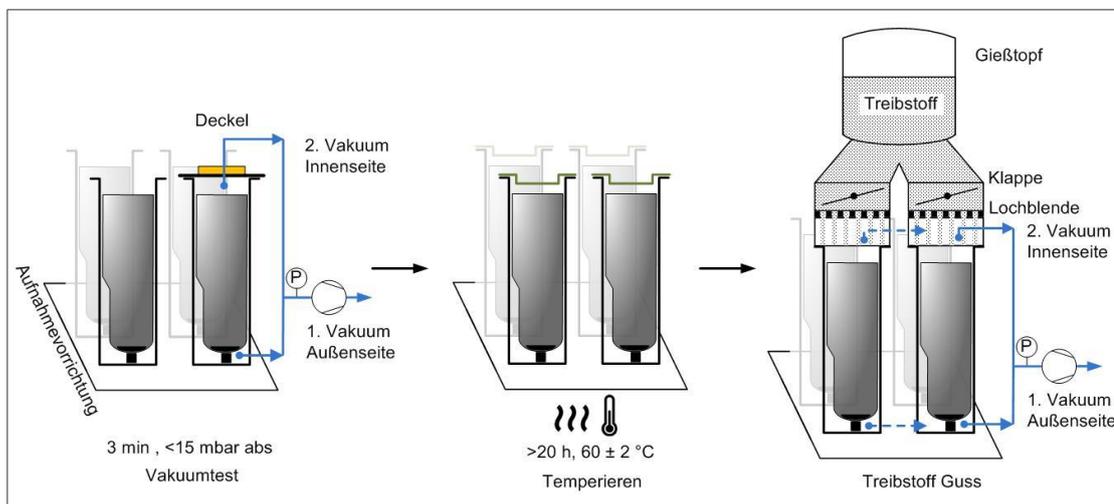


Abb.: 27 – Vakuumtest, Temperieren und Treibstoff Guss.

Die Boots verbleiben während des Gießens auf der Aufnahmeverrichtung, weshalb immer vier Boots auf einer Aufnahmeverrichtung zusammengefasst werden. Die Boots werden vor dem Treibstoffgießen bis zur Mischtemperatur des Treibstoffes erwärmt (60 °C \pm 2 °C, > 20 h). Eine lose Abdeckung soll das Eindringen von Schmutz und Staub in die offenen Boots verhindern. Der ca. 60 °C warme Treibstoff wird unter Vakuum in die vorgewärmten Boots

gegossen. Es wird immer eine vierer Palette Boots unter die Gießanlage gestellt wobei immer zwei Boots gleichzeitig gegossen werden können. Nachdem die zu befüllenden Boots an die Gießvorrichtung angeschlossen sind, wird Vakuum angelegt. Wie zuvor beim Vakuumtest wird zunächst das Vakuum an der Bootaußenseite und anschließend an der Innenseite angelegt. Ab einem Druck $p \leq 30$ mbar wird mit dem Gießen begonnen. Möglichst zeitgleich werden beide Klappen der Gießvorrichtung per Hand geöffnet und ein gleichmäßiger Fluss eingestellt. Die Gießzeit pro Boot beträgt mindestens 2 min. Der Treibstoff fließt durch eine Lochblende. Dies hat den Vorteil dass der Boot über den gesamten Querschnitt gleichmäßig gefüllt wird und es zu keinen Einschlüssen kommen kann. Etwaige Luftblasen im Treibstoff können so schneller an die Oberfläche treten und ausgasen. Die Boots werden nach Augenmaß bis zur Höhe des O-Rings gefüllt. Das Brechen des Vakuums erfolgt in umgekehrter Reihenfolge von innen nach außen. Nach dem Entfernen der Gießaufsätze werden die Verdrängerkörper aufgesetzt und mittels einer Presse, mit einem definierten Druck, in den Treibstoff eingedrückt. Durch die Bohrungen im Verdrängerkörper fließt überschüssiger Treibstoff hindurch und formt eine gleichmäßige Oberfläche. Anschließend werden die gegossenen Boots in einer temperierten Kammer bei 72 ± 2 °C für mehrere Tage ausgehärtet bis der Treibstoff die erforderliche und konstant bleibende Mindesthärte aufweist.

6. Vorgabe und Umsetzung der Arbeitsabläufe

Wie genau eine Tätigkeit erledigt wird hängt sehr oft davon ab wie ausführlich die einzelnen Arbeitsschritte beschrieben werden. Häufig besteht eine Diskrepanz zwischen der Person welche die Arbeitsanweisung definiert und den Personen welche die Tätigkeiten ausführen. Prozesse, die im kleinen Maßstab unter Laborbedingungen funktionieren, müssen dies nicht zwangsläufig in großen Stückzahlen unter realen Produktionsbedingungen tun. Beim Erstellen von Arbeitsanweisungen sollten schon zu Beginn die realen Produktionsbedingungen wie Wissensstand der Mitarbeiter, persönliche Arbeitsweise oder betriebliche Abläufe wie Pausenzeiten etc. berücksichtigt und Korrekturen der Arbeitsanweisungen bedacht werden. Zum besseren Verständnis wie die Arbeitsabläufe definiert werden, müssen vorab die Dokumentenstruktur und die verantwortlichen Bereiche näher betrachtet werden.

6.1 Beschreibung des Arbeitsablaufs und der Verantwortlichkeiten

Wie aus Tabelle 1 bezieht sich der Fertigungsprozess auf eine Reihe unterschiedlicher Dokumente und Dokumententypen. Bei den relevanten

Dokumenten handelt es sich um Fertigungsprüfvorschriften (FPV), Technische Lieferanweisungen (TLA), Fertigungsanweisungen (FEA) und Fertigungslaufkarten (FLK). Diese Dokumente sind Bestandteil des Arbeitsauftrags dem die Fertigung der Gasgeneratoren zugrunde liegt. Im Folgenden sind die Unterschiede der einzelnen Dokumenttypen aufgeführt:

Fertigungsprüfvorschrift - FPV

Seitens der Fachabteilungen wird die Fertigungsprüfvorschrift vorgegeben. Die FPV umfasst mehrere Fertigungsstufen. Sie definiert welche Einsatzstoffe und Werkzeuge verwendet werden, welche Tätigkeiten durchzuführen sind und an welchen Stellen Qualitätskontrollen zu erfolgen haben. Darüber hinaus definiert die FPV die einzelnen Qualitätsmerkmale welche bei den jeweiligen Prozessschritten eingehalten werden müssen.

Technische Lieferanweisung - TLA

Bei Arbeiten externer Dienstleister wird der Leistungsumfang in der technischen Lieferanweisung festgehalten. Je nachdem um welche Dienstleistung es sich handelt, erstellt die dafür verantwortliche Fachabteilung die TLA. Die TLA entspricht in ihren Grundzügen der FPV und definiert im Detail die Anforderungen der zu verwendenden Rohmaterialien, Anforderungen über die Art und Weise wie die Dienstleistungen und Qualitätskontrollen zu erbringen sind und Anforderungen für die erforderliche Nachweisführung.

Fertigungsanweisung - FEA

Die Fertigungsanweisung wird von den Fertigungsmeistern und der Arbeitsvorbereitung erstellt. Grundlage für die FEA ist die jeweilige übergeordnete FPV. Weil die Aufgabenpakete der FPV so umfangreich sind werden diese von den Fertigungsmeistern in kleinere und logistisch sinnvolle Arbeitspakete zerteilt, welche dann mehrere FEAs ergeben. Die FEA enthält zusätzlich Informationen darüber in welchem Gebäude, mit welchen Maschinen und bei welchen Umgebungsbedingungen die Arbeit durchgeführt werden darf, sowie Informationen über zusätzlich anzuwendende Dokumente, wie Fertigungslaufkarten, welche auszufüllen sind. In der Arbeitsbeschreibung selbst sind zwischen FPV und FEA kaum Unterschiede zu sehen. Die Tätigkeiten stimmen zum Teil wortgetreu mit den übergeordneten FPV überein und werden an manchen Stellen durch zusätzliche Informationen ergänzt.

Fertigungslaufkarte – FLK

Die Fertigungslaufkarte ist ein Begleitdokument der Gasgeneratoren und wird von der Arbeitsvorbereitung erstellt. Sie muss für jedes Produktionslos ausgefüllt werden und dient der Dokumentation der einzelnen Fertigungsschritte. In chronologischer Reihenfolge werden die einzelnen Arbeitsschritte aufgeführt und knapp beschrieben. Zusätzlich wird auf die anzuwendende FEA für diesen Prozess hingewiesen. In der FLK werden die

Umweltbedingungen wie Raumtemperatur, Luftfeuchte und die Identifikationsnummern der verwendeten Messgeräte notiert, sowie Tag und Uhrzeit wann die jeweilige Tätigkeit durchgeführt wurde. Daneben unterzeichnen in der FLK der Mitarbeiter der die Arbeit erledigt und der Prüfer der die entsprechenden Qualitätskontrollen durchgeführt hat.

Arbeitsauftrag

Bevor eine neue Charge Gasgeneratoren gefertigt wird, muss ein Arbeitsauftrag vorliegen. Dieser wird von der Arbeitsvorbereitung erstellt und verweist auf die anzuwendenden Dokumente. Dem Arbeitsauftrag liegt die FLK bei in welcher für die zu fertigende Charge Zusatzinformationen stehen. Bei Bedarf enthält der Arbeitsauftrag zusätzliche Informationen darüber wenn eine Tätigkeit abweichend vom vorgeschriebenen Prozess durchgeführt werden soll.

Wie die einzelnen Tätigkeitsbeschreibungen und Verantwortlichkeiten bei der Beschreibung des Fertigungsprozesses miteinander verknüpft sind, ist in Abbildung 28 dargestellt:

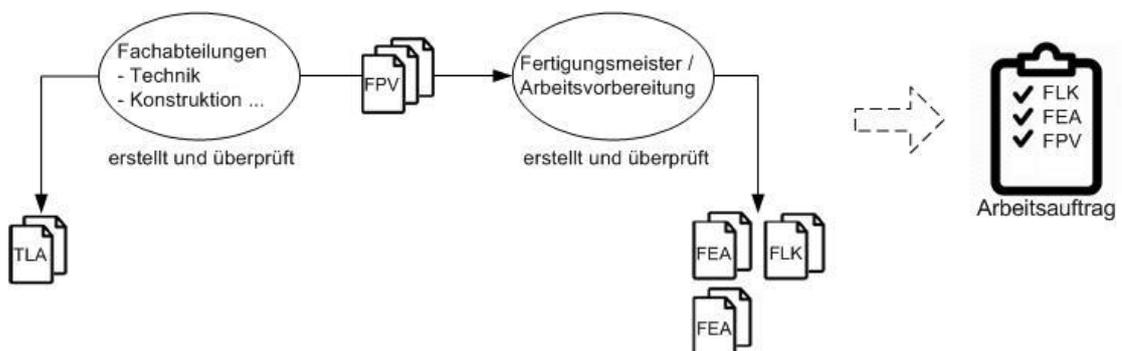


Abb.: 28 – Übersicht der Verantwortlichkeiten bei der Beschreibung des Fertigungsprozesses.

6.2 Abweichungen vom vorgeschriebenen Fertigungsprozess

Entgegen den vorliegenden Fertigungsanweisungen aus Tabelle 1 wurden bei den Fertigungsschritten vereinzelt Abweichungen beobachtet die auch nicht Bestandteil von Arbeitsaufträgen waren. Bei den Abweichungen handelte es sich zum Teil um dauerhafte Änderungen des Prozesses in Folge von beobachteten Prozessstörungen.

In Tabelle 2 sind die Abweichungen aufgeführt, sowie deren Begründung und etwaige Risiken die dadurch entstehen können.

Tab.: 02 – Beobachtete Abweichungen vom vorgeschriebenen Arbeitsablauf.

Dokument	
FEA-633-12112-0065-A00 Primern und Ablüften	<p>Abweichung Vor dem Sprühen mit dem Sprühautomat wird der vorbereitete Primer durch ein Sieb gegossen.</p>
	<p>Begründung Enthaltene Feststoffpartikel können während des Sprühens die Düse verstopfen.</p>
	<p>Risiken Bei dem Feststoff handelt es sich um zugesetzten Ruß. Es ist unklar inwiefern der reduzierte Rußgehalt die Haftung beeinflusst. Da die Viskosität des Primers vor dem Filtrieren bestimmt wird, kann sich diese später wieder ändern, was wiederum einen Einfluss auf den Primerprozess hat. Die Menge Feststoff die im Sieb zurückbleibt kann sich von Ansatz zu Ansatz ändern und wird nicht erfasst.</p>
FEA-633-13117-0010-A02 Boot Reinigen	<p>Abweichung Boots werden vor der Nassreinigung mit jeweils einem einzigen sauberen Tuch innen und außen gereinigt. Dann wird das Tuch mit Aceton getränkt und der Boot nass gereinigt.</p>
	<p>Begründung Die trockene Vorreinigung wurde den Mitarbeitern so vorgegeben. Ein Grund dafür konnte nicht dafür genannt werden.</p>
	<p>Risiken Die trockene Vorreinigung stellt erstmal kein erhöhtes Risiko dar. Durch die doppelte Verwendung des Tuches wird jedoch zunächst der gesamte Schmutz von der Oberfläche im Tuch konzentriert. Durch die Wiederverwendung des Tuchs und Zugabe von Aceton kann es jedoch passieren dass der gesammelte Schmutz wieder verteilt wird.</p>
FEA-633-13117-0010-A02 Boot Reinigen	<p>Abweichung Nach der Bootreinigung wurden diese sofort mit dem Stützzylinder verschlossen und zurück in die Transportbox gestellt, anstatt diese vorher 15min ausgasen zu lassen.</p>
	<p>Begründung Es wurde nach keiner Begründung gefragt.</p>
	<p>Risiken Werden jedoch sehr feuchte Boots mit dem Stützzylinder verschlossen, kann das Aceton lösliche Bestandteile aus dem Schaumstoff des Stützzylinders herauslösen.</p>

FEA-633-13117-0030-A00 Lackieren Boot	Abweichung Während des Lackierens waren die Luftlöcher der Halteschrauben abgeklebt.
	Begründung Durch die Entlüftungsbohrungen in der Halteschraube läuft Lack heraus, welcher die Halteschraube verklebt und beim Drehen der Boots Fingerabdrücke erzeugt.
	Risiken Durch das stehende Luftpolster im Boot lässt sich die Bootinnenseite nicht vollständig mit der Sprühpistole lackieren. Es muss händisch mit Pinsel nachlackiert werden was zu unterschiedlichen Dicken der Migrationssperre führt
FEA-633-13117-0030-A00 Lackieren Boot	Abweichung Entgegen der FEA wurde der Boot mehr als dreimal außen und innen lackiert.
	Begründung Nach den vorgeschriebenen drei Durchgängen war entweder keine gleichmäßig deckende Lackschicht oder noch nicht genügend Lack aufgetragen.
	Risiken Unterschiedliche Lack- und Lösemittelmengen die von Charge zu Charge bei den Boots aufgetragen werden.
FEA-633-12112-0012-A00 Lack aufrauen	Abweichung Das Schleifvlies wird doppelt statt einfach über die Schleifvorrichtung gelegt.
	Begründung Wird das Schleifvlies nur einfach über die Schleifvorrichtung gelegt, beschädigen die scharfen Kanten der Schleifvorrichtung den Lack in den Randbereichen. Durch das doppelagige Schleifvlies werden die scharfen Kanten abgedeckt und der Anpressdruck auf den Lack ist höher.
	Risiken Durch den erhöhten Anpressdruck kann der Lack zu stark beschädigt werden.

FEA-633-12112-0012-A00 Lack aufrauen	Abweichung Entgegen der Anweisung wird das Schleifvlies nicht nach jedem Boot, sondern erst nach jedem 10. Boot gewechselt.
	Begründung Durch das doppellagige Schleifvlies ist der Anpressdruck höher und es muss demnach nicht so oft getauscht werden.
	Risiken Die Boots werden mit zunehmender Nutzung des Schleifvlies weniger stark aufgeraut. Die Bootrauhigkeit kann innerhalb einer Charge variieren.
FEA-633-12112-0012-A00 Lack aufrauen	Abweichung Die Boots werden nicht 5x links und rechts, sondern nur 3x links und rechts geschliffen.
	Begründung Durch das doppellagige Schleifvlies ist dreimaliges Anschleifen ausreichend.
	Risiken Dreimaliges Anschleifen könnte unter Umständen nicht ausreichen die gesamte Oberfläche anzurauen, insbesondere dann wenn der Schleifvlies bereits mehrmals verwendet wurde.

Die beobachteten Prozessabweichungen zeigen dass die Fertigungsmitarbeiter bei einem offensichtlichen Problem selbstständig eine Lösung entwickeln, die ihnen eine sofortige Rückmeldung über den Erfolg oder Misserfolg seiner Handlung ermöglichen. Alle oben aufgeführten Abweichungen waren nicht Teil von Arbeitsaufträgen, es wurde jedoch versichert dass diese Änderungen alle mit den jeweiligen Prozessverantwortlichen abgesprochen wurden.

7. Identifikation möglicher Fehlerquellen im Prozess

Während der Fertigungsbegehung und der Analyse der einzelnen Fertigungsanweisungen wurden besonders die Prozesse betrachtet, welche zu Ablösungen im Bereich der Grenzschichten zwischen EPDM – Migrationssperre - Primer führen können. Da die Ablösungen vor allem im Kopfbereich auftraten, werden hier auch die benachbarten Grenzschichten zu Primer und Linerkappe berücksichtigt, da eine Diffusion von Lösemitteln und Weichmachern aus diesen Bereichen nicht ausgeschlossen werden kann (Abb.29).

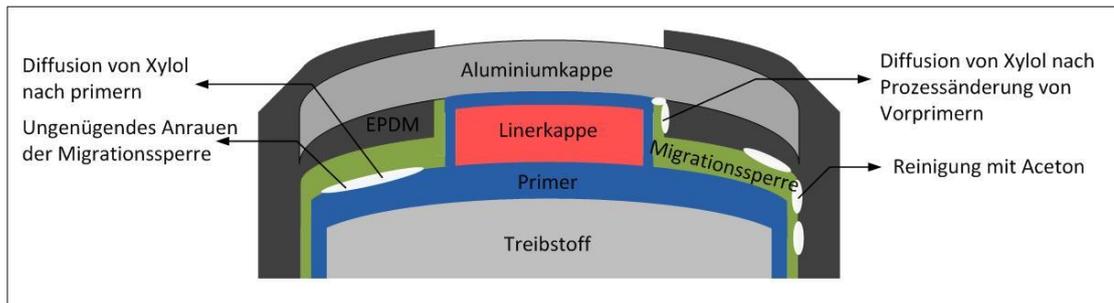


Abb.: 29 – Übersicht möglicher Fehlermechanismen die zu Ablösungen zwischen den Grenzschichten EPDM – Migrationssperre - Primer können.

7.1 Diffusion von Xylol und Weichmachern

Wie bereits erwähnt, stellt die Weichmacherdiffusion zwischen den einzelnen Materialschichten eine bedeutende Fehlerquelle dar (Gottlieb & Bar, 2003, S. 12-13). Über längere Zeiträume können kurzkettige Moleküle über die Grenzschichten hinweg in benachbartes Material diffundieren und dessen Material-eigenschaften verändern. Die unkontrollierte Diffusion beschränkt sich jedoch nicht nur auf Weichmachermoleküle. Kurzkettiges EPDM, welches während des Pressvorgangs nicht an der Quervernetzung mit benachbarten EPDM Molekülen beteiligt ist, bleibt weiterhin mobil und kann mit geeigneten Lösemitteln extrahiert werden (Hrnjak-Murđić, Jelenčić & Bravar, 1996, S. 88).

Vulkanisiertes EPDM besitzt eine gute Beständigkeit gegenüber einer Vielzahl organischer Lösemittel. In chlorierten und aromatischen Lösemitteln weist EPDM jedoch ein deutliches Quell- und Lösungsverhalten auf (Nielsen & Hansen, 2005, S. 1056). In der Arbeit von Hrnjak-Murđić et al., (1996, S. 88) wird mittels Xylol nicht quervernetztes EPDM aus vulkanisiertem EPDM Proben extrahiert. In der Liste der chemischen Beständigkeit von Kunststoffen (Bürkle GmbH, 2016, S. 29) wird EPDM sogar als nicht beständig gegenüber Xylol eingestuft. In der Testreihe von Nielsen & Hansen (2005, S. 1056) wurden zahlreiche Lösemittel in Quellversuchen mit EPDM getestet. Obwohl Nielsen & Hansen nicht explizit Xylol in ihrer Testreihe untersucht haben, kann aufgrund des starken Quellverhaltens in Benzol und Toluol auch auf ein starkes Quellverhalten im chemisch verwandten Xylol geschlossen werden (Abb. 30).

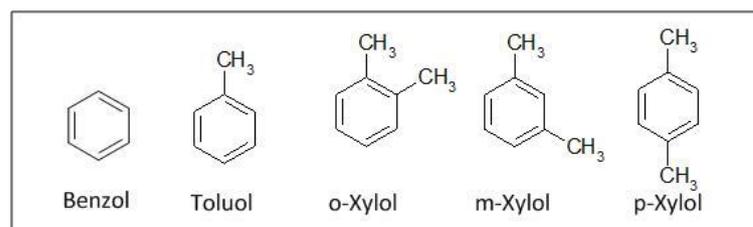


Abb.: 30 – Strukturformeln von Benzol, Toluol und den *o,m,p* - Isomeren von Xylol.

Da Xylol mit einem Massenanteil von bis zu 60% in dem verwendeten Primer enthalten ist, besteht das Risiko, dass EPDM durch direkten Kontakt mit dem Primer zu quellen beginnt. Infolge des Quellens kann Xylol lokal im EPDM eingeschlossen und nicht vernetzte oder lösliche Bestandteile aus dem Polymer herausgelöst werden.

Im Folgenden konnten zwei Arbeitsschritte ausgemacht werden in denen es aufgrund von Prozessschwankungen zum direkten Kontakt von EPDM mit Xylol kommen kann.

7.1.1 Diffusion von Xylol beim Vorprimern

Gemäß Fertigungsanweisung wird beim Aufbringen der Migrationssperre die Aluminiumkappe freigelassen. Ein Überlackieren des Aluminiums mit der Migrationssperre ist nur zulässig bis zu einer Breite von 4 mm, genauso werden lackfreie Stellen von bis zu 1 mm Breite toleriert (Abb. 31). Die lackfreien Stellen entstehen vor allem beim Entfernen der Halteschraube wenn angetrockneter Lack abreißt.

Wird im Rahmen der Vorbereitung der Linerkappe der gesamte Kopfbereich mit Primer grundiert (FEA-633-12112-0060-E02), kann es im Fall von Lackfehlstellen (Abb. 31b) dazu kommen, dass Xylol direkt mit dem EPDM in Kontakt kommt.

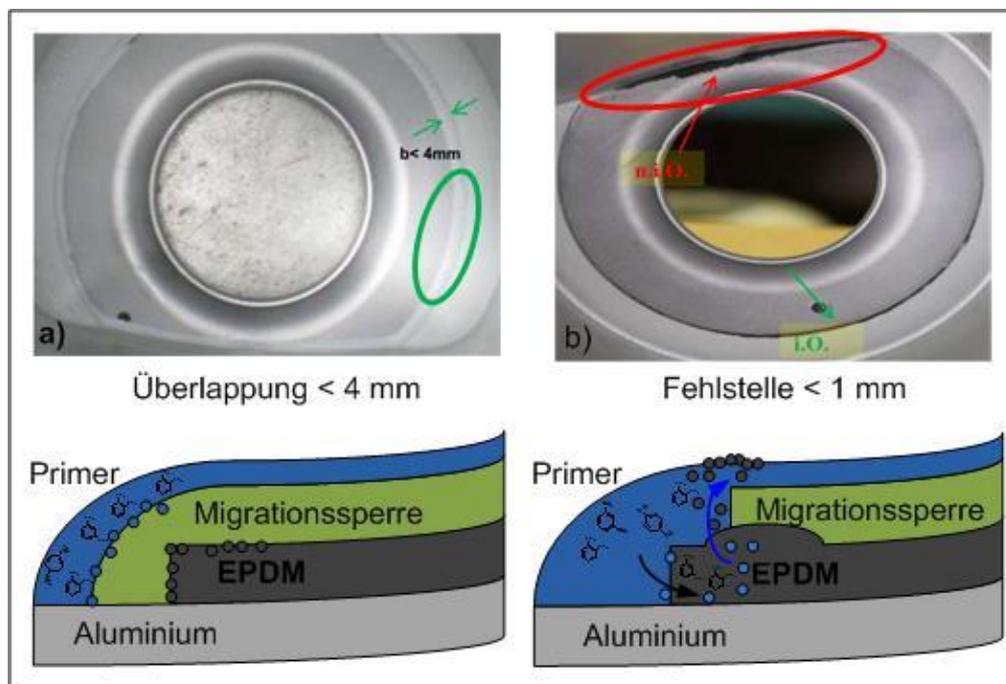


Abb.: 31 – a) Die Migrationssperre überragt das EPDM vollständig und verschließt die offenen Flanken, b) nicht lackierte EPDM Stellen ermöglichen Diffusion von Lösemittel und Extraktion von EPDM Bestandteilen.

Aufgrund der vorgeschriebenen Auslüftungszeit des Primers von mindestens 2 h bei Umgebungstemperatur werden die Boots in der Praxis meistens über Nacht stehen gelassen. Es besteht somit die Möglichkeit dass Xylol an den offenen EPDM Flanken in das Material diffundiert und das EPDM zu quellen beginnt. Zusätzlich kann nicht quervernetztes EPDM aus dem Bootmaterial in die Primerschicht diffundieren.

Da unbehandeltes EPDM sehr unpolar ist, besitzt es nur eine geringe Oberflächenenergie welche von polaren Materialien wie Polyurethan schlecht benetzt wird (Abdollahir, Farajpour, Bayat & Keshavarz, 2016, S. 186). Die herausgelösten EPDM Bestandteile können sich nun im Primer lokal anreichern und die spätere Haftung des Treibstoffs negativ beeinträchtigen.

Gegenmaßnahme

Änderung der entsprechenden Fertigungsanweisung und Fehlerkatalog wonach im Bereich der Aluminiumkappe sämtliches EPDM überlackiert sein muss.

7.1.2 Bildung von Diffusionsbrücken

Bislang erfolgt das Aufbringen der Migrationssperre mittels Sprühpistole. Aufgrund der Größe der Sprühpistole ist ein direktes Lackieren der Innenseite nicht möglich und kann deshalb nur von der Bootöffnung herab erfolgen. Weil die Bootaufnahme unten beinahe vollständig verschlossen ist, bildet sich beim Sprühen ein Luftpolster im Boot welches dafür sorgt dass der Luftstrom mit den Lacktropfen abgelenkt wird und entlang der Schafttrichtung nach oben hinausströmt (Abb. 32).

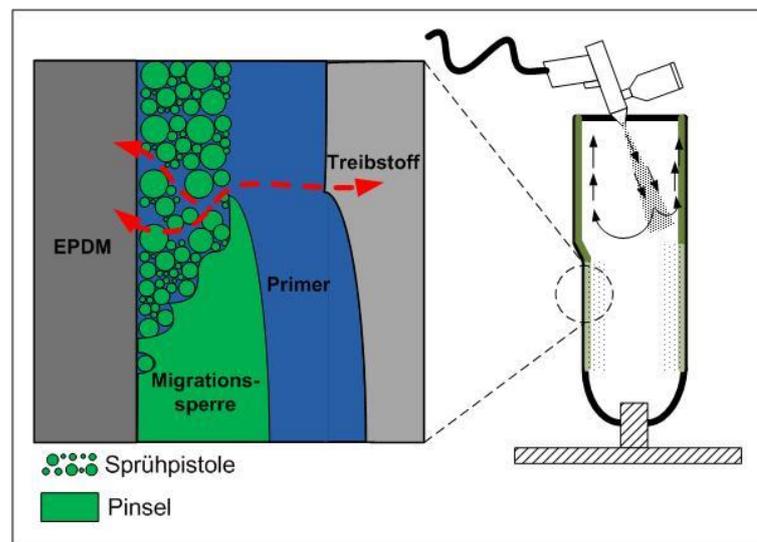


Abb.: 32 – Bildung einer durchlässigen Lackschicht im Übergang der beiden Lackiertechniken

Mit dieser Methode lassen sich die Außenseite und der Schaftbereich gut lackieren. Erfahrungsgemäß ist der Kopfbereich nach dem Lackieren mit Sprühpistole noch nicht vollflächig deckend lackiert. Erst nach dem ersten Trocknen der Lackschicht offenbaren sich fehlerhafte Stellen, die dann mit einem Pinsel nachlackiert werden. Problematisch erscheinen hier vor allem die Bereiche bei denen ein fließender Übergang der beiden Lackiertechniken stattfindet, da hier unweigerlich unterschiedliche Lackdicken entstehen und etwaige durchlässige Kanäle schwer erkannt werden. Durch den händischen Lackierprozess kann eine reproduzierbare gleichmäßige Deckung der Boots nicht zweifelsfrei sichergestellt werden und hängt maßgeblich von den Fähigkeiten und der Erfahrung des Lackierers ab. Da die Qualität der Lackschicht vor allem subjektiv anhand seiner gleichmäßigen Deckung beurteilt wird, besteht zusätzlich das Risiko dass von Mitarbeiter zu Mitarbeiter anders geurteilt wird.

Eine nicht vollkommen geschlossene Migrationssperre, wie in Abbildung 32 dargestellt, begünstigt die Bildung von Diffusionskanälen für Xylol oder Weichmacher. Die Diffusion von Xylol spielt jedoch eine untergeordnete Rolle, da die Boots unmittelbar nach dem Primern im Vakuum ausgegast werden. Durch solche Kanäle können jedoch beim fertigen Gasgenerator Weichmacher zwischen Treibstoff und EPDM diffundieren und die Langzeitlagerfähigkeit negativ beeinflussen.

Gegenmaßnahme

Lackierprozess durch geeignete Maßnahmen automatisieren und zusätzliche Kontrollkriterien einführen, die ein Abdriften des Prozesses schon während des Ablaufs erkennen lassen.

7.2 Fehlerquellen bei der Reinigung der EPDM Boots

Vor dem Aufbringen der Migrationssperre erfolgt eine händische Reinigung der EPDM Boots mit Aceton. Dieser Reinigungsschritt dient dazu organische Verunreinigungen von der Innen- und Außenseite zu entfernen, um dadurch die Haftung der Lackschicht zu verbessern. Die Verunreinigungen können unterschiedlichen Ursprungs sein, wie zum Beispiel Reste des Trennmittels vom Pressvorgang, Weichmacher, nicht quervernetztes EPDM welches beim Tempern nach außen tritt oder Fingerabdrücke vom Manipulieren der Boots. Aceton ist aufgrund seiner hervorragenden Lösungseigenschaften ein häufig eingesetztes Reinigungsmittel und wird in Form von Tauchbädern auch zum Entlacken eingesetzt. Von Nachteil ist jedoch der sehr niedrige Siedepunkt von 56 °C, was dazu führt, dass geringe Mengen Aceton oft schon nach wenigen Sekunden verdunsten.

Gemäß Fertigungsanweisung (FEA-633-13117-0010-A02) sollen die Boots per Hand auf der Innen- und Außenseite mit Aceton getränkten Tüchern

gereinigt werden. Es geht jedoch nicht hervor wie die Reinigung der Boots genau stattfinden soll. Im Folgenden werden die beiden Extremfälle beschrieben wenn zu viel oder zu wenig Aceton eingesetzt wird.

7.2.1 Verwendung von zu viel Aceton

Vulkanisiertes EPDM weist aufgrund seiner quervernetzten Struktur eine sehr gute Beständigkeit gegenüber Aceton auf, kann jedoch durch längeres Einwirken von Aceton anfangen aufzuquellen (Nielsen & Hansen, 2005, S. 1056). EPDM mit geringem Molekulargewicht, dabei handelt es sich um gering oder gar nicht vernetztes EPDM, besitzt aufgrund der fehlenden Gitterstruktur ein höheres Quellverhalten (Zielinska, Seyger, Dierkes, Bielinski & Noordermeer, 2016, S. 7-15). Zwar ist das Quellverhalten von reinem EPDM in Aceton weitaus geringer als in Benzol oder Toluol jedoch handelt es sich bei den EPDM Boots um eine komplexe Mischung aus verschiedenen Polymeren, Weichmachern und Feststoffen die sich zum Teil in Aceton lösen können. Die exakte Polymerzusammensetzung der EPDM Boots wird vom Hersteller nicht bekannt gegeben, es sind jedoch neben EPDM noch Butyl-Kautschuk, Aramid Fasern und Primer darin enthalten.

Da der Pressvorgang der EPDM Boots bei ca. 150 °C stattfindet, kann davon ausgegangen werden dass das im Primer enthaltene Xylol nach dem Pressen verdampft ist (Siedepunkt Xylol 137 – 140 °C).

Aramid Fasern sind in einer Vielzahl von Lösemitteln wie Aceton unlöslich (DuPont, 2017, S. 9). Es ist nicht davon auszugehen dass die Fasern durch das Aceton beeinträchtigt werden.

Der im Boot enthaltene Butyl-Kautschuk besitzt jedoch eine sehr gute Aceton Löslichkeit. Es besteht somit das Risiko dass durch eine exzessive Reinigung des Boots mit Aceton der Butyl-Kautschuk aus dem Boot Material herausgelöst wird und damit die Materialeigenschaften des Boots nachhaltig verändert werden (Abb. 33).

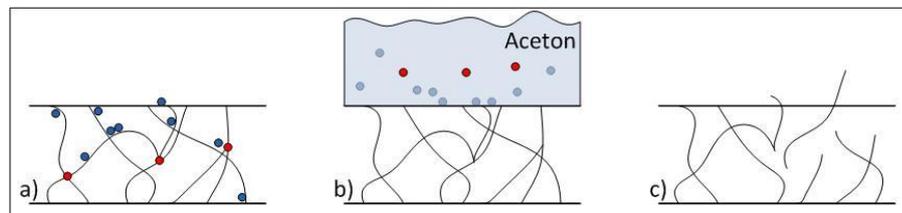


Abb.: 33 – a) EPDM Boot mit löslichen Bestandteilen, b) durch langes Einwirken dringt Aceton bis tief in das Material vor, c) Polymerbestandteile wurden herausgelöst und das Material nachhaltig verändert.

Gegenmaßnahme

Qualifizierung eines alternativen Lösemittels zur Reinigung der Boots. Isopropanol und Ethanol greifen Butyl-Kautschuk wenig oder gar nicht an. Da Ethanol bereits bei der Boot Reinigung nach dem Pressen verwendet wird, bestehen zudem keine Bedenken zur Materialverträglichkeit.

7.2.2 Verwendung von zu wenig Aceton

Eine weitere Fehlerquelle stellt die Verwendung von zu wenig Aceton bei der Reinigung der Boots dar. Durch sein hohes Lösungspotential kann Aceton eine Vielzahl organischer Verunreinigungen auflösen. Aufgrund des niedrigen Siedepunktes und der geringen Verdampfungsenthalpie verdunstet Aceton jedoch schon nach sehr kurzer Zeit. Dies führt dazu, dass Schmutz und lösliche Bestandteile, die zunächst aus den Poren des Polymers herausgelöst wurden, nach Verdunstung des Lösungsmittels auf der Oberfläche zurückbleiben (Abb. 34). Diese Rückstände sind oft als Schlieren zu erkennen und lassen sich meist durch mehrmaliges Reinigen vollständig entfernen. Bei unvollständiger Reinigung, kann durch die lokale Anreicherung der Rückstände auf der Oberfläche die Lackhaftung verschlechtert werden.

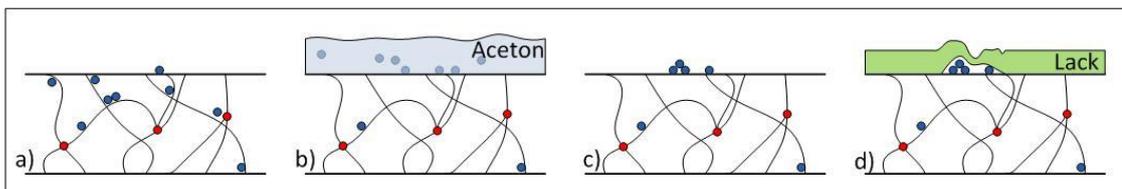


Abb.: 34 – a) EPDM mit löslichen Bestandteilen, b) Reinigung der Oberfläche mit zu wenig Aceton, c) lokale Anreicherung von Rückständen, d) ungleichmäßige Lackhaftung.

Gegenmaßnahme

Verwendung von anderem Lösemittel mit höherem Siedepunkt: z.B. Ethanol (78 °C) oder Isopropanol (82 °C). Definition und Schulung eines einheitlichen Reinigungskonzepts (Wischtechnik, Beurteilungskriterien, Nutzungsdauer der Reinigungstücher). Zusätzlich lässt sich durch Bereitstellung von vorbereiteten lösemittelgetränkten Reinigungstüchern eine einheitlichere Reinigungswirkung von Mitarbeiter zu Mitarbeiter erzielen.

7.2.3 Durchführung der Reinigung

Eine ernstzunehmende Fehlerquelle stellt die Durchführung der Reinigung an sich selbst dar. Da der Boot einseitig verschlossen ist, kann nur vom Bootende her das Innere gereinigt werden. Durch die Gesamtlänge des Boots von über 730 mm lässt sich jedoch der gesamte Kopfbereich nur äußerst schwer mit der Hand erreichen (Abb. 35).

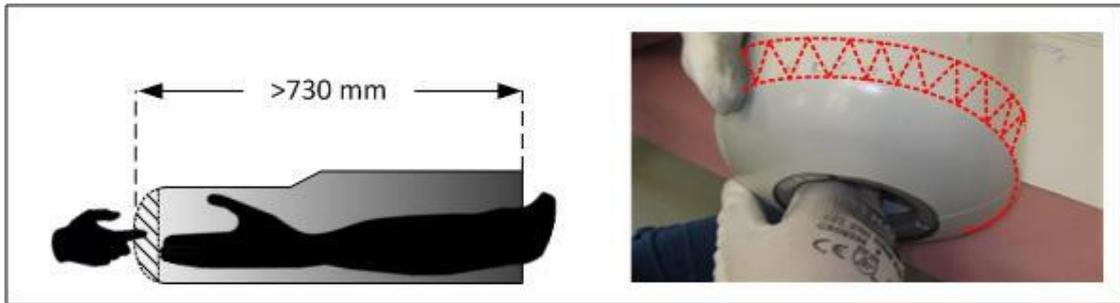


Abb.: 35 – Händische Reinigung der Boot Innen- und Außenseite. (Im rechten Bild ist ein lackierter Boot dargestellt, die Reinigung mit Aceton findet jedoch vor dem Lackieren am schwarzen Boot statt).

Durch die schmale Öffnung der Aluminiumkappe kann sehr gut der Übergang vom Aluminium zum EPDM gereinigt werden hingegen der Übergang zum zylindrischen Schaft, in Abbildung 35 rot markiert, von beiden Seiten nur sehr schwer erreicht wird. Dies führt dazu dass das Reinigungsergebnis sehr stark von Mitarbeiter zu Mitarbeiter schwanken kann.

In der Praxis wurde die Reinigung der Boots von zwei Mitarbeitern durchgeführt wobei ein Mitarbeiter sich um die Reinigung der Innenseite und der andere Mitarbeiter um die Reinigung der Außenseite gekümmert hat. Bei der Innenreinigung wurde der Boot zunächst trocken ausgewischt, anschließend wurde das Tuch auf 1/16 seiner ursprünglichen Größe gefaltet und dann mit Aceton getränkt (Abb. 36).

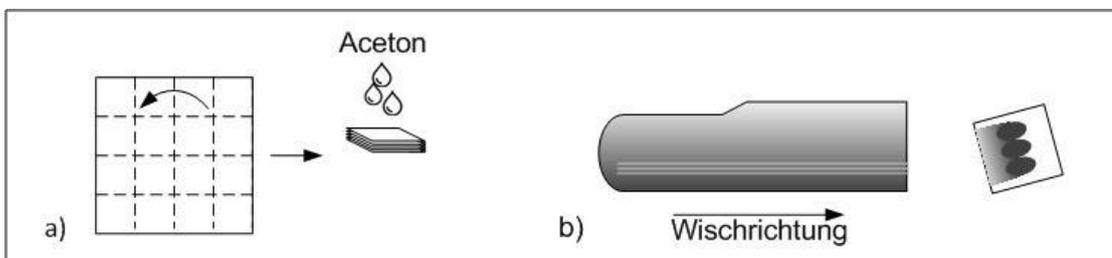


Abb.: 36 – Reinigung Bootinnenseite. a) Reinraumtuch wird gefaltet und mit Aceton getränkt, b) nach jedem Auswischen wird eine saubere Tuchseite nach oben gefaltet.

Bei einmaligem Auswischen verfärbt sich das Tuch tiefschwarz an den Stellen wo es mit den Fingern auf den Boot gedrückt wird. Im Schaft selbst bilden sich dabei weiße Schlieren im Bereich zwischen den Fingern wo der Anpressdruck geringer ist. Bei jedem Auswischen wird der Boot um wenige Zentimeter gedreht und eine saubere Tuchseite nach oben gefaltet. Zwischenzeitlich wird das Tuch wieder mit Aceton befeuchtet

Analog wird die Bootaußenseite vor der Nassreinigung mit einem trockenen Tuch äußerlich gereinigt. Dabei wurden zuerst der Bootkopf und dann die gesamte Außenseite mit einem Tuch abgewischt. Anschließend wurde das Tuch mit Aceton getränkt und dann von neuem zuerst der Bootkopf und dann

die Außenseite abgewischt. Zwischendurch wurde immer wieder frisches Aceton auf das verunreinigte Tuch gegeben und damit weitergewischt. Mit dieser Vorgehensweise wird ein Teil der Verschmutzungen entfernt, aber eine Verschleppung des Schmutzes von der Außen- auf die Innenseite kann so nicht ausgeschlossen werden (Abb. 37).

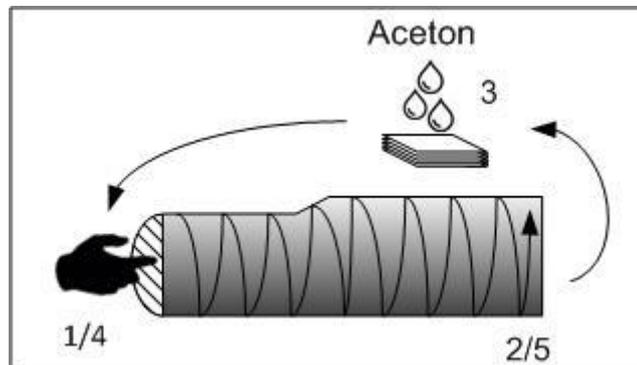


Abb.: 37 – Reinigung Bootaußenseite. 1) Trockenwischen Bootkopf, 2) Trockenwischen Außenseite, 3) Tuch mit Aceton tränken, 4) Auswischen Bootkopf, 5) Abwischen Außenseite.

Gegenmaßnahme

Kurzfristig sollte eine best-known-method (BKM) für die Reinigung der Boots eingeführt und die Mitarbeiter darin geschult werden. Des Weiteren sollte die Verwendung von Aceton als Reinigungsmittel hinterfragt werden. Durch geeignete Analytik ließen sich die Verschmutzungsbestandteile identifizieren und gegebenenfalls ein besser geeignetes Lösemittel bestimmen. Ebenso sollte die händische Reinigung durch technische Hilfsmittel, ähnlich der Schleifvorrichtung, unterstützt und messbare Kontrollkriterien wie Kontaktwinkelmessung eingeführt werden. Langfristig sollte jedoch eine Automatisierung dieses Prozesses angestrebt werden um etwaigen Prozessschwankungen entgegenzuwirken.

7.3 Prozessänderung beim Vorprimern

Das Aufbringen des Primers auf die Aluminiumkappe erfolgt händisch durch das offene Bootende. Dazu wird ein Pinsel an einer langen Stange befestigt und damit die Aluminiumkappe lackiert (Abb.38). Im Rahmen der Fertigungsbegehung fiel auf, dass entgegen der aktuellen Fertigungsanweisung (FEA-633-12112-0060-E02) nicht der gesamte Kopfbereich mit Primer bestrichen wurde, sondern nur noch das blanke Aluminium. Diese Änderung wurde noch nicht in die Fertigungsanweisung eingepflegt sondern war Bestandteil eines gesonderten Arbeitsauftrags.

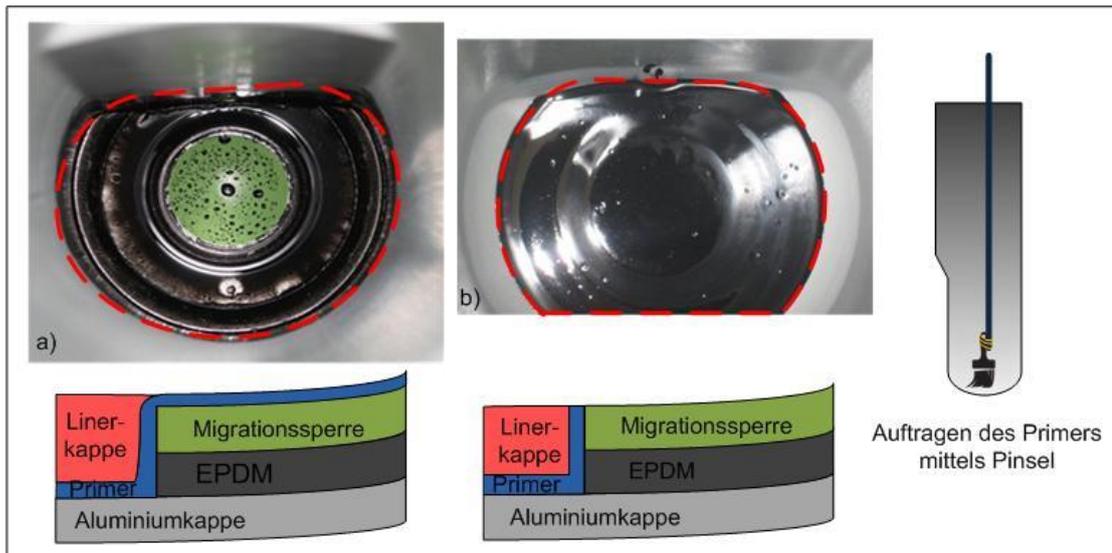


Abb.: 38 – Unterschiede beim Auftragen des Primers: a) gesamter Kopfbereich aus Aluminium und EPDM wurden geprimert; b) nur der Bereich der Aluminiumkappe wurde geprimert (Bild zeigt gegossene Liner-kappe).

Mit der Änderung in diesem Prozessschritt ergeben sich mögliche Fehlerquellen in den Folgeprozessen ‚Liner-kappe gießen‘ und ‚Primern und Ablüften‘ (Abb. 39).

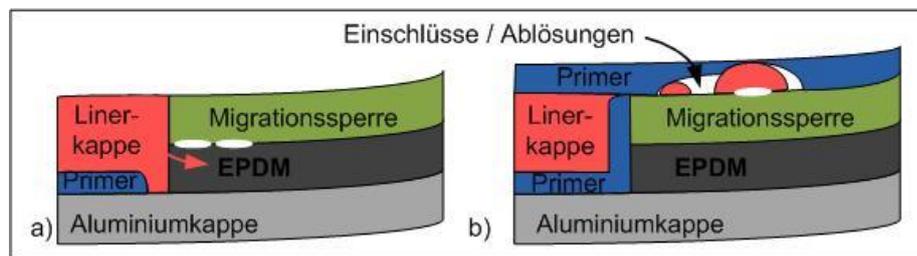


Abb.: 39 – Fehlermechanismen durch die Prozessänderung: a) der Primer deckt das Aluminium nicht vollständig ab, Lösemittel aus der Liner-kappe diffundieren in das EPDM; b) Spritzer und Tropfen von der Liner-kappe verursachen Ablösungen der Primerschicht.

Vor dem Guss der Liner-kappe fielen einige Boats auf bei denen das Aluminium nicht vollständig mit Primer bedeckt war. Dies passiert vor allem dadurch, dass der Primer an manchen Stellen auf dem Aluminium wieder zusammenläuft, was von den Fertigungsmitarbeitern durch nachlackieren mit Primer stellenweise behoben wird. Beim Guss der Liner-kappe kann es daher passieren, dass die Polymermischung an manchen Stellen auf blankes Aluminium gegossen wird (Abb. 39a), wie es bei der Produktionsbegehung bei einem einzelnen Boot beobachtet wurde. Des Weiteren kann es durch diese Prozessänderung passieren, dass beim Guss der Liner-kappe Tropfen und Fäden der Polymermischung durch elektrostatische Aufladung abgelenkt werden und sich auf ungeprimerten Stellen im Boot niederschlagen. Da die Haftung der Tropfen auf der Migrationssperre unklar ist, könnte es später an diesen Stellen zu Ablösungen oder Spannungen kommen.

Entsprechend des Prozessablaufplans existieren keine formalen Kontrollen nach Vorprimern und Guss der Linerkappe; daher besteht hier ein erhöhtes Fehlerrisiko.

Gegenmaßnahmen

Einführung eines zusätzlichen Reinigungsschrittes bei der die Aluminiumoberfläche mit Ethanol oder einem anderen Lösemittel gereinigt wird bevor die Verschlusschraube eingesetzt wird. Da im vorausgegangenen Prozessschritt mit den Fingern durch die Aluminiumkappe gegriffen wird (Abb. 35), besteht das Risiko dass sich Fett oder Ölrückstände über die Handschuhe von einem zum anderen Boot verbreiten.

Des Weiteren ist eine vollständige Lackierung des EPDM mit der Migrationssperre im Kopfbereich, wie unter 7.1.1 vorgeschlagen, unabdingbar. Durch den Guss der Linerkappe wird eine größere Menge Xylol eingeführt welche während der Aushärtephase der Linerkappe in das EPDM diffundieren kann.

Um das Risiko von Spritzern und Fäden von der Linerkappe auf der Migrationssperre zu verhindern, sollte wieder der gesamte Kopfbereich vorgeprimert werden.

8. Handlungsempfehlungen

Bei der Begleitung der Fertigungsprozesse fielen deutlich die vielen prozesstechnischen Änderungen in der jüngsten Zeit auf. Infolge der Ablösungen Anfang 2017 wurden bereits zahlreiche Fertigungsdokumente im Zeitraum Juli bis September 2017 überarbeitet, dennoch fanden sich weiterhin einige Abweichungen von den kürzlich überarbeiteten Fertigungsanweisungen.

Aufgrund strenger Vorgaben bei der Spezifikation des Gasgenerators sind grundlegende Änderungen der Einsatzstoffe oder veränderte Zusammensetzungen (bsp. Primer Verdünnung, Linerkappe Polymer) nicht möglich. Basierend auf dem vorliegenden Gasgeneratorsystem ließen sich dennoch durch prozesstechnische und organisatorische Maßnahmen die Fertigungsprozesse weiter stabilisieren und potentielle Fehlerquellen eliminieren.

8.1 Prozesstechnische Maßnahmen

Zahlreiche fehlerfrei gefertigte Gasgeneratoren bezeugen, dass der bestehende Fertigungsprozess, so wie er in Kapitel 5 beschrieben ist,

funktioniert. Prozessschwankungen in den einzelnen Fertigungsschritten haben jedoch das Potential die komplette Charge zu ruinieren, oder zumindest die Qualität der restlichen Gasgeneratoren infrage zu stellen. Durch geeignete prozesstechnische Maßnahmen lassen sich die Streuung von Charge zu Charge und innerhalb einzelner Chargen reduzieren.

8.1.1 Festlegung der Prozessfenster

Fertigungsanweisungen sind ein lebendiges Dokument und bedürfen einem regelmäßigen Abgleich mit der aktuellen Fertigungssituation. Neue Maschinen, steigende oder sinkende Produktionszahlen aber auch der Gewinn neuer Erkenntnisse erfordern häufig eine Anpassung der Fertigungsanweisung. Die jüngsten Fertigungsanweisungen in Tabelle 1 sind gerade wenige Monate alt wohingegen die ältesten Dokumente vor einigen Jahren zuletzt aktualisiert worden sind.

Ein großes Problem in vielen Fertigungen ist, dass solange in der Produktion kein kostspieliger Fehler oder kein Schadensereignis auftritt, wird der gegenwärtige Zustand nicht hinterfragt.

Viele stabile Fertigungen bewegen sich in mehr oder weniger breiten Prozessfenstern, in denen die Prozesse schwanken können, ohne dass die Qualität darunter leidet. Bewusste Prozessänderungen wie Erhöhung des Durchsatzes, Änderung der Losgröße, Einführen neuer Arbeitsschritte erfolgen meist schrittweise was es ermöglicht sich an die Grenzen der Prozessfenster heranzutasten. Abbildung 40 zeigt exemplarisch innerhalb welches Prozessfensters die Produktionskapazität bedenkenlos erhöht oder erniedrigt werden kann. In dem Beispiel lässt sich die Produktionskapazität zwischen fünf und acht Stück variieren, würde jedoch die Herstellung eines neunten Stückes eingeplant, wird die obere Prozessgrenze des Parameters y überschritten. Das Überschreiten dieser Prozessgrenze führt im besten Falle nur zum Verwurf des neunten Stückes, kann aber im ungünstigsten Fall auch zum Verwurf aller zuvor gefertigten acht Stück führen.

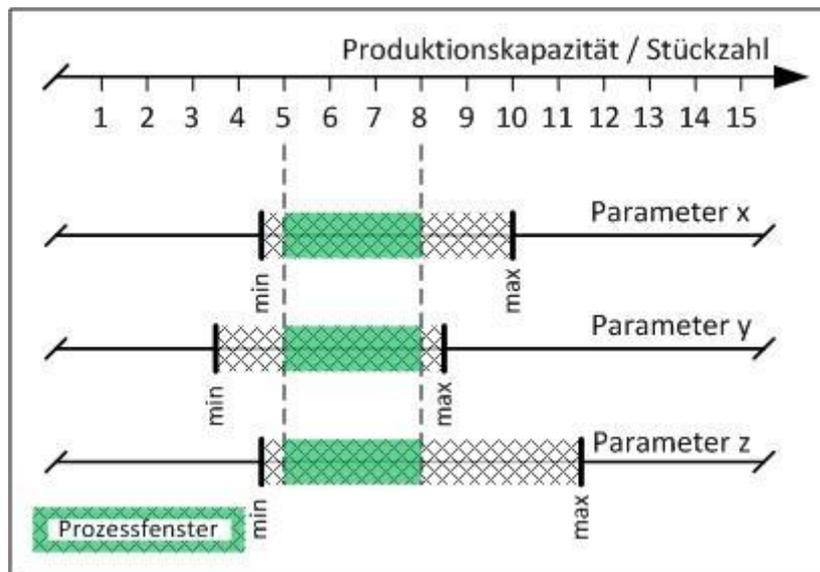


Abb.: 40 – Darstellung des stabilen Prozessfensters in Abhängigkeit der Stückzahl.

Nur durch Kenntnis aller Prozessgrenzen kann eine Produktion stabil gefahren und Bottlenecks erkannt werden. Bei der Analyse der Fertigungsanweisungen und Fertigungsprüfvorschriften (Tab. 1) fiel besonders auf, dass einige Dokumente sehr genau die Prozessgrenzen vorschreiben, hingegen bei anderen Dokumenten nur ungefähre Angaben gemacht und Prozesse anhand subjektiver Bewertungsmaßstäbe beurteilt werden. In Tabelle 3 sind die Fertigungsanweisungen und die jeweiligen Tätigkeiten aufgelistet, welche in ihrer aktuellen Form zu viele Freiheiten für Prozessvariationen lassen.

Tab.: 3 – Festlegung der Prozessfenster in den Fertigungsanweisungen.

Dokument Nr. / Titel	Arbeitsgangbeschreibung	Verbesserung
FEA-633-13117-0010-A02 Reinigen, Ablüften Boot	<p>5.1 Reinigen Boot</p> <p><i>[...] Boot innen und außen mit einem acetongetränktem Tuch reinigen [...]</i></p>	<p>Detaillierte Beschreibung der Reinigungsprozedur.</p> <p>Bereitstellung lösemittelgetränkter Tücher.</p> <p>Messbare Kriterien für korrekte Bootreinigung (bsp. Kontaktwinkel-messung).</p>

<p>FEA-633-13117-0030-A00 Lackieren Boot</p>	<p>5.2 Lack vorbereiten und Musterblech herstellen</p> <p><i>[...] Die Verdünnermenge liegt im Bereich von ca. 5 % (280 – 290 g) des Lack-Gesamtgewichts[...]</i></p> <p><i>[...]Bei gravierenden Unterschieden, z.B. in den Punkten Deckfähigkeit, Glanz, Farbe ist Rücksprache mit einem Chemiker/-in oder einer technisch verantwortlichen Person erforderlich</i></p>	<p>Die Zugabe von 280 – 290 g entsprechen tatsächlich fast 7 %. Am besten eine der Angaben entfernen um Fehlinterpretationen zu verhindern.</p> <p>Mitarbeiter nutzen eigene Maßstäbe zur Beurteilung. Besser Kontrolle mittels Farbkarten für Farbunterschiede etc.</p> <p>Verantwortliche Person(en) einschränken und namentlich definieren.</p>
<p>FEA-633-12112-0012-A00 Lack aufräumen</p>	<p>5.4 Schleifstaub und Abrieb des Vlieses mit Stickstoff abblasen.</p>	<p>Angabe darüber welchen Druck der Stickstoff haben soll. In der Praxis wurde dafür der Druck von 2-3 bar auf 5-6 bar erhöht.</p>
<p>FEA-633-12112-0060-E02 Linerkappe Giessen und Härten</p>	<p>5.2 Primer mindestens 2 h bei 18-25 °C und einer maximalen Luftfeuchtigkeit von 7 g Wasser / kg Luft im Abzug ablüften lassen.</p>	<p>Angabe über minimale und maximale Ablüftdauer.</p>
	<p>5.6 Vorportionierte Menge Liner (ca. 100 g) in den Boot gießen.</p>	<p>Angabe über minimale und maximale Menge Liner.</p>
	<p>5.9 Liner nach Vorgabe (15 h) bei RT aushärten lassen</p>	<p>Angabe über minimale und maximale Dauer zum Aushärten.</p>
<p>FEA-633-12112-0065-A00 Primern und Ablüften (Boot)</p>	<p>5.1 [...] Rührwerk einschalten und bei niedriger Drehzahl laufen lassen[...]</p> <p><i>[...]Spritzbild mit Hilfe eines Weißblecheimers überprüfen [...]</i></p>	<p>Aufgrund sedimentierbarer Bestandteile sollte eine genaue Drehzahleinstellung und messbare Kriterien zur Einstellung der Düse vorgegeben sein (Massenstrom, Breite Sprühstrahl etc.)</p>

FEA-633-12112-0065-A00 Primern und Ablüften (Boot	5.4 [...] <i>Spritzbild des Boots überprüfen. Falls erforderlich ist die Einstellung anzupassen [...]</i>	Subjektiver Bewertungsmaßstab. Durch zusätzliche Massenbestimmung des aufgespritzten Primer erhält man mehr Prozesssicherheit. Es sollte zudem genau definiert werden welche Einstellungen angepasst werden dürfen (Druck, Rastpunkte, Anzahl Hübe)
	5.7 <i>Sichtkontrolle: Oberfläche nach dem Ablüften mattgrau. Innenfläche auf Verunreinigungen, primerfreie Stellen und Ablösungen (abblättern) durchführen, gegebenenfalls mit Primer dünn nachpinseln</i>	Angabe darüber treffen ob nachgearbeitete Boots nochmals im Vakuum ausgasen müssen.
	5.8 <i>Gießrohr mit Boot mit Papier (Blaupapier) abdecken. (Schutz gegen Umwelteinflüsse wie Staub usw.) sofern nicht unmittelbar danach der nächste Arbeitsschritt durchgeführt wird.</i>	Genauere Angaben nennen ab welcher voraussichtlichen Standzeit die Boots abgedeckt werden müssen und wo und unter welchen Bedingungen die Lagerung stattfinden soll.
FEA-633-12112-0110-C02 Aufheizen Gießvorrichtung mit Boot	5.2 <i>Temperatur: 60±2 °C einstellen; Dauer: >20 h. [...]</i>	Angabe machen über die minimale und maximale Temperierdauer
FEA-633-12112-0120-D02 Fertigungsanweisung Gießen und Verdränger setzen	5.1 <i>Überprüfung Lagerzeit der Boots geprimert (max. Lagerzeit beachten.</i>	Wie ist die maximale Lagerzeit definiert und welcher Prozesszeitpunkt kennzeichnet den Anfang und das Ende der Lagerzeit.

FEA-633-12112-0120-D02 Fertigungsanweisung Gießen und Verdränger setzen	5.6 [...] <i>Gießzeit mind.2 min pro Boot [...]</i>	Angabe machen über minimale und maximale Gießdauer oder die Klappenstellung
	5.12 <i>Verdränger in der Verdrängersetzvorrichtung auf Anschlag eindrücken (Kraft, (Druck) und Ablauf während des Eindrückprozesses überwachen)</i>	Angaben machen über den Druck mit dem der Verdränger gesetzt werden soll.

Die Fertigungsprüfvorschriften, nach denen sich die Fertigungsanweisungen richten, wurden ebenfalls überprüft und weisen ähnliche Schwachstellen auf (Tab. 4).

Tab.: 4 – Festlegung der Prozessfenster in den Fertigungsprüfvorschriften.

Dokument Nr. / Titel	Arbeitsgangbeschreibung	Verbesserung
FPV-633-13117-0000-A02 Boot lackiert ausgeheizt	4.3 <i>Reinigung und Ausheizen</i> [...] <i>Boot innen und außen mit einem Aceton getränktem Tuch reinigen [...]</i> <i>Den gereinigten Boot auf einer sauberen Unterlage für mindestens 15 Minuten ablüften lassen.</i>	Detaillierte Beschreibung der Reinigungsprozedur. Bereitstellung Löse-mittel getränkter Tücher. Messbare Kriterien für korrekte Bootreinigung (bsp. Kontaktwinkel-messung/ Teststift). Angaben machen unter welchen Bedingungen (Temperatur und Luftfeuchte) bei denen der Boot ablüften soll.
FPV-633-13117-0000-A02 Boot lackiert ausgeheizt	4.4.2 <i>Musterblech herstellen</i> [...] <i>Bei gravierenden Unterschieden, z.B. in den Punkten Deckfähigkeit, Glanz, Farbe ist Rücksprache mit einem Chemiker/-in oder einer technisch verantwortlichen Person notwendig [...]</i>	Jeder Mitarbeiter kann die Bezeichnung "gravierend" anders interpretieren. Besser Kontrolle mittels Farbkarten für Farbunterschiede etc. Verantwortliche Person(en) genau definieren.

FPV-633-12112-000-H01 GG Grain Live	2.4 Arbeitsmittel <i>[...] saubere und fusselfreie Reinigungstücher [...]</i>	Das Arbeitsmittel sollte genau definiert werden, hier TX 609 Reinigungstuch
	4.1.3 Primern <i>[...]Ablüftdauer mind. 2 Stunden bei 18-25 °C und einer Luftfeuchte von 3-7 g Wasser/kg Luft. [...] Boots müssen feuchtigkeitsgeschützt verpackt werden, sofern nicht unmittelbar der nächste Arbeitsschritt erfolgt.</i>	Genaue Angabe machen wie lange der Boot maximal auslüften darf. Genaue Angabe ab wann der Boot gegen Feuchtigkeit geschützt werden muss und bis wann spätestens der nächste Arbeitsschritt erfolgen muss.
	4.1.4 Guss Linerkappe <i>IPB 669 wird in definierter Menge (ca. 100 g) in die Bootkappe gegossen [...]</i> <i>[.]Die Endhärtung erfolgt bei RT innerhalb von 15 Stunden. [...]</i>	Genaue Angabe (100 ± X g) machen wieviel IPB 669 eingefüllt werden darf. Angabe darüber wie lange die Aushärtung der Linerkappe maximal dauern darf.
	4.2 TS-Guss <i>[...] Gießzeit pro Boot: mind. 2 Minuten [...]</i>	Angabe eines min. und max. Zeitfensters innerhalb dessen der Boot gegossen sein muss.
	4.4 Härtung <i>[...] Eine gleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb des Härteofens muss gewährleistet sein [...]</i>	Angabe darüber machen wie eine gleichmäßige Temperaturverteilung definiert ist (± X °C) und wie der Mitarbeiter diese erreichen kann bsp. genau definierte Plätze im Härteofen wo die Paletten stehen müssen.
	4.5 Entformen und Endbearbeitung <i>[...] Bei Bedarf wird die freiliegende Treibstoffoberfläche mittels geeigneter Werkzeuge geglättet [...]</i>	Angabe von Kriterien wann die Oberfläche geglättet werden soll und welche Werkzeuge dafür verwendet werden dürfen.

8.1.2 Prozesse automatisieren

Eine der größten Schwächen der händischen Serienproduktion stellt die Wiederholgenauigkeit der einzelnen Arbeitsschritte dar. Insbesondere bei Tätigkeiten die Übung oder Geschick erfordern, hängt das Ergebnis von der Erfahrung des Arbeiters ab und am Beispiel der Bootreinigung sogar von seiner Armlänge. Um Prozessschwankungen bei kritischen Produktionsschritten zu eliminieren müssen solche Prozesse automatisiert werden. Einzelne Prozesse, wie das Primern mittels Sprühautomaten, werden von der Bayern Chemie bereits automatisiert ausgeführt. Jedoch basieren die Prozessparameter und Qualitätskontrollen bei diesem Fertigungsschritt weitestgehend auf Erfahrungswerten was den Nutzen der Automatisierung wieder etwas schmälert.

Für eine robustere Fertigung mit geringerer Streuung zwischen den einzelnen Boots und Chargen empfiehlt es sich vor allem die Prozesse zu automatisieren, die einer großen Streuung unterliegen und einen direkten Einfluss auf die Haftung der Migrationssperre und des Primers haben (Tab. 5).

Neben der Automatisierung, um Prozessschwankungen zu reduzieren, müssen auch geeignete Kontrollgrößen eingeführt werden die der Prozesskontrolle dienen und verhindern sollen, dass sich die Mitarbeiter von der Tätigkeit mental isolieren (Norman, 1990, S. 138). Norman empfiehlt Feedbackmechanismen einzusetzen, welche dem Fertigungsmitarbeiter kontinuierlich Auskunft über die Stabilität des Prozesses geben und entsprechend signalisieren wann ein Eingreifen in den Prozess erforderlich wird.

Tab.: 5 – Übersicht der Prozesse welche automatisiert werden sollten und empfohlene Kontrollparameter.

Tätigkeit	Möglichkeit zur Automatisierung	Kontrollparameter
Reinigen der Boots vor Lackieren	Automatisierte Reinigung der Boots mittels Tenside und Schleifkörpern (wird aktuell von der Bayern Chemie untersucht)	Kontaktwinkel-messung,
	O ₂ -Plasmabehandlung zur Entfernung organischer Rückstände und Funktionalisierung des EPDM	
Lackieren der Boots mit Decklack	Automatisierter Lackierprozess (wird aktuell von der Bayern Chemie untersucht)	Masse feuchter Lack
	Tauchlackierung für gleichmäßiges Lackieren der Innen- und Außenseite	

Aufräumen des Lacks	O2-Plasmabehandlung zur Entfernung organischer Rückstände und Funktionalisierung der Migrationssperre.	Kontaktwinkel-messung,
Auftragen des Primers mittels Sprühautomat	Sprühautomat (wird bereits von der Bayern Chemie eingesetzt)	Massenstrom Primer, Massenzunahme des Boot nach Primern, genaue Messung des Sprühbildes

Am Beispiel eines automatisierten Lackierprozesses mittels Tauchbecken könnte ein Qualitätskriterium die Masse feuchter Lack auf dem Boot sein. Da mit fortschreitender Zeit der Zwei-Komponenten Lack durchreagiert und sich seine Viskosität erhöht, ist zu erwarten, dass die Migrationssperre mit jedem weiterem Boot immer dicker wird. Anhand der Masse des feuchten Lacks ließe sich zurückschließen wie weit der Lack bereits durchreagiert ist und wann ein Neuansatz erforderlich wird. Über diesen Feedbackmechanismus ließen sich auch Prozessschwankungen erkennen wie sie zum Beispiel durch Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen bei Wetteränderungen auftreten, was zu einer beschleunigten oder verlangsamten Aushärtung des Lacks führen kann. Durch einen automatisierten Lackierprozess und klar definierten Prozessgrenzen lassen sich gleichbleibend homogene Lackschichten erzeugen und die Prozessschwankungen zwischen den einzelnen Chargen weitestgehend reduzieren.

8.2 Organisatorische Maßnahmen

Mit den aufgeführten prozesstechnischen Änderungen, welche direkt und unmittelbar auf den Fertigungsprozess wirken, lässt sich der status quo optimieren. Dieser optimale Zustand hält aber nur solange an bis sich der aktuelle Fertigungsprozess durch schleichende Veränderungen und Verbesserungen soweit vom ursprünglichen Prozess entfernt hat, dass diese Maßnahmen nicht mehr relevant sind.

Eine langfristig optimale Fertigungsstruktur kann durch organisatorische Maßnahmen unterstützt werden wie sie in Produktionssystemen wie das Toyota-System, 5S, Lean-Management, Six-Sigma etc. verwendet werden. Die Inhalte dieser Produktionssysteme ähneln sich in weiten Bereichen, haben ihren Fokus aber auf unterschiedliche Schwerpunkte (Verschwendung reduzieren, Qualität steigern, Innovationsgrad erhöhen...) gerichtet und unterscheiden sich bei der Einführung in ihren Kosten und dem zeitlichen und personellen Aufwand.

Im Rahmen der einzelnen Fertigungsbegehungen fielen vermehrt die folgenden organisatorischen Schwachstellen auf, die sich jedoch mit geringem Aufwand zeitnah beseitigen lassen:

- zu lange Kommunikationswege
- unklare Verantwortlichkeiten
- Abweichungen vom vorgeschriebenen Prozess

Eine Besonderheit der Bayern Chemie ist, dass abwechselnd neben Gasgeneratoren, noch andere Feststoffantriebe in mittleren Stückzahlen gefertigt werden. Die überwiegend händische Produktion der verschiedenen Antriebe erfordert daher viel Geschick und Erfahrung der verantwortlichen Fertigungsmitarbeiter.

Die folgenden organisatorischen Maßnahmen haben den Zweck die Flexibilität und das Know-How der Bayern Chemie zu wahren, jedoch den Fertigungsprozess zu stabilisieren und sensibler gegenüber Störgrößen zu machen.

8.2.1 Informationsfluss erhöhen durch geringere Transferkosten

Der unter 2.2.1 beschriebene Wissenstransfer nach dem SECI-Modell findet sich in abgewandelter Form auch in dieser Produktion wieder (Abb. 41). Neben dem formalen Informationsfluss gibt es verständlicherweise einen informellen Informationsfluss welcher sich je nach Situation und den beteiligten Personen ergibt.

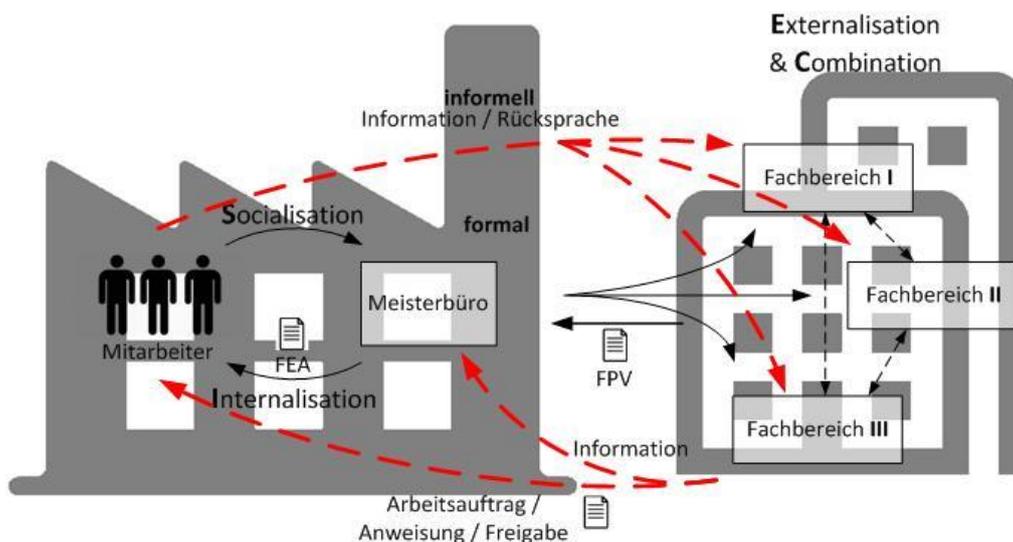


Abb.: 41 – Formaler (schwarz) und informeller (rot) Wissenstransfer.

Formaler Informationsfluss

Werden Unregelmäßigkeiten bei den Fertigungsprozessen beobachtet oder fallen den Fertigungsmitarbeitern Optimierungsmöglichkeiten auf, kommunizieren die Arbeiter dies an das Meisterbüro (Sozialisierung). Die Meister entscheiden dann welcher Fachbereich (Chemie, Technik, Konstruktion) dafür verantwortlich ist und leiten die Information entsprechend weiter. Der verantwortliche Fachbereich bewertet dann diese Information anhand von Vorkenntnissen, Daten, Fakten etc. (Externalisierung), bespricht sich gegebenenfalls mit anderen Fachbereichen (Kombination) und trifft dann eine Entscheidung welche an die Fertigungsmeister kommuniziert wird. Die Fertigungsmeister führen daraufhin dann eine Änderung der Fertigungsanweisung durch oder erstellen einen Arbeitsauftrag (Internalisierung).

Nachteilig an dem formalen Informationsfluss ist, dass das Meisterbüro nur als Vermittler zwischen den Fertigungsmitarbeitern und den Fachbereichen fungiert und damit zusätzliche Transferkosten entstehen. Hier wird die Kommunikationskette unnötig verlängert und Entscheidungen verzögert. Des Weiteren können durch das mehrmalige Weiterleiten von Informationen Details vergessen oder übersehen und Rückfragen nicht beantwortet werden.

Besonders nachteilig am Wissenstransfer ist, dass die Qualität der Beziehung zwischen Sender und Empfänger einen starken Einfluss auf die Informationen hat, die geteilt werden (Karanges et al., 2015, S. 129-130). So werden positive Nachrichten von Mitarbeitern gerne übermittelt. Bei der Übermittlung von negativen Nachrichten entscheidet jedes Mal die Beziehung zwischen Sender und Empfänger wie detailliert oder geschönt diese Informationen weitergegeben werden.

Informeller Informationsfluss

Aufgrund ihrer Erfahrung können die Fertigungsmitarbeiter gewisse Probleme selbst einschätzen und kommunizieren diese eigenständig an die entsprechenden Personen der Fachbereiche weiter. Hier spielen vor allem Faktoren wie Dringlichkeit, Erreichbarkeit und Entscheidungsbefugnis der Personen eine wichtige Rolle. Die Entscheidung des Fachbereichs wird dann direkt an den Fertigungsmitarbeiter mitgeteilt und das Meisterbüro darüber in Kenntnis gesetzt.

Wie man in Abbildung 41 erkennen kann, optimieren die Mitarbeiter die Informationskette selbstständig indem sie sich gleich an die entscheidungsrelevanten Personen wenden und dadurch sehr schnell eine Entscheidung erhalten. Die **Transferkosten** zum Wissensaustausch werden auf ein Minimum reduziert und erleichtern es mehr Informationen zu teilen. Insbesondere bei sich schnell entwickelnden Prozessen die vielen

Änderungen unterliegen und nicht ohne weiteres standardisiert werden können, ist ein zügiger und ungehinderter Wissenstransfer notwendig (Siemens et al., 2009, S. 429-430). Bei der Übermittlung von schlechten Nachrichten spielt die Sender-Empfänger Beziehung weiterhin eine Schlüsselrolle, wird aber durch die kürzeren Kommunikationswege, durch den Wegfall der Mittelsmänner, weniger gefiltert.

Räumliche Barrieren

Neben zu langen Kommunikationswegen über Mittelsmänner spielt auch die räumliche Trennung zwischen Fertigung und Prozessverantwortlichen eine wesentliche Rolle (Dickmann, 2007, S. 78-79). Im Falle der Bayern Chemie liegen das Fertigungsgebäude und das Gebäude der Fachabteilung mehrere hundert Meter voneinander entfernt, was wie ein zusätzlicher Informationsfilter fungiert. Prozessanomalitäten werden unter Umständen nicht kommuniziert weil der Aufwand dafür zu groß erscheint oder deren Relevanz nicht zu Genüge bekannt ist. Durch Eliminierung der räumlichen Trennung sinken die Transferkosten für die Übermittlung der Informationen, so dass auch vermehrt unscheinbare Prozessanomalitäten kommuniziert werden.

8.2.2 Klare Verantwortlichkeiten schaffen

Laut Saraph, Benson & Schroeder (1989, S. 818) sind entscheidende Faktoren des Prozessmanagement klare Verantwortlichkeiten und eindeutige Grenzen wo diese Verantwortlichkeit endet. Eine geteilte Verantwortung für den Gesamtprozess ist genauso schädlich wie eine gänzlich fehlende und bewirkt, dass im Ernstfall gar nicht oder zu spät eine Entscheidung getroffen wird (Norman, 1990, S. 587).

Erfahrungsgemäß sind Produktionsfehler häufig die Summe kleinerer, schleichender Prozessabweichungen, welche sich gegenseitig beeinflussen. Aufgrund der vielen Teilaufgaben und unterschiedlichen Zuständigkeiten, wie in Abbildung 28 und 41 aufgeführt, kann es passieren, dass prozessrelevante Informationen an verschiedene Verantwortliche gemeldet, diese aber nicht zeitnah zusammengeführt werden.

Im Falle der Bayern Chemie sind die Bereiche chemische Entwicklung und Produktion klar voneinander getrennt. Dies hat zur Folge, dass Prozessänderungen seitens der Entwicklung zum Teil nicht optimal fertigungsnah entwickelt werden, oder Verbesserungen von der Produktion nicht qualitätskonform sind.

Solche Umstände können dazu führen, dass Prozesse und Kapazitäten nicht optimal eingesetzt werden, und bei Prozessfehlern die Ursache nicht eindeutig geklärt werden kann. Durch Schaffung eines verantwortlichen Bindegliedes,

welches die Fähigkeiten und Anforderungen von Produktion und Entwicklung kennt, würden sich solche Diskrepanzen im Vorfeld eliminieren lassen. Ein Verfahrens- oder Chemietechniker könnte eine solche Schnittstelle darstellen, und damit als Dolmetscher zwischen Produktion und Entwicklung fungieren (Abb. 42). Fragestellungen aus der Produktion können dadurch schneller beantwortet, und die Anforderungen der Entwicklung gezielter umgesetzt werden.



Abb.: 42 – Verfahrens- oder Chemietechnik als Bindeglied zwischen Entwicklung und Produktion.

Die Verfahrenstechnik besitzt Detailwissen über die verfügbaren Anlagen und Maschinen und deren Fähigkeiten, als auch über das Fachwissen der Entwicklung in Bezug auf Prozessgrenzen und tolerierbare Abweichungen.

Durch die eindeutige Kennzeichnung des Prozessverantwortlichen besteht somit unmissverständlich Klarheit darüber, an welcher Stelle die Informationen zusammenlaufen müssen. Es ist damit die Aufgabe des Prozessverantwortlichen, diese Informationen zu bewerten, und sich mit den entsprechenden Fachbereichen abzustimmen. Dieser Prozessverantwortliche muss dann die entsprechenden Gegenmaßnahmen einleiten, und deren Erfolg kontrollieren. Im Schadensfall ist diese Schnittstelle auch automatisch der erste Anlaufpunkt um Fehleranalysen durchzuführen und Prozessabweichungen nachzuverfolgen.

8.2.3 Einhaltung und Pflege der Fertigungsprozesse

Die ständige Weiterentwicklung und Optimierung von Fertigungsprozessen ist ein essentieller Bestandteil von Produktionssystemen. Die beobachteten Abweichungen aus Tabelle 2 zeigen deutlich wie die Fertigungsmitarbeiter auf Probleme reagieren und selbstständig Lösungen entwickelt haben. Solche eigenständigen Abweichungen tragen im Allgemeinen zur Weiterentwicklung von Prozessen bei, jedoch bedarf es einer konsequenten Nachverfolgung und Dokumentation in den Arbeitsanweisungen.

Neben einer lückenlosen Dokumentation der Fertigungsprozesse muss jedoch auch ein Abgleich mit den übrigen Fertigungsdokumenten stattfinden und regelmäßige Kontrollen über deren korrekte Umsetzung erfolgen.

So wird in der Fertigungslaufkarte FLK-633-12112-0000-F02 nach dem Anschleifen des Lacks, die Reinigung aller Boots mit Isopropanol im Bereich des Stützrings vorgeschrieben. Die für diese Arbeit entsprechende Fertigungsanweisung FEA-633-12112-0012-A00 schreibt jedoch nur die Nassreinigung von verunreinigten Boots mit Aceton vor. In der Praxis wurde hingegen der Mittelweg beobachtet bei dem jeder Boot im Bereich des Stützzylinders mit Aceton ausgewischt wird.

Ähnliche Abweichungen vom vorgeschriebenen Prozess, ohne dass diese dokumentiert werden, wurden bei der Reinigung der Boots, Lackieren, Aufrauhern und Primern beobachtet wobei die treibende Kraft für diese Änderungen sowohl von den Fachabteilungen als auch von den Fertigungsmitarbeitern ausgingen. Aufgrund solcher Diskrepanzen lässt sich die Schuldfrage bei Produktionsfehlern nicht zweifelsfrei klären und erschwert die Fehlersuche.

Als organisatorische Maßnahme müssen sowohl die Fertigungsprozesse genauer kontrolliert werden um ein schleichendes Abweichen vom vorgeschriebenen Prozess frühzeitig zu erkennen. Genauso müssen aber auch alle fertigungsrelevanten Dokumente auf Stimmigkeit kontrolliert und auf Durchführbarkeit überprüft werden.

9. Kritische Betrachtung der Ergebnisse

Es muss berücksichtigt werden, dass es sich bei den im Kapitel 6 gemachten Beobachtungen um Momentaufnahmen der betrachteten Prozesse handelt. Bei den beobachteten Abweichungen vom vorgeschriebenen Prozess, ist es durchaus möglich, dass es sich lediglich um das Verhalten weniger Mitarbeiter handelt. Verlässlichere Aussagen über die Umsetzung der Arbeitsvorschriften, ließen sich durch ein längeres Monitoring der einzelnen Arbeitsschritte treffen. Idealerweise sollte das Monitoring unterschiedliche Mitarbeiter umfassen um das Ergebnis nicht durch individuelle Stärken oder Schwächen zu verfälschen.

Durch eine erneute Betrachtung der Einzelprozesse, mit unterschiedlichen Mitarbeitern, könnten individuelle Verbesserungen und Ideen sämtlicher Mitarbeiter gesammelt werden. Anhand dieser Beobachtungen ließe sich dann ein optimierter Fertigungsprozess definieren und etwaige Fertigungsfehler aufdecken.

Wie im Kapitel 8.1.1 eingangs erwähnt, bedürfen Arbeitsanweisungen einer ständigen Aktualisierung. Ein Großteil aller Fertigungsanweisungen wurde infolge der Ablösungen Mitte 2017 überarbeitet. Die Korrekturen der Fertigungsanweisungen wurden in entsprechenden Änderungsanträgen festgehalten. In der Kürze der Zeit war es jedoch leider nicht möglich die Hintergründe sämtlicher Änderungen, insbesondere solche die nach den Ablösungen Anfang 2017 eingeführt wurden, nachzuvollziehen. Es wäre daher sinnvoll, würde man die hier konstruierten Fehlermechanismen auf die damaligen Fertigungsbedingungen anwenden, um nachträglich etwaige Fehlerbilder erklären oder ausschließen zu können. Dies gilt selbstverständlich nicht für die neu eingeführten Prozessschritte.

10. Zusammenfassung

Aufgrund von Treibstoffablösungen bei der Herstellung von Gasgeneratoren für Raketen mussten im Frühjahr 2017 zahlreiche Gasgeneratoren aus vier verschiedenen Chargen verworfen werden. Die Ablösungen fanden alle im Kopfbereich des Gasgenerators zwischen Migrationssperre und Primer statt, was auf eine schlechte Haftung innerhalb der Grenzschichten schließen lässt. Mit dem Ziel mögliche Schwachstellen in der Prozesskette zu identifizieren und die fehleranfälligen Prozessschritte zu optimieren wurden die einzelnen Fertigungsschritte im Rahmen eines Gemba-Walk begleitet.

Der hier beschriebene Gasgenerator besteht aus einer flexiblen Kartusche aus EPDM Polymer, auch bezeichnet als Boot, in dessen Spitze eine halbrunde Aluminiumkappe eingeklebt ist. Zum Schutz vor äußeren Einflüssen und zur Verhinderung von Weichmacherdiffusion wird der Boot beidseitig mit einer Migrationssperre auf Polyurethanbasis lackiert. Die Aluminiumkappe wird auf der Innenseite mit einer Polymermischung vergossen welche die Linerkappe bildet. Diese bildet die physische Abgrenzung des Treibstoffs von der Aluminiumkappe. Zur besseren Haftung des Treibstoffs kommt auf die Migrationssperre im Inneren des Boots eine Grundierung mit Primer, der als Haftvermittler fungiert. Erst dann wird der Treibstoff in die Boots gegossen und mehrere Tage aushärten gelassen.

Als kritische Prozessschritte welche eine Ablösung des Treibstoffes begünstigen werden vor allem das Aufbringen der Migrationssperre und des Haftvermittlers, sowie die entsprechenden Vorprozesse angesehen.

Bei der Analyse der Fertigungsanweisungen fielen besonders die subjektiven Beurteilungskriterien auf nach denen die Boots regelmäßig kontrolliert werden und welche von Mitarbeiter zu Mitarbeiter anders gewertet werden können. Des Weiteren fehlen in einigen Fertigungsanweisungen genaue Grenzwerte innerhalb derer die Produktion schwanken darf. Die Fertigung das

Gasgeneratoren erfolgt überwiegend händisch was viel handwerkliches Geschick und Erfahrung der Fertigungsmitarbeiter erfordert. Viele der Tätigkeiten am Gasgenerator werden immer von denselben Mitarbeitern erledigt, was zu einer gewissen Kontinuität beiträgt, birgt aber ein großes Risiko sobald neue Mitarbeiter diese Tätigkeit übernehmen.

In der Praxis zeigte sich, dass an einigen Stellen von den Fertigungsvorschriften abgewichen und Verbesserungen im Prozess eingeführt wurden. Diese Änderungen wurden nicht in den Begleitdokumenten des Fertigungsauftrags vermerkt, waren aber mit den Verantwortlichen abgesprochen worden.

Mit Hilfe der Fertigungsanweisungen und des Gemba-Walk ließen sich Prozesskombinationen erkennen welche zu Ablösungen in den besagten Bereichen führen können. Durch die breit gewählten Prozessfenster und ungenaue Angaben über maximale Standzeiten lassen sich Situationen konstruieren in denen Xylol, welches sowohl im Lack, Primer und Linerkappe enthalten ist, längere Zeit auf die Grenzschicht zwischen EPDM und Migrationssperre einwirken kann. Ein anderer Prozessschritt lässt sich nur von Mitarbeitern durchführen die lange Arme besitzen.

Als Lösungsansatz um weitere Ablösungen in der Zukunft zu verhindern und die Prozesskette weiter zu stabilisieren werden sowohl prozesstechnische als auch organisatorische Maßnahmen vorgeschlagen.

Aus prozesstechnischer Sicht müssten zunächst die Prozessgrenzen eindeutig definiert und Maßnahmen beschrieben werden was bei der Verletzung der Prozessgrenzen zu tun ist. Des Weiteren sollten, um die Prozessschwankungen zu reduzieren und den Durchsatz zu erhöhen, mehr Prozesse automatisiert und nach messbaren Kriterien beurteilt werden. Dazu werden bereits von der Entwicklungsabteilung Vorversuche innerhalb der Bayern Chemie unternommen.

Aus organisatorischer Sicht gilt es zunächst die Kommunikation zu den Fertigungsmitarbeitern zu intensivieren. In der Vergangenheit wurde dies durch den formalen Kommunikationsweg und die räumliche Trennung von Fertigung und Fachabteilung erschwert, was dazu führte dass Produktionsfehler erst sehr spät an die Fertigungsmitarbeiter kommuniziert wurden. Zudem sollte ein Prozessverantwortlicher definiert werden, der als einziger die Hauptverantwortung über die Produktion der Gasgeneratoren trägt. In der aktuell bestehenden Konstellation liegen die Fertigung und Entwicklung getrennt vor. Es fehlt die Schnittstelle die zuverlässig die Vorgaben aus der Entwicklung in prozesstaugliche Fertigungsschritte übersetzt und prozessrelevante Probleme selbst entscheidet. Abschließend sollte eine Kontrolle der fertigungsrelevanten Dokumente und ein Abgleich mit der Durchführung erfolgen. Es bestehen teilweise Diskrepanzen zwischen den

einzelnen Dokumenten, welche potentielle Fehlerquellen darstellen. Zudem wird an einigen Prozessschritten vom vorgeschriebenen Verfahren abgewichen ohne dass dies nachvollziehbar dokumentiert wird. Dies kann zu einem späteren Zeitpunkt die Fehlersuche erheblich erschweren oder gar unmöglich machen.

Literatur

Abdollahir, M., Farajpour, T., Bayat, Y., Keshavarz, M. (2016). Surface and Bulk Modification of Ethylene-Propylene-diene Terpolymer Elastomer: Adhesion to Polyurethane and Mechanical Properties. *Polymer Science, Series A*, 58 (2), 186-195.

Ar, R., al-Ashraf, M. (2012). Production Flow Analysis through Value Stream Mapping: A Lean Manufacturing Process Case Study. *Procedia Engineering*, 41, 1727-1734.

Bhuvaneshwari, C., Sureshkumar, M., Kakade, S., Gupta, M. (2006). Ethylene-propylene Diene Rubber as a Futuristic Elastomer for Insulation of Solid Rocket Motors. *Defence Science Journal*, 56 (3), 309-320.

Boudreau, J., Hopp, W., McClain, J., Thomas, L. (2003). On the Interface Between Operations and Human Resources Management. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5 (3), 179-202.

Breevaart, K., Bakker, A., Demerouti, E. (2014). Daily self-management and employee work engagement. *Journal of Vocational Behavior*, 84, 31-38.

Bürkle GmbH (2016), Liste chemische Beständigkeiten, *Bürkle GmbH*, Rheinauen 5, 79415 Bad Bellingen.

Cabrera, A., Cabrera, E. (2002). Knowledge-sharing Dilemmas, *Organization Studies*, 23 (5), 687-710. S. 688,

Choudhury, N., Ginic-Markovic, M., Dimopoulos, M., Matison, J., (2004). Adhesion between polyurethane coating and EPDM rubber compound. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18 (5),

Dierickx, I., Cool, K. (1989). Asset stock accumulation and sustainability of competitive advantage. *Management Science*, 35 (12), 1504-1513.

Dickmann, P. (Hrsg.). (2007), S.79, *Schlanker Materialfluss*. Berlin: Springer Verlag.

Dickson, E., Singh, S., Cheung, D., Wyatt, C., Nugent, A. (2009). Application of lean manufacturing techniques in the emergency department. *The Journal of Emergency Medicine*, 37 (2), 177-182.

DuPont, (2017). Technical Guide for Kevlar® Aramid Fiber.

Fu, Q., Zhao, J. (2015). An Automatic Method to detect defects for Solid Rocket Motor. *Conference paper: 2015 International conference on Applied Science and Engineering Innovation*.

- Germani, T., Mastrangelo, G., Boury, D., Bouvier, F., Fontana, A., Telara, M., Lecoustre, M., Cesco, N. (2005). Ariane 5 S.R.M ARTA Firing Tests Program Lesson Learned and Perspectives. *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion conference & Exhibit, 10 - 13 Juli, 2005*, Tucson, Arizona.
- Giants, T (1991). Case Bond Liner Systems for Solid Rocket Motors. Report - Space Systems Division Air Force Systems Command.
- Gill, R. (2003). Change management – or change leadership ? *Journal of Change Management*, 4 (3), 307-318.
- Glausser, M. (1984). Upward Information Flow in Organizations: Review and Conceptual Analysis. *Human Relations*, 37 (8), 613-643.
- Gottlieb, L., Bar, S. (2003). Migration of Plasticizer between Bonded Propellant Interfaces. *Propellant, Explosives, Pyrotechnics*, 28 (1), 12-17.
- Hrnjak-Murgić, Z., Jelenčić, J., Bravar, M. (1996). The role of molar volume of the organic solvents in the swelling system EPDM vulcanizate/solvent. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 242, 85-96.
- Kakade, S., Sureshkumar, M., Bhuvanewari, C., Gupta, M. (2007). Studies on the properties of EPDM-CSE blend containing HTPB for case-bonded solid rocket motor insulation. *Polymers for advanced technologies*, 19, 144-150.
- Karanges, E., Johnston, K., Beatson, A., Lings, I. (2015). The influence of internal communication on employee engagement: A pilot study. *Public Relations Review*, 41 (1), 129-131.
- Li, C., Lu, G., Jiang, J., Ge, Q., Wang, S., Wang, B. (2015). Review on the Test Method of Adhesive Failure in Solid Rocket Motor. *Conference paper: 2015 Joint International Mechanical, Electronic and Information Technology Conference*.
- Liao, C., Lee, S. (2015). Improving Bond Strength at Propellant-Liner Interfaces. *Journal of Propulsion and Power*, 31 (5), 1452-1457.
- Milliken, F., Morrison, E., Hewlin, P. (2003). An Exploratory Study of Employee Silence: Issues that Employees Don't Communicate Upward and Why. *Journal of Management Studies*, 40 (6), 1453-1476.
- Nielsen, T., Hansen, C. (2005). Elastomer swelling and Hansen solubility parameters. *Polymer Testing*, 24, 1054-1061.
- Nonaka, I., Toyama, R., Konno, N. (2000). SECI, Ba and Leadership: a Unified Model of Dynamic Knowledge Creation. *Long Range Planning*, 33, 5-34.

- Norman, D. (1990). The 'problem' with automation: inappropriate feedback and interaction, not 'over-automation'. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, B327, 585-593.
- Pfeffer, J. (1995). Producing sustainable competitive advantage through the effective management of people. *Academy of Management Executive*, 9 (1), 55-69.
- Saraph, J., Benson, G., Schroeder, R. (1989). An Instrument for Measuring the Critical Factors of Quality Management, *Decision Sciences*, 20, 810-829.
- Saunders, D., Sheppard, B., Knight, V., Roth, J. (1992). Employee Voice to Supervisors, *Employee Responsibilities and Rights Journal*, 5 (3), 241-259.
- Siemsen, E., Roth, A., Balasubramanian, S., Anand, G. (2009). The Influence of Psychological Safety and Confidence in Knowledge on Employee Knowledge Sharing, *Manufacturing & Service Operations Management*, 11 (3), 429-447.
- Sluss, D., Klimchak, M., Holmes, J. (2008). Perceived organizational support as a mediator between relational exchange and organizational identification. *Journal of Vocational Behaviour*, 73 (3), 457-464.
- Su, H., Linderman, K., Schroeder, R., Van de Ven, A. (2014). A comparative case study of sustaining quality as a competitive advantage. *Journal of Operations Management*, 32, 429-445.
- Szulanski, G. (1996). Exploring internal Stickiness: Impediments to the transfer of best practice within the firm. *Strategic Management Journal*, 17, 27-43.
- Tourish, D., Robson, P. (2003). Critical upward feedback in organisations: Processes, problems and implications for communication management. *Journal of Communication Management*, 8(2), 150-167.
- Tyagi, S., Choudhary, A., Cai, X., Yang, K. (2015). Value stream mapping to reduce the lead-time of a product development process. *International Journal of Production Economics*, 160, 202-212.
- Zhou, Q., Xu, J., Chen, X., Zhou, C. (2016). Review of the Adhesively Bonded Interface in a Solid Rocket Motor. *The Journal of Adhesion*, 92 (5), 402-428.
- Zielinska, M., Seyger, R., Dierkes, W., Bielinski, D., Noordermeer, J. (2016). Swelling of EPDM rubbers for oil-well applications as influenced by medium composition and temperature Part I. Literature and theoretical background. *Elastomery*, 2, 6-17.

Lebenslauf

Benedikt Risse

Geburtsdatum/-ort: September 29, 1983 / Heppenheim

Bildungsweg

März 2015 – Sept. 2018	Masterstudium , MBA & Engineering, Hochschule München, Deutschland
Okt. 2009 – Okt. 2012	Promotion , Génie des Procédés et des Produits, Université de Lorraine, Frankreich.
Sept. 2008 – Sept. 2009	Masterstudium , Binat. Studiengang Chemieingenieurwesen, Hochschule Mannheim, Deutschland.
Sept. 2008 – Sept. 2009	Ingénieur diplômé , Binat. Studiengang Verfahrenstechnik, Ecole nationale supérieure des industries chimiques (ENSIC), Nancy, Frankreich.
Okt. 2004 - Aug. 2008	Dipl. Ing. (FH) , Chemische Technik, Hochschule Mannheim, Deutschland.
Juli 2003 - März 2004	Grundwehrdienst , ABC - Aufklärungssoldat, 2./ABC-Abwehrbataillon 750, Bruchsal.
Aug. 2000 - Juli 2003	Ausbildung zum Chemikanten , BASF AG, Ludwigshafen.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, Benedikt Christoph Risse, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel:

Identifikation möglicher Schwachstellen und Optimierung der Prozesskette zur Reduzierung von Haftungsproblemen am Beispiel von Gasgeneratoren

selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

München, den _____

Benedikt Risse