

Analyse der Erwärmungstechnologien im Presshärteprozess - Marktpotenziale für die induktive Erwärmung von ebenen Blechen

Diplomarbeit
an der
Technischen Universität Graz

vorgelegt von
Fabian Meklin



Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion
Technische Universität Graz
A-8010 Graz, Österreich

Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck
Dipl.-Ing. Christian Koroschetz

24. März 2013



© Copyright Fabian Meklin 2013

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Fabian Meklin
Graz, Österreich, März 2013

Kurzfassung

Der „Leichtbau“ ist das zentrale Thema aktueller Entwicklungen in der Automobilindustrie. Der Einsatz „ultra-höchster“ pressgehärteter Bauteile bietet dabei den Automobilherstellern neue Möglichkeiten. Im Vergleich zu kaltumgeformten kann mit warmumgeformten Bauteilen das Gewicht reduziert, die Bauteilkomplexität gesteigert und die Festigkeit erhöht werden. In dieser Diplomarbeit werden die derzeitigen Einsatzmöglichkeiten und der zukünftige Bedarf pressgehärteter Bauteile aufgezeigt.

Bei der Herstellung warmumgeformter Bauteile ist vor allem die Erwärmungstechnologie von wesentlicher Bedeutung. Derzeit werden bevorzugt Rollenherdöfen für die Erwärmung der Halbzeuge eingesetzt. Der Platzbedarf dieser Anlagen ist, mit Baulängen zwischen 30 bis 70m, enorm. Die induktive Erwärmungsanlage des Instituts T&F, der Technischen Universität Graz, bietet dazu eine mögliche Alternative. Durch den Vergleich der Erwärmungstechnologien kann eine Aussage über die Wettbewerbsfähigkeit der Induktionsanlage getroffen werden. Dabei bilden die Anschaffungs- und Folgekosten, der Wirkungsgrad und der Platzbedarf der Anlagen die Bewertungskriterien. Durch die Analyse der Branche „Erwärmungstechnologien für den Presshärteprozess“ wird der derzeitige Wettbewerb innerhalb der Branche abgebildet und neue Erwärmungstechnologien für das Presshärten identifiziert. Daraus werden die Chancen und Barrieren der induktiven Erwärmungstechnologie in dieser Branche aufgezeigt.

Abstract

The light-weight approach has become the main focus in current automotive developments, as the application of ultra high-strength press hardened components provides new possibilities for the vehicle manufacturers. In a direct comparison to cold formed parts, hot formed components feature a reduction of the vehicle's weight, while the part complexity as well as the component strength can be significantly increased. This diploma thesis sets out to discuss all state-of-the-art applications and the expected future demand of press hardened components.

The heating technology is a key factor in the manufacturing of all hot formed parts. At the moment, roller hearth furnaces are favorably applied for the heating of the metal sheets. The required space for such facilities, with installation lengths of 30 to 70m, is tremendous. The inductive heating device developed by the Institute Tools & Forming, at the University of Technology Graz, provides a promising alternative. By systematically comparing heating technologies, the competitiveness of the induction heating technology can be evaluated. The considered assessment criteria include acquisition costs, follow-up costs, degree of efficiency and required space. By analyzing the sector focusing on the heating technologies for press hardening applications, the current state of competition is illustrated and new heating technologies for the press hardening process are identified. By doing so, all chances and restrictions of the inductive heating technology are cumulated.

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck für die Unterstützung bei meiner Diplomarbeit bedanken. Insbesondere aber auch dafür, dass mir die Möglichkeit geboten wurde, am Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion über die letzten Jahre hinweg arbeiten zu können.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Christian Koroschetz für die hervorragende Betreuung meiner Diplomarbeit. Bedanken möchte ich mich auch bei allen Kollegen und Kolleginnen des T&F Instituts für das gute Arbeitsklima und jegliche Hilfestellung.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern Alfred und Christine für die finanzielle und mentale Unterstützung während der gesamten Studienzzeit. Des Weiteren bedanke ich mich bei meinem Bruder Leander, meiner Schwester Victoria, meinen Großeltern sowie bei meinen Onkeln Michael und Thomas. Ihr wart mir stets eine große Stütze.

Großer Dank gilt meiner Freundin, sowie allen meinen Freunden aus Kärnten und Graz. Ich möchte mich auch bei meinen Studienkollegen bedanken, die meine Studienzzeit unvergesslich machen und immer ein offenes Ohr für mich hatten.

Symbole und Abkürzungen

Symbolverzeichnis

| | | |
|------------------|--|-----------------------|
| A_{c1} | Austenit-Starttemperatur | [°C] |
| A_{c3} | Austenit-Endtemperatur | [°C] |
| A_{FInd} | Freifläche für die Induktionsanlage | [m ²] |
| A_{FL-M} | Aufstellfläche des Umrichters - Flächeninduktor und Muffelofen | [m ²] |
| A_{Ind} | Aufstellfläche der Induktionsanlagenmodule | [m ²] |
| $A_{Ind-ges}$ | Gesamte Aufstellfläche der Induktionsanlage | [m ²] |
| A_{RK} | Aufstellfläche der Rückkühlanlage | [m ²] |
| A_S | Aufstellfläche des Steuerschranks | [m ²] |
| A_{ULF} | Aufstellfläche des Umrichters für den Längsfeldinduktor | [m ²] |
| b | Breite der Formplatte | [m] |
| b_{FInd} | Breite der Freifläche für die Induktionsanlage | [m] |
| b_{FL-M} | Breite des Umrichters - Flächeninduktor und Muffelofen | [m] |
| b_{Ind} | Breite der Induktionsanlage | [m] |
| b_{RK} | Breite der Rückkühlanlage | [m] |
| b_S | Breite des Steuerschranks | [m] |
| b_{ULF} | Breite des Längsfeld-Umrichters | [m] |
| c_p | spezifische Wärmekapazität | [J/kg · K] |
| $c_{p(t_1-t_2)}$ | mittlere spezifische Wärmekapazität zwischen t_1 und t_2 | [J/kg · K] |
| f | Frequenz | [Hz] |
| H | magnetische Feldstärke | [A/m] |
| H_u | unterer Heizwert des Erdgases | [kWh/m ³] |
| I | elektrische Stromstärke | [A] |
| J | Stromdichte | [A/mm ²] |
| l | Länge der Formplatte | [m] |
| l_{FInd} | Länge der Freifläche für die Induktionsanlage | [m] |
| l_{FL-M} | Länge des Umrichters - Flächeninduktor und Muffelofen | [m] |

| | | |
|--------------|--|----------------------|
| l_{Ind} | Gesamtlänge der Induktionsanlage | [m] |
| l_{RK} | Länge der Rückkühlanlage | [m] |
| l_S | Länge des Steuerschranks | [m] |
| l_{ULF} | Länge des Längsfeld-Umrichters | [m] |
| m | Masse | [kg] |
| \dot{m} | Massendurchsatz | [kg/h] |
| M_f | Martensit-Endtemperatur | [°C] |
| M_s | Martensit-Starttemperatur | [°C] |
| P_{AnInd} | Antriebsleistung der Induktionsanlage | [W] |
| P_{AnKon} | Antriebsleistung pro Meter Rollenherdofen | [W] |
| P_{BH-SB} | Heizleistung des Rollenherdofens, der Bättenhausen GmbH, im SB | [W] |
| P_{BH-TB} | Heizleistung des Rollenherdofens, der Bättenhausen GmbH, im TB | [W] |
| P_{el} | elektrische Leistung | [W] |
| P_{FL} | Anschlussleistung des Flächeninduktors | [W] |
| P_{FL-TB} | Heizleistung des Flächeninduktors im TB | [W] |
| P_{FL-TB} | Heizleistung des Flächeninduktors im TB | [W] |
| P_{HB} | Heizleistung im HB | [W] |
| P_{HO} | Anschlussleistung des Temperaturhalteofens | [W] |
| P_{Ind-SB} | Anschlussleistung der Induktionsanlage im SB | [W] |
| P_{Ind-TB} | Anschlussleistung der Induktionsanlage im TB | [W] |
| P_{LF} | Anschlussleistung des Längsfeldinduktors | [W] |
| P_{LF-TB} | Heizleistung des Längsfeldinduktors im TB | [W] |
| P_M | Anschlussleistung des Muffelofens | [W] |
| P_{M-TB} | Heizleistung des Muffelofens im TB | [W] |
| P_{th-SB} | theoretische Heizleistung im SB | [W] |
| P_S | Steuerleistung der Induktionsanlage | [W] |
| P_{SB} | Heizleistung im SB | [W] |
| P_{SBB} | Heizleistung im SBB | [W] |
| P_{SW-SB} | Heizleistung des Rollenherdofens, der SW S.A., im SB | [W] |
| P_{SW-TB} | Heizleistung des Rollenherdofens, der SW S.A., im TB | [W] |
| P_{th} | theoretische Heizleistung | [W] |
| P_{th-TL} | theoretische Heizleistung im TB | [W] |
| P_{TB} | Heizleistung im TB | [W] |
| P_{th-FL} | theoretische Heizleistung des Flächeninduktors | [W] |
| P_{th-LF} | theoretische Heizleistung des Längsfeldinduktors | [W] |
| P_{th-M} | theoretische Heizleistung des Muffelofens | [W] |
| P_{WMU-SB} | Heizleistung des Rollenherdofens, der WMU GmbH, im SB | [W] |
| P_{WMU-TB} | Heizleistung des Rollenherdofens, der WMU GmbH, im TB | [W] |
| ρ | Dichte des Werkstoffes 22MnB5 | [kg/m ³] |
| s | Stärke der Formplatine | [m] |
| t | Temperatur | [°C] |

| | | |
|-----------------|--|---|
| T_1 | Erwärmungs- Starttemperatur | [K] |
| T_2 | Erwärmungs- Endtemperatur | [K] |
| t_{ein} | Einlege-Temperatur | [°C] |
| t_{aus} | Entnahme-Temperatur | [°C] |
| ΔT | Temperaturdifferenz | [K] |
| t_{HB} | Zeit im HB | [h] |
| t_{SB} | Produktionszeit im SB | [h] |
| t_{SBB} | Zeit im SBB | [h] |
| t_{TB} | Produktionszeit im TB | [h] |
| U | elektrische Spannung | [V] |
| V | Volumen der Formplatte | [m ³] |
| δ | Stromeindringmaß | [cm] |
| η_{BH-SB} | Wirkungsgrad des Rollenherdofens, der Bättenhausen GmbH, im SB | |
| η_{BH-TB} | Wirkungsgrad des Rollenherdofens, der Bättenhausen GmbH, im TB | |
| η_{FL} | Wirkungsgrad des Flächeninduktors | |
| η_{ges} | Gesamtwirkungsgrad | |
| η_{Ind-SB} | Wirkungsgrad der Induktionsanlage im SB | |
| η_{Ind-TB} | Wirkungsgrad der Induktionsanlage im TB | |
| η_{LF} | Wirkungsgrad des Längsfeldinduktors | |
| η_M | Wirkungsgrad des Muffelofens | |
| η_{St} | Wirkungsgrad - Strahlung | |
| η_{Sp} | Wirkungsgrad der Spule | |
| η_{SW-SB} | Wirkungsgrad des Rollenherdofens, der SW S.A., im SB | |
| η_{SW-TB} | Wirkungsgrad des Rollenherdofens, der SW S.A., im TB | |
| η_{Tr} | Wirkungsgrad des Transformators | |
| η_{Um} | Wirkungsgrad des Umrichters | |
| η_{WMU-SB} | Wirkungsgrad des Rollenherdofens, der WMU GmbH, im SB | |
| η_{WMU-TB} | Wirkungsgrad des Rollenherdofens, der WMU GmbH, im TB | |
| η_{Zu} | Wirkungsgrad der Zuleitungen zum Induktor | |
| μ_r | Permeabilitätszahl | |
| ρ_r | spezifischer elektrischer Widerstand | [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$] |

Abkürzungen

| | |
|--------------|--|
| Bättenhausen | N. Bättenhausen Industrielle Wärme- u. Elektrotechnik |
| GU | Generalunternehmen |
| HB | Halte-Betrieb |
| MLK-Ofen | Mehrlagenmehrkammer-Ofen |
| SB | Serien-Betrieb |
| SBB | Standby-Betrieb |
| SW | SECO/WARWICK EUROPE |
| T&F | Institut für Werkzeugtechnik und Spanlose Produktion |
| TB | Teillast-Betrieb |
| TWB | Tailored Welded Blank |
| WMU | WMU Wärmebehandlungsanlagen für Industrie und Umwelt- technik |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Symbole und Abkürzungen | ii |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Stand der Technik | 3 |
| 2.1 Verfahrensprinzip: Presshärten | 3 |
| 2.1.1 Direktes Presshärten | 5 |
| 2.1.2 Indirektes Presshärten | 7 |
| 2.1.3 Vergleich zwischen dem direkten und indirekten Verfahren | 8 |
| 2.2 Halbzeuge für das Presshärten | 9 |
| 2.2.1 Werkstoffe | 9 |
| 2.2.2 Beschichtungen | 11 |
| 2.2.3 Tailored Welded Blanks | 16 |
| 2.3 Erwärmungstechnologien | 18 |
| 2.3.1 Konventionelle Erwärmungsanlagen | 18 |
| 2.3.2 Induktive Erwärmungsanlagen | 28 |
| 2.3.3 Alternative Erwärmungskonzepte | 33 |
| 2.3.4 Anforderungen an Erwärmungsanlagen | 38 |
| 2.4 Branchenanalyse | 40 |
| 2.4.1 Die fünf Wettbewerbskräfte nach M.E. PORTER | 40 |
| 2.4.2 Leitfaden zur Erstellung einer Branchenanalyse | 45 |
| 3 Zielsetzung der Diplomarbeit | 48 |
| 4 Analyse und energetische Bewertung der Erwärmungstechnologien im Presshärteprozess | 49 |
| 4.1 Anfrage an die Ofenhersteller | 49 |
| 4.2 Energiebetrachtung | 50 |
| 4.2.1 Erwärmung mit konventionellem Ofen | 52 |
| 4.2.2 Erwärmung mittels Induktionsanlage | 57 |
| 4.2.3 Gesamtwirkungsgrade der Erwärmungsanlagen | 60 |
| 4.3 Kostenvergleich | 62 |
| 4.3.1 Betriebskosten | 63 |
| 4.3.2 Gesamtkosten | 64 |
| 4.4 Platzbedarf | 65 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5 | Branchenanalyse - Potenziale für die induktive Erwärmungstechnologie | 67 |
| 5.1 | Analyse der Branche „Erwärmungstechnologien für den Presshärteprozess“ | 67 |
| 5.1.1 | Grad der Rivalität unter bestehenden Unternehmen | 67 |
| 5.1.2 | Lieferanten | 68 |
| 5.1.3 | Analyse potenzieller Wettbewerber | 69 |
| 5.1.4 | Abnehmer | 70 |
| 5.1.5 | Substitutionsprodukte | 72 |
| 5.1.6 | Überblick über die Branchenstruktur | 73 |
| 6 | Bauteilspektren am Markt und Prognose - Zukünftiger Bedarf an pressgehärteten Bauteilen | 75 |
| 6.1 | Bauteilspektren am Markt | 75 |
| 6.2 | Prognose - Zukünftiger Bedarf an pressgehärteten Bauteilen | 77 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 82 |
| A | Einsatz von pressgehärteten Bauteilen bei verschiedenen Fahrzeugmodellen | 84 |
| B | Anfrage an die Ofenhersteller | 89 |
| | Abbildungsverzeichnis | 98 |
| | Tabellenverzeichnis | 99 |
| | Literaturverzeichnis | 100 |

Kapitel 1

Einleitung

Die Entwicklungen der Automobilhersteller zeigen einen eindeutigen Trend, immer sicherer, leichter und effizienter soll das Automobil der Zukunft sein. Diese Entwicklungstendenz ist auf eine stärkere Reglementierung von CO₂-Emissionsgrenzwerten und auf die steigenden Anforderungen an die Insassensicherheit zurückzuführen. Des Weiteren führt die Forderung nach der Reduktion des Fahrzeuggewichtes zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch und dadurch zur Senkung des CO₂-Ausstoßes. Daraus resultierte eine Reihe verschiedenster Leichtbaukonzepte in den vergangenen Jahren. Eine bereits etablierte Möglichkeit ist der Einsatz von warmumgeformten bzw. pressgehärteten Bauteilen. Diese sind derzeit aus der automobilen Karosserie nicht mehr wegzudenken und überzeugen durch erreichbare Zugfestigkeitswerte bis zu 1800 MPa und dies bei gleichzeitiger Reduktion des Gewichtes im Vergleich zu Referenzbauteilen. Diese „ultra-höchstfesten“ Bauteile werden derzeit vor allem dort eingesetzt, wo die Crash- Sicherheit im Vordergrund steht. Durch die sogenannten „Tailored Welded Blanks“ ergeben sich neue Einsatzmöglichkeiten für pressgehärtete Bauteile. Das breite Spektrum dieser Bauteile und der zukünftige Bedarf werden in dieser Arbeit dargestellt. [Volkswagen AG, 2009], [VDI Wissensforum GmbH, 2012], [Overrath et al., 2010]

Eine effiziente Warmumformung stellt aber hohe Anforderungen an den Fertigungsprozess und erfordert die Optimierung aller Teilprozesse der Warmumform- Prozesskette. Dies trifft natürlich auch auf die Erwärmungsstrategie der Formplatte bzw. des vorgeformten Bauteils zu. Die Erwärmung der Platinen erfolgt derzeit üblicherweise in Rollenherdöfen. In ihnen wird die Wärmeenergie durch Konvektion, Strahlung und Kontaktleitung auf die Halbzeuge übertragen. Dies bedingt in Abhängigkeit der Durchsatzleistung eine entsprechende Baulänge bzw. einen großen Platzbedarf. Die lange Durchlaufzeit wiederum ermöglicht, bei der Verwendung von feueraluminierten Materialien, den Ablauf notwendiger Diffusionsprozesse. Gleichwohl ergeben sich beim Betrieb konventioneller Ofenanlagen Nachteile hinsichtlich der Flexibilität. Derzeit existieren neben dem Rollenherdofen noch weitere Erwärmungskonzepte. Auch am Institut T&F wurde an einer Alternative zum Rollenherdofen geforscht, hier entstand eine induktive Erwärmungsanlage. Im Gegensatz zum Rollenherdofen wird hier die Erwärmung in verschiedenen Stufen durch ein magnetisches Wechselfeld erreicht. Ob diese Erwärmungstechnologie tatsächlich besser ist soll ein Vergleich der Anschaffungs- und Folgekosten, des Platzbedarfes und des Wirkungsgrades, bei verschiedenen Betriebszuständen der Anlage, zeigen. Eine funktionierende Pilot-Anlage existiert bereits, an der Umsetzung

einer Serienanlage wird derzeit gearbeitet. Ob die Chancen groß sind, diese Anlage erfolgreich in die Erwärmungsbranche zu platzieren oder ob es Barrieren gibt, darüber soll die Analyse der Struktur der Branche „Erwärmungstechnologien für den Presshärteprozess“ die notwendigen Informationen liefern. Die Analyse ermöglicht die Feststellung der Intensität des Wettbewerbes innerhalb der Branche und identifiziert neue Erwärmungskonzepte für den Presshärteprozess. [Pfeifer et al., 2011, S. 455-476]

Kapitel 2

Stand der Technik

2.1 Verfahrensprinzip: Presshärten

Die Anfänge des Presshärtens lassen sich bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurückverfolgen. Das Patent, mit der Nummer GB1490535, für das Presshärten wurde jedoch erst 1977 erteilt. Eingereicht wurde es 1973 von der staatlichen Norbottens Järnverk AB, einem schwedischen Stahlhersteller mit Sitz in Luleå (heute SSAB, Swedish Steel AB). Als Erfinder gilt bis heute Calr-Eric Ridderstråle. Im Jahr 1974 reichte Norbottens Järnverk AB, das Presshärteverfahren am Deutschen Patentamt, zur Erteilung eines Patents, ein. Die Erstveröffentlichung, der Patentanmeldung, erfolgte über die Offenlegungsschrift 2452486 im Jahr 1975. Die Erteilung des Patents „Verfahren zum Preßformen und Härten eines Stahlblechs mit geringer Materialdicke und guter Maßhaltigkeit“ erfolgte aber erst im Jahr 1985. Der Patentinhaber ist die schwedische Plannja AB (Heute Gestamp HardTech AB), eine ehemalige Tochtergesellschaft der SSAB, welche 1982 sämtliche Rechte an dem Presshärteverfahren erwarb.[Gestamp HardTech AB, 2012],[Berglund, 2008, S. 177-179]

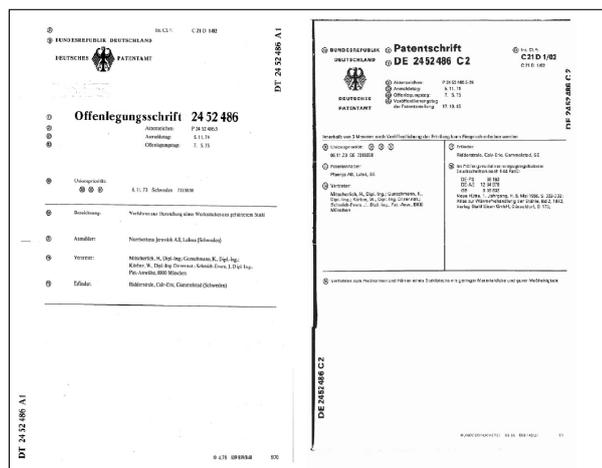


Abbildung 2.1: Offenlegungs- und Patentschrift für das Presshärten des Deutschen Patentamts

Im Jahr 1975 starteten die Norbottens Järnverk AB und Volvo Truck das erste gemeinsame Forschungsprojekt zum Thema Presshärten. Die Integration eines pressgehärteten Bauteiles in das Automobil gelang 1984 dem Automobilhersteller Saab Automobile AB. Dieser verbaute im Saab 9000 einen Seitenaufprallträger, hergestellt durch das Verfahren des Presshärtens. Die Entwicklung dieses sicherheitsrelevanten Bauteils öffnete der Presshärte-Technologie neue Einsatzmöglichkeiten und richtete den Fokus der Automobil-Industrie verstärkt in Richtung der Insassensicherheit. [Gestamp HardTech AB, 2012],[Berglund, 2008, S. 177-179]

Die Herstellung von hoch- und höchstfesten Bauteilen stellt hohe Anforderungen an das eingesetzte Verfahren. Diese Anforderungen erfüllen die Kaltumformung von höchstfesten Materialien und die Warmumformung bzw. das Presshärten von borlegierten Stählen. Welches Verfahren eingesetzt wird, hängt stark von dem verwendeten Material und der geforderten Ziehtiefe ab. Unter Kaltumformung versteht man ein Umformen ohne Anwärmen, d.h. bei Raumtemperatur, und unter Warmumformung, wenn ein Anwärmen vor dem eigentlichen Umformvorgang stattgefunden hat. Bei der Kaltumformung wird zwischen zwei Herstellungsverfahren unterschieden. Bauteile mit geringen Ziehtiefen können im Folgeverbund und Bauteile mit höheren Umformgraden bzw. mit Zugfestigkeiten kleiner 1000MPa können in der Einzelteilmontage mit mehreren Umformstufen hergestellt werden. Bei der Einzelteilmontage erfolgt aufgrund des Effektes der Kaltverfestigung die Hauptumformung im ersten Prozessschritt. Der Transport der Formplatte, zwischen den einzelnen Stationen, erfolgt dabei automatisiert. Bei der Fertigung im Folgeverbund, siehe Abbildung 2.2 durchläuft das Halbzeug die Prozessschritte Beschnitt, Umformung und Positionierung bis zum fertigen Bauteil. Es wird erst am Ende des Fertigungsprozesses vom Trägerband getrennt. Dieses dient dem Vorschub und der Positionierung. [R. Kolleck, 2004, S. 167 - 168],[R. Kolleck, 2005, S. 69-75],[Lange, 2002, S. 12]

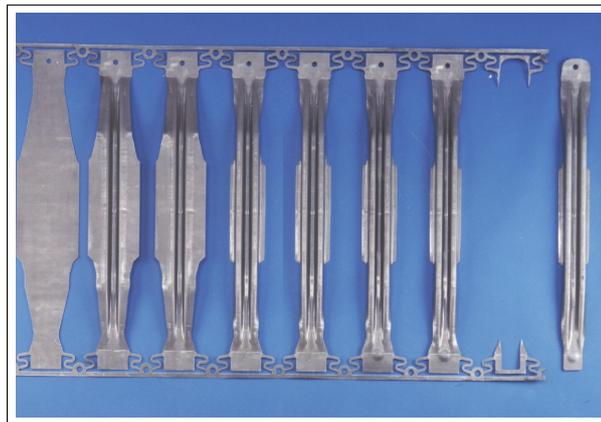


Abbildung 2.2: Fertigung eines Seitenaufprallträgers (MS-W 1200, Materialstärke 1,5 mm) im Folgeverbund, [R. Kolleck, 2004, S. 168]

Die Nachteile des Kaltumformens ergeben sich durch die limitierte Umformbarkeit höchster Stähle sowie deren Rückfederungsneigung nach der Umformung. Des Weiteren treten dabei hohe Umform- und Pressenkräfte auf was sich durch einen verstärkten Werkzeugverschleiß bemerkbar macht.[R. Kolleck, 2004, S. 168]

Die Herstellung von „ultra-höchstfesten“ Bauteilen kann durch das Presshärten von borlegiertem Vergütungsstahl 22MnB5 erreicht werden. Diese Bauteile weisen Zugfestigkeitswerte von bis zu 1900MPa und eine geringe bis keine Rückfederung auf. Bei der Verwendung des unbeschichteten borlegierten Stahls 22MnB5 kommt es jedoch zur Bildung von Zunder. Dieser führt beim Umformwerkzeug zu abrasiven Verschleiß. Durch das Aufbringen verschiedener Beschichtungen, wie in Kapitel 2.2.2 näher beschrieben, kann diese Zunderbildung verhindert werden. [R. Kolleck, 2004, S. 169]

Das Presshärten stellt hohe Anforderungen an den Gesamtprozess (Erwärmungsanlage, gekühlte Werkzeuge,...) und hat den Nachteil, dass die Bauteile trotz der hohen Zugfestigkeiten nur geringe Bruchdehnungen (<10 Prozent) nach dem Aushärten aufweisen, Abbildung 2.3.

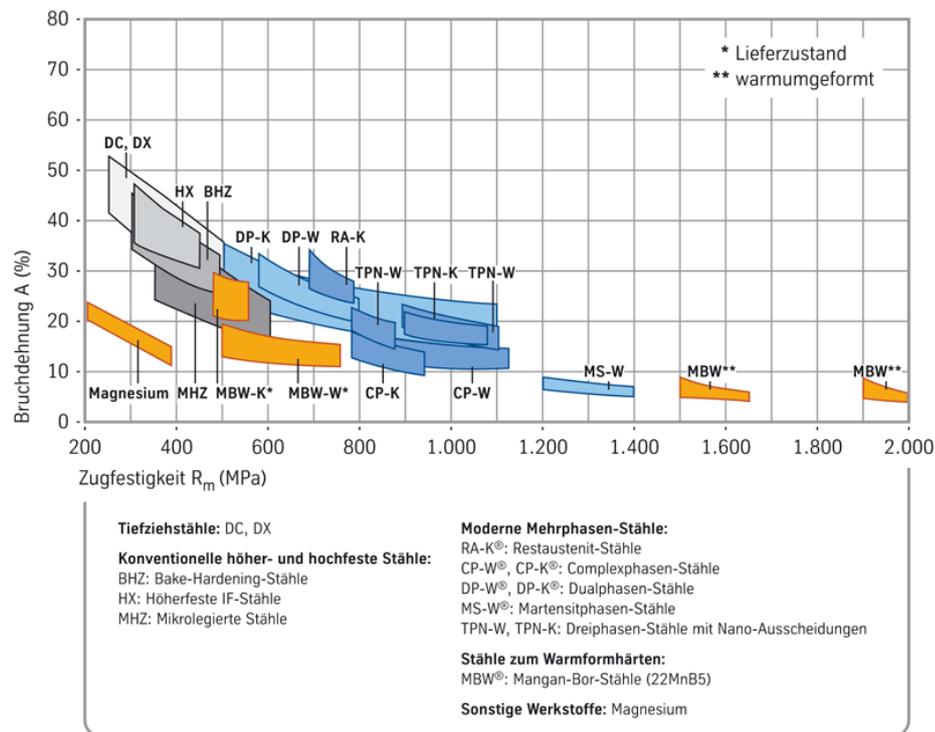


Abbildung 2.3: Eigenschaften der Werkstoffe MBW und MBK vor und nach dem Presshärten, ThyssenKruppAG [2013]

2.1.1 Direktes Presshärten

Beim Verfahren des direkten Presshärtens erfolgt in der ersten Stufe des Fertigungsprozesses, der Beschnitt. Die Formplatte wird danach für mindestens 240 Sekunden auf eine Temperatur zwischen 850 bis 950°C erwärmt. Die Erwärmungsdauer ergibt sich aufgrund der Aufheizcharakteristik des Werkstoffes. Diesen Erwärmungsvorgang bezeichnet man als Austenitisieren und dient der Auflösung vorhandener Ausscheidungen (Carbide) und der Homogenisierung des Kohlenstoffgehalts. Die Austenitisierungstemperatur muss dabei größer als $A_{c3} = 845^{\circ}C$ sein. Das ist die Temperatur bei der die Umwandlung des Ferrits in Aus-

tenit endet. Im borlegierten Vergütungsstahl kommt es nach der Erwärmung zur Ausbildung eines austenitischen Gefüges. In den nächsten Schritten erfolgen der Transfer in die Presse und die Umformung, bei gleichzeitiger Abkühlung im Werkzeug. Die Dauer für die Umformung und Abkühlung beträgt dabei 6 bis 10 Sekunden, Abbildung 2.4. [H. Schumann, 2007, S. 587]

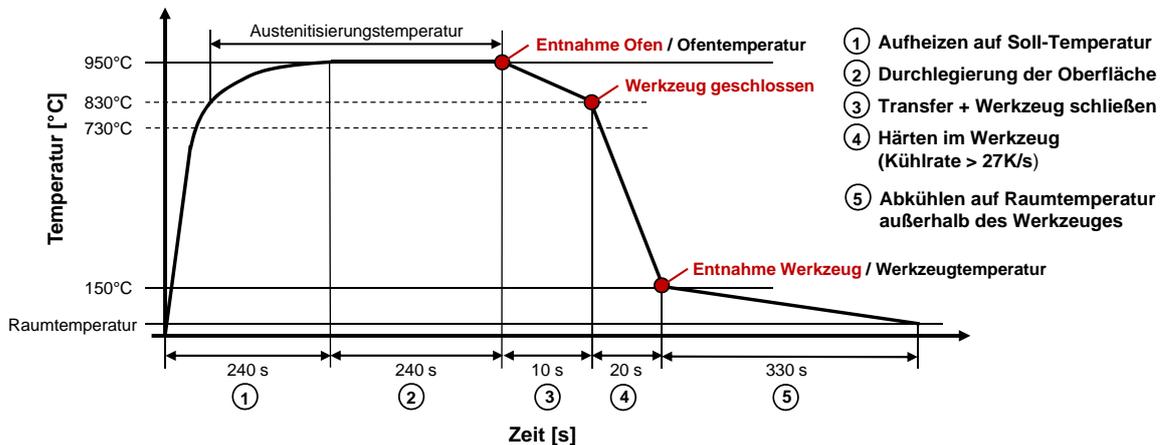


Abbildung 2.4: Temperaturverlauf beim direkten Presshärten, in Anlehnung an ThyssenKrupp AG [2008]

Nach dem Umform- und Abkühlvorgang weist das Material ein martensitisches Gefüge auf. Um die Ausbildung dieser Gefügestruktur garantiert zu erhalten muss die Abkühlung mit mindestens 27K/s erfolgen. Durch die Abkühlung findet ab der Martensit - Starttemperatur $M_s = 410^\circ C$ ein diffusionsloser Umklappvorgang in Martensit statt. Dieser Vorgang endet bei der Martensit - Finishtemperatur $M_f = 230^\circ C$. Aus dieser Umwandlung resultiert die hohe Zugfestigkeit und Härte der Bauteile. Anschließend erfolgt die Entnahme bei circa 150 bis 200°C. Die Bauteile werden nach Erreichen der Raumtemperatur, mittels Schneidwerkzeug oder Laser, beschnitten. Der Gesamtprozess für das direkte Presshärten ist in der Abbildung 2.5 dargestellt. [K. Karbasian, 2010], [Naderi et al., 2007]



Abbildung 2.5: Prozessablauf beim direkten Presshärten, P. Dick [2008]

Die Abkühlrate ist die bestimmende Größe für die Gefügestruktur des Materials nach dem Umform- und Abkühlprozess. Bei Abkühlraten die unter 27K/s liegen, werden Bauteile mit

geringeren Härtewerten und Zugfestigkeiten erzeugt. Der Grund dafür ist, dass es zur Ausbildung eines bainitischen, ferritischen, perlitischen oder eine Mischgefüges kommt. Im Zeit-Temperatur- Umwandlungsschaubild für den Werkstoff 22MnB5, ist die Abhängigkeit der Gefügeausbildung von der Abkühlrate dargestellt, Abbildung 2.6. [Naderi et al., 2007]

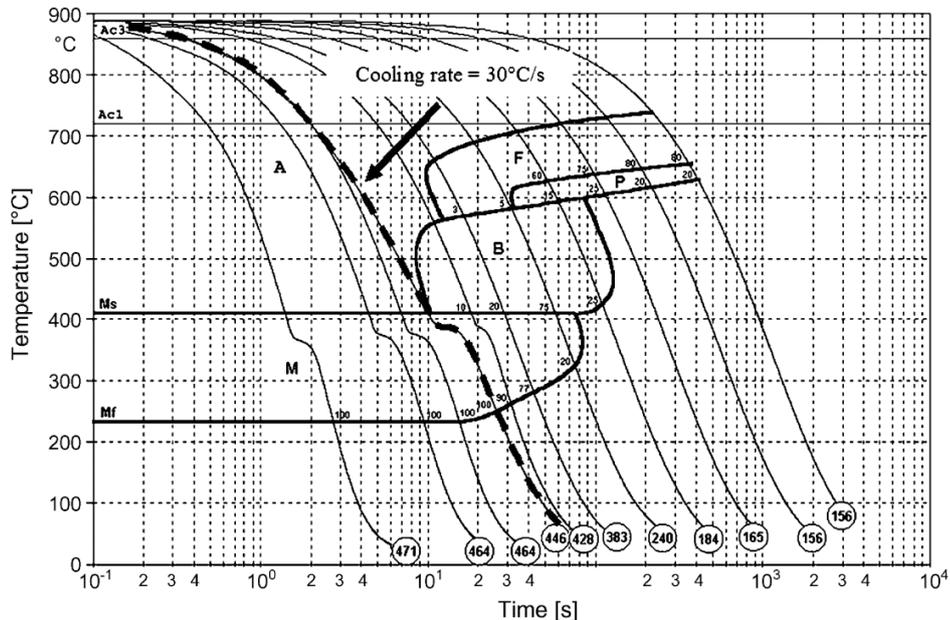


Abbildung 2.6: Zeit- Temperatur- Umwandlungsschaubild des Werkstoffs 22MnB5, Naderi et al. [2007]

Mit partiell beheizten Umformwerkzeugen kann die Abkühlrate in gewünschten Bereichen gezielt herabgesetzt werden. Nach dem Presshärten kommt es dadurch zur Ausbildung unterschiedlicher Gefügestrukturen innerhalb des Bauteils. Im Bereich mit niedriger Abkühlrate bildet sich ein perlitisch-ferritisches Gefüge mit geringeren Zugfestigkeiten und höheren Bruchdehnungen, als im Bereich mit höherer Abkühlrate, aus. Die Nachteile dabei sind der Verzug nach der Entnahme der Bauteile aus dem Umformwerkzeug, die Verlängerung der Taktzeit und die Komplexität der Werkzeuge.[EP 2497840A1, 2012]

2.1.2 Indirektes Presshärten

Beim indirekten Presshärten werden kaltumgeformte Bauteile pressgehärtet. Nach dem Beschnitt, des Ausgangsmaterials, wird die Formplatte durch Kaltumformung vorgeformt und auf die Endkontur beschnitten. Durch das Vorformen erreicht das Bauteil 90 bis 95 Prozent der Endgeometrie. Erst danach wird das vorgeformte Bauteil auf 900 bis 950°C erwärmt und in der Presse bis zur Endgeometrie umgeformt und gezielt abgekühlt. Die Bauteile werden bei Temperaturen zwischen 150 und 200°C aus der Presse entnommen. [R. Kolleck, 2004],[T. Laumann, 2007]



Abbildung 2.7: Prozessablauf beim indirekten Presshärten, P. Dick [2008]

2.1.3 Vergleich zwischen dem direkten und indirekten Verfahren

Durch das indirekte Verfahren können durch die Kaltumformung und die nachgelagerte Warmumformung komplexere Bauteilgeometrie realisiert werden, als durch das direkte Presshärten. Des Weiteren erfolgt der Endbeschnitt schon nach der Kaltumformung, wodurch ein nachträglicher Beschnitt der Bauteile nicht notwendig ist. Dieser erfordert beim direkten Verfahren einen kosten- und zeitintensiven Einsatz der Lasertechnologie.

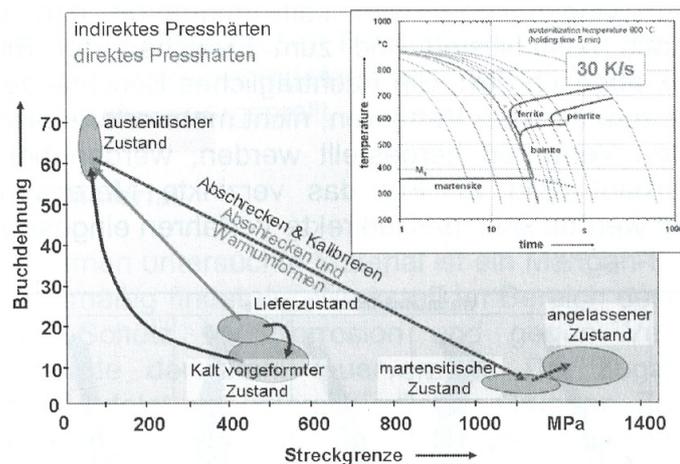


Abbildung 2.8: Veränderung der mechanischen Eigenschaften während des Presshärtens, M. Merklein [2007]

Beim Presshärten kommt es zu Relativbewegungen zwischen Werkstück und Werkzeug, welche durch das zweistufige Verfahren verringert werden. Dadurch kommt es zu einer Minimierung des abrasiven Verschleißes an der Werkzeugoberfläche. Der große Nachteil des indirekten Verfahrens ist, dass die Endgeometrie erst beim Aushärtevorgang erreicht wird. Dies muss bei der Fertigung von toleranzkritischen Löchern beachtet werden. Aufgrund der vorgelagerten Kaltumformung, wird beim indirekten Verfahren ein zusätzliches Umformwerkzeug und daraus resultierend eine weitere Transfereinrichtung benötigt. Dadurch ist dieses Verfahren aufwändiger und kostenintensiver als einstufige Verfahren. [M. Merklein, 2007], [Merklein, 2008], [ThyssenKrupp Steel AG, 2009]

2.2 Halbzeuge für das Presshärten

2.2.1 Werkstoffe

Grundvoraussetzung für den Einsatz eines Stahles für das Presshärten ist die Ausbildung eines homogenen martensitischen Gefüges nach dem Abkühlen. Diese Eigenschaft erfüllen, wie in den Untersuchungen von Naderi [2007] beschrieben, die borlegierten Vergütungsstähle 22MnB5, 27MnCrB5 und 37MnB4. Die Umwandlung in diese Gefügestruktur ist dabei nur bei der Verwendung eines wassergekühlten Umformwerkzeuges, mit einer Mindestabkühlrate von 27 K/s, garantiert. Derzeit wird der borlegierte Vergütungsstahl 22MnB5, seitens der Hersteller pressgehärteter Bauteile, bevorzugt eingesetzt. Dieser Werkstoff wird, nach DIN EN 10027-1 laut Stahl-Eisen Liste, mit der Werkstoff-Nr. 1.5528 normgerecht bezeichnet. Diese Stahlgüte ist bei den Stahlherstellern unter verschiedenen Produktbezeichnungen und mit unterschiedlichen Beschichtungen erhältlich, Tabelle 2.1.

| Hersteller | Produktbezeichnung |
|----------------------------|---|
| Salzgitter Flachstahl GmbH | 22MnB5 |
| ArcelorMittal | Usibor® 1500-AS Usibor® 1500-GA Usibor® 1500-GI 22MnB5 |
| ThyssenKrupp Steel AG | MBW-K® 1500 MBW-W® 1500 MBW-W® 1500+AS MBW-W® 1900* |
| Benteler AG | BTR165** |
| Voestalpine AG | phs-ultraform |
| Hoesch Hohenlimburg GmbH | HLB 22 |

* noch nicht erhältlich

** exklusive Herstellung durch die ThyssenKrupp Steel AG

Tabelle 2.1: Verschiedene Hersteller und Produktbezeichnungen für presshärtbare Stähle

Der borlegierte Vergütungsstahl 22MnB5 wird von Stahlherstellern in Anlehnung an die DIN EN 10083-3 produziert. Dabei gibt es nicht nur Unterschiede hinsichtlich der Produktbezeichnung, sondern auch in der chemischen Zusammensetzung, Tabelle 2.2.

Die Anteile an Kohlenstoff, Chrom, Mangan und vor allem der geringe Anteil an Bor in der chemischen Zusammensetzung beeinflussen die mechanischen Eigenschaften des Vergütungsstahles. Dadurch ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften im Anlieferungszustand, welche beim indirekten Presshärten eine wesentliche Rolle spielen. Von geringerer Bedeutung sind diese beim direkten Verfahren. Entscheidend für beide Verfahren sind die erreichbaren Zugfestigkeiten und Bruchdehnung nach dem Aushärtevorgang. Die Unterschiede sind in der Tabelle 2.3 dargestellt.

| Anteile [%] | Stahlhersteller | | | |
|-------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------|---|
| | Salzgitter Flachstahl GmbH | Hoesch Hohenlimburg GmbH | ArcelorMittal | ThyssenKrupp Steel AG |
| | 22MnB5 | HLB 22 | 22MnB5 | MBW-W® 1500 MBW-K® 1500 MBW-W® 1500 +AS |
| C | 0,19 - 0,25 | 0,19 - 0,26 | 0,20 - 0,25 | max. 0,25 |
| Si | 0,10 - 0,40 | 0,15 - 0,40 | 0,15 - 0,35 | max. 0,40 |
| Mn | 1,10 - 1,40 | 1,10 - 1,35 | 1,10 - 1,40 | max. 1,40 |
| P | max. 0,025 | max. 0,025 | max. 0,025 | max. 0,025 |
| S | max. 0,010 | max. 0,015 | max. 0,008 | max. 0,10 |
| Al | 0,15 - 0,08 | 0,02 - 0,06 | max. 0,015 | max. 0,015 |
| Cr | 0,10 - 0,30 | 0,15 - 0,35 | - | max. 0,5 |
| Ti | 0,02 - 0,05 | 0,02 - 0,05 | 0,02 - 0,05 | max. 0,05 |
| B | 0,001 - 0,005 | 0,0008 - 0,005 | 0,002 - 0,005 | max. 0,005 |
| Ni | max. 0,010 | - | - | - |

Tabelle 2.2: Chemische Zusammensetzung bohrlegierter Vergütungsstähle verschiedener Hersteller, Salzgitter Flachstahl GmbH [2007], Hoesch Hohenlimburg GmbH [2011], ArcelorMittal [2013a]

| Hersteller | Stahlgüte | Lieferzustand | | | Gehärtet | | |
|----------------------------|-----------------|---------------|-----------|---------|----------|----------|---------|
| | | Re [Mpa] | Rm [Mpa] | A80 [%] | Re [Mpa] | Rm [Mpa] | A80 [%] |
| ArcelorMittal | 22MnB5 | 320 - 550 | 500 - 700 | ≥ 10 | 1100 | 1500 | 6 |
| | Usibor® 1500 | 350 - 550 | 500 - 700 | ≥ 10 | 1100 | 1500 | 6 |
| ThyssenKrupp Steel AG | MBW-W® 1500 | ≥ 320 | ≥ 500 | ≥ 10 | 1100 | 1650 | 5 |
| | MBW-K® 1500 | 310 - 400 | 480 - 560 | ≥ 20 | | | |
| | MBW-W® 1500 +AS | 360 - 500 | 550 - 700 | ≥ 12 | | | |
| Salzgitter Flachstahl GmbH | 22MnB5 | 310 - 400 | 480 - 580 | ≥ 20 | - | 1650 | 8 |

Tabelle 2.3: Mechanische Eigenschaften der Stahlgüten im Anlieferungszustand und nach der Warmumformung, Salzgitter Flachstahl GmbH [2013], [ThyssenKrupp Steel AG, 2009], ArcelorMittal [2013b]

| Hersteller | Bezeichnung | direktes Verfahren | indirektes Verfahren |
|----------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Salzgitter Flachstahl GmbH | 22MnB5 | ✓ | ✓ |
| ArcelorMittal | Usibor® 1500-AS | ✓ | |
| | Usibor® 1500-GI | | ✓ |
| | Usibor® 1500-GA | ✓ | ✓ |
| | 22MnB5 | ✓ | ✓ |
| ThyssenKrupp Steel AG | MBW-W® 1500 | ✓ | ✓ |
| | MBW-K® 1500 | ✓ | ✓ |
| | MBW-W® 1500 +AS | ✓ | |
| | MBW-K® 1500 -xtec® | ✓ | ✓ |
| voestalpine AG | phs-ultraform | ✓ | ✓ |

Tabelle 2.4: Einsatzmöglichkeiten verschiedener Produkte der Stahlhersteller, [ThyssenKrupp Steel AG, 2009], ArcelorMittal [2013b]

Welcher Vergütungsstahl tatsächlich eingesetzt wird, hängt von der Komplexität der Bauteile, den Prozessparametern und dem gewählten Herstellungsverfahren ab. In Tabelle 2.4 ist die Eignung einiger Werkstoffe für das direkte oder indirekte Verfahren angeführt. [K. Karbasian, 2010], [Hoesch Hohenlimburg GmbH, 2006], [ThyssenKrupp Steel AG, 2009], [Salzgitter Flachstahl GmbH, 2007]

2.2.2 Beschichtungen

Der zur Austenitisierung notwendige Erwärmungsprozess führt bei einem unbeschichteten borlegierten Vergütungsstahl zu einer Oxidationsreaktion mit Luftsauerstoff und anderen oxidierenden Gasen. Dabei kommt es zur Ausbildung von Zunder. Diese Zunderschicht ist rau und spröde, was zu einem hohen abrasiven Verschleiß des Umformwerkzeuges führt. Durch das Abplatzen der Zunderschicht kommt es des Weiteren zur Verunreinigung des Umformwerkzeuges. Eine kontinuierliche Reinigung ist somit erforderlich. Diese wirkt sich negativ auf die Effizienz des Fertigungsprozesses aus, da Zykluszeiten nicht eingehalten werden können. Des Weiteren müssen die Bauteile nach dem Presshärten mittels Sandstrahlanlagen aufwendig gereinigt werden. Folgeoperationen wie z.B. Schweißen oder KTL- Lackieren sind sonst nicht möglich. Um den abrasiven Verschleiß zu verringern und die Durchführbarkeit der Folgeoperationen zu gewährleisten muss die Zunderbildung während des Erwärmungsvorgangs verhindert werden. Beim unbeschichteten 22MnB5 wird dies durch Öfen mit Schutzgasatmosphäre erreicht. Beim Transport des Materials zur Presse kommt es aber trotzdem zur Oxidationsreaktion mit Luftsauerstoff und dadurch zur Bildung von Zunder. Dies kann nur durch die Verwendung eines beschichteten borlegierten Vergütungsstahls verhindert werden. Für die Erwärmung von beschichtetem Material ist des Weiteren keine Schutzgasatmosphäre notwendig. Seitens der Stahlhersteller werden derzeit mehrere Beschichtungssysteme angeboten, welche die Zunderbildung verhindern. Das sind Zink, Al-Si, x-tec® und GammaProtect® - Beschichtungen. [K. Karbasian, 2010], [Veit et al., 2011a], [Misholi, 2010], [Gödicke, 2012]

Feuerverzinkung Z

Das Aufbringen der Zink- Beschichtung auf das Ausgangsmaterial erfolgt durch Feuerverzinken, einem Schmelztauchverfahren. Dieser feuerverzinkte Vergütungsstahl wird beim indirekten Presshärten eingesetzt, da es beim direkten Verfahren zu einer Zinkanlagerung an den Korngrenzen kommt. Dies geschieht aufgrund der Umformung bei Austenitisierungstemperatur und führt zu verzögerten Rissen in den Bauteilen. Ein weiterer Nachteil ist die Bildung von lose haftenden Oxidpartikeln an der Oberfläche, die während des Aushärtens entstehen. Dadurch müssen beim indirekten Presshärten die Bauteile nachbehandelt werden um Probleme bei Folgeoperationen wie z.B. beim Lackieren zu vermeiden. Der wesentliche Vorteil der Feuerverzinkung ist der kathodische Korrosionsschutz. Bei einer Beschädigung der Beschichtung übernehmen die benachbarten Bereiche die Funktion einer Opferanode und verhindern dadurch die Korrosion des Grundwerkstoffes, Abbildung 2.9. Bei Erwärmung des Materials auf Austenitisierungstemperatur ist dieser kathodische Korrosionsschutz geringer als im Ausgangszustand. Der Grund dafür ist die Diffusion von Eisen in die Beschichtung, wodurch es aufgrund der Bildung von Rotrost zu Korrosion kommen kann. [Veit et al., 2011a], [P. Dick, 2008], [Goedicke et al., 2012]

Eine Neuentwicklung der voestalpine AG, der feuerverzinkte borlegierte Vergütungsstahl phs®- ultraform kann jedoch sowohl für das indirekte, als auch für das direkte Verfahren eingesetzt werden.[voestalpine AG, 2012]

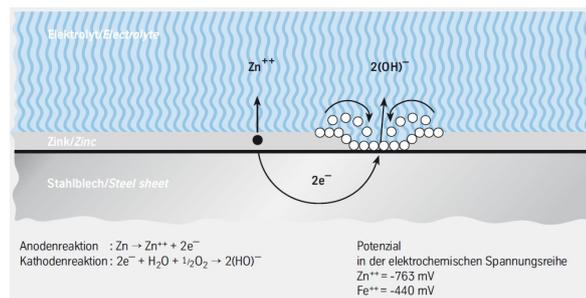


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der kathodischen Schutzwirkung von Zink, ThyssenKrupp Steel AG [2012]

Feueraluminierung AS

Die Herstellung eines feueraluminierten Vergütungsstahls, wie z.B. Usibor® 1500-AS (ArcelorMittal) und MBW-W® 1500 +AS (ThyssenKrupp Steel AG), erfolgt wie bei der Feuerverzinkung im kontinuierlichen Durchlauf durch einen Ofen mit anschließendem Metallbad. Der AlSi-Überzug besteht aus 87% Aluminium, 10% Silizium und 3% Eisen. Bei der Feueraluminierung kommt es zu einer Verbindung der Beschichtung mit dem Grundmaterial. Der Aufbau ist in der Abbildung 2.10 dargestellt.

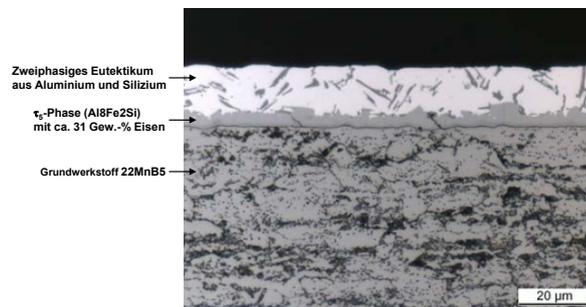


Abbildung 2.10: AlSi- beschichteter 22MnB5 im Anlieferungszustand, Veit et al. [2011a]

Diese Beschichtung bietet einen rein mechanischen Korrosionsschutz und ist nur für das direkte Presshärten einsetzbar. Seitens der Anwender wird der borlegierte Vergütungsstahl mit AlSi- Beschichtung auch bevorzugt für dieses Verfahren eingesetzt. Beim Einsatz im indirekten Verfahren würde es zur Beschädigung der Beschichtung und daraus resultierend zur Zunderbildung kommen.

Der Einsatz von AlSi - beschichtetem Material stellt hohe Anforderungen an den Erwärmungsprozess und ist nur durch das Einhalten bestimmter Prozessparameter möglich. Die Schmelztemperatur der Beschichtung liegt mit 580-600°C, deutlich unter der des Grundmaterials. Während der Austenitisierung der Formplatte kommt es zu einer Diffusion von Eisen in die AlSi- Beschichtung. Dadurch wird die Schmelztemperatur auf 1100°C erhöht.

Untersuchungen in Veit et al. [2011a] haben gezeigt, dass bei derzeit industriell verwendeten Erwärmungstechnologien wie Rollenherd- oder Hubbalkenöfen ein Aufschmelzen der Beschichtung aufgrund der benötigten Heizraten nicht vermieden werden kann. Während der Erwärmung der Formplatte kommt es zur Ausbildung unterschiedlicher Oberflächenstrukturen, Abbildung 2.11. Bei Erwärmungstemperaturen bis 99°C ist noch keine Änderung der Oberflächenstruktur erkennbar. Die Oberfläche entspricht dem Anlieferungszustand. Bei weiterer Erwärmung kommt es bei 591°C zu einem Übergang der Beschichtung in eine flüssige Phase, welche dann bei 949°C vollständig wiedererstartet. Durch diese weitere Phasenumwandlung kommt es zur Ausbildung einer komplett neuen Struktur der Beschichtung.[ThyssenKrupp Steel AG, 2008],[ThyssenKrupp Steel AG, 2012],[Veit et al., 2011a]

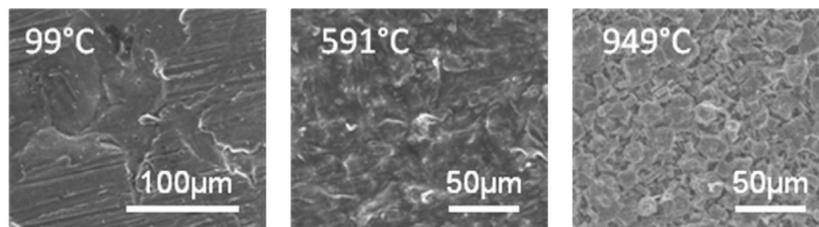


Abbildung 2.11: Phasenumwandlung des AlSi beschichteten 22MnB5 unter dem Rasterelektronenmikroskop, Veit et al. [2011a]

Von wesentlicher Bedeutung für die Ausbildung dieser Gefügestruktur ist die Erwärmungsdauer, die eine vollständige Durchlegierung der Beschichtung gewährleisten muss. Dies wird bei konventioneller Erwärmung nach fünf bis sieben Minuten erreicht. Kürzere Erwärmungszeiten und damit höhere Heizraten, können wie im Kapitel 2.3.2 beschrieben, durch die induktive Erwärmungstechnologie erreicht werden. Bei der induktiven Erwärmung von unbeschichtetem Material werden die gleichen mechanischen Eigenschaften, wie bei konventioneller Erwärmung erzielt. Beim beschichteten Material hingegen, kommt zu einer Anhäufung der AlSi-Beschichtung in gewissen Bereichen der Formplatte. Der Grund dafür sind die Kräfte des magnetischen Wechselfeldes. Des Weiteren kann ein Teil der Beschichtung von der Formplatte abtropfen. Diese Effekte können mit reiner induktiver Erwärmung nicht verhindert werden. Abhilfe bietet ein kombiniertes Erwärmungskonzept für AlSi-beschichtete Formplatinen, welches aus vier individuellen Erwärmungsstufen besteht und in der Abbildung 2.12 dargestellt ist. Die Auswirkungen der kombinierten induktiven Erwärmung auf die AlSi-Beschichtung wurde in Veit et al. [2011a] näher untersucht. Dabei wurde das Material in 100 Sekunden auf 930°C erwärmt und anschließend für weitere 25 Sekunden auf dieser Temperatur gehalten. Als Referenz wurden Formplatinen für sechs Minuten in einem Kammerofen auf 930°C erwärmt. Bei beiden Erwärmungsmethoden wurden die Formplatinen anschließend im Wasser abgeschreckt. Der Vergleich der Erwärmungskonzepte erfolgte über eine EDX-Analyse. Die daraus erhaltenen Phasenverteilungen innerhalb der Beschichtung sind in Abbildung 2.13 dargestellt.[Veit et al., 2011a]

Dabei konnte festgestellt werden, dass der Aufbau der Beschichtung bei beiden Erwärmungsmethoden gleich ist. Allerdings sind Unterschiede bei der Dicke der Diffusionsschicht erkennbar. Des Weiteren ist bei der konventionellen Erwärmung der Fe Gehalt in der Si-reichen Schicht deutlich höher als bei der kombinierten induktiven Erwärmung.

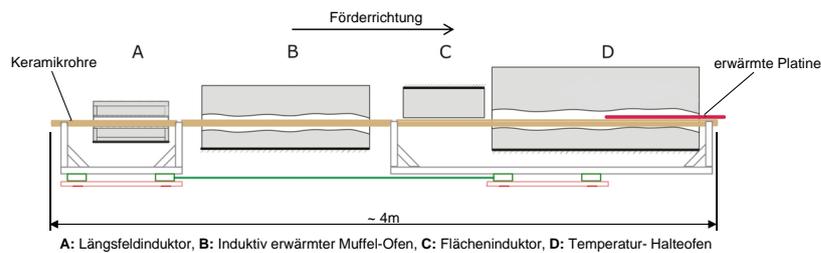
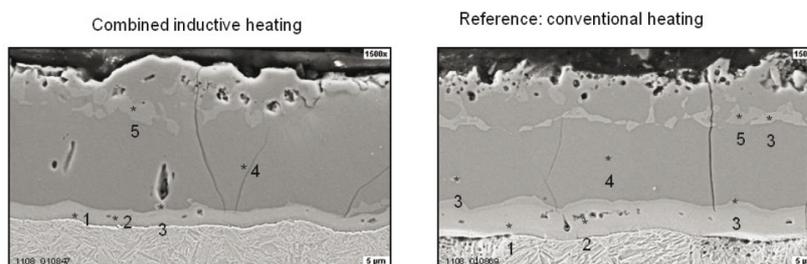


Abbildung 2.12: Kombinierte Induktionsanlage für die Erwärmung AlSi- beschichteter Formplatinen, Veit et al. [2011 a]



| Point of analysis | Al At% | Si At% | Fe At% | Phase | Crystal system |
|-------------------|--------|--------|--------|-----------------------------|----------------|
| 1 | 5,8 | 2,3 | 91,9 | α -Fe | cubic |
| 2 | 18,4 | 9,5 | 72,1 | $Fe_3(Al_{1-x}Si_x)$ | cubic |
| 3 | 41,8 | 15,0 | 43,2 | $Fe(Al_{1-x}Si_x)$ | cubic |
| 4 | 66,7 | 4,2 | 29,1 | Fe_2Al_5 | orthorombic |
| 5 | 51,5 | 14,2 | 34,3 | τ_1 $Fe_3(Al,Si)_5$ | triclinic |

Abbildung 2.13: Phasenverteilung in der AlSi- Beschichtung bei verschiedenen Erwärmungskonzepten, Veit et al. [2011 a]

Dadurch ergibt sich ein deutlich höherer Grad der Legierung. Unterschiede ergeben sich auch in der Rauigkeit der Oberfläche. Diese ist bei der konventionellen Erwärmung höher.[Veit et al., 2011 a]

Wesentliche Nachteile der AlSi- Beschichtung ergeben sich durch die hohen Rohmaterialkosten und die vorgegebene Erwärmungsdauer von fünf bis sieben Minuten, welche für die Diffusionsvorgänge notwendig ist. Bei der Wärmebehandlung durch Rollenherdöfen kommt es des Weiteren zu einer Reaktion der Beschichtung mit den keramischen Förderrollen. Dieser Vorgang wird in Kapitel 2.3.1 näher beschrieben. Trotz genannter Schwächen ist der Einsatz dieser Beschichtungsvariante weit verbreitet und wächst stetig.[Pfeifer et al., 2011]

Beschichtung x-tec®

Die Beschichtung des MBW-W® 1500 mit x-tec® ist eine Alternative zum AlSi-beschichteten Material MBW-W® 1500 +AS. Die x-tec®-Beschichtung ist ein multifunktionales Lacksystem das auf Nanotechnologie basiert. Sie besteht aus einer Verbindung organischer und anorganischer Materialien, welcher Aluminium- Partikel beigemischt werden. Durch weitere Additive wie Wachs (indirektes Verfahren) und Additive auf Basis von Graphit (direktes Verfahren) werden hervorragende Reibcharakteristika erzielt. Dadurch können Risse im Bauteil und die Faltenbildung während der Umformung verhindert werden. Des Weiteren wird die Bildung von Zunder vermieden. Dies erhöht die Standzeit des Umformwerkzeuges und die Produktivität. Im Gegensatz zur AlSi-Beschichtung ist diese Beschichtungsvariante an keine definierte Diffusionszeit, für die Ausbildung der optimalen Schutzschicht, gebunden. Dadurch lassen sich hohe Heizraten realisieren. Der wesentliche Nachteil ist jedoch die Bauteilnachbehandlung. Dafür sind Folgeoperationen wie z.B. Schweißen oder Lackieren erforderlich. Diese Nachbehandlung soll bei der x-tec® - Beschichtung der 2. Generation nicht mehr notwendig sein. [Paar et al., 2008]

| | Beschichtung | |
|---------------------|-----------------------------------|---|
| | x-tec® - 1. Generation (Serie) | x-tec® - 2. Generation (Entwicklungsprodukt) |
| Typische Auflage | 7-8µm | 2-3µm |
| Warmumformverfahren | direkt/indirekt | direkt/indirekt |
| Zunderschutz | ja | ja |
| Nachbehandlung | Strahlen | keine |
| Schweißignung | nein | ja |
| KT- Lackierbarkeit | nein | ja |
| Korrosionsschutz | nicht vorhanden | nicht vorhanden |

Tabelle 2.5: Vergleich der x-tec® - Beschichtungen (1. und 2. Generation), in Anlehnung an Köyer et al. [2010]

Beschichtung GammaProtect®

Die GammaProtect® - Beschichtung ist eine Neuentwicklung der ThyssenKrupp Steel AG und eignet sich für das direkte und indirekte Presshärten. Im Anlieferungszustand besteht die Beschichtung aus Zink und einem geringen Anteil an Nickel. Durch den Erwärmungsprozess kommt es zu einer Diffusion von Eisen in die Beschichtung, wodurch die Schichtdicke um das Doppelte, auf 20-25µm, anwächst. Dies führt dazu, dass die Gamma-Schicht nur mehr in geringen Teilen vorhanden ist und sich eine ZnNiFe - Schicht ausbildet. Des Weiteren diffundiert Mangan aus dem Grundmaterial in die Beschichtung, wodurch es zu der Bildung einer Oxidschicht aus Mangan- und Zinkoxiden an der Oberfläche kommt. Der Aufbau der Beschichtung, nach dem Erwärmungsprozess, ist in der Abbildung 2.14 dargestellt.

Im Gegensatz zum feueraluminierten Produkt der ThyssenKrupp Steel AG, verfügt der MBW-®1500 +GammaProtect® über einen aktiven Korrosionsschutz und zeichnet sich durch ein gutes Umformverhalten aus. Eine Nachbehandlung der pressgehärteten Bauteile ist nicht notwendig. In Untersuchungen von Köyer et al. [2010] konnte die KTL-Lackierbarkeit und die Schweißignung dieser Beschichtungsvariante nachgewiesen werden.

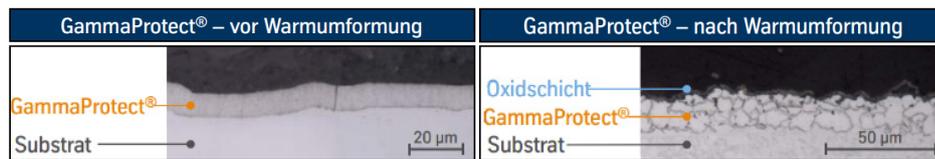


Abbildung 2.14: GammaProtect® - Schutzschicht vor und nach der Warmumformung, ThyssenKrupp AG [2012a]

Diese Beschichtung befindet sich noch im Entwicklungsstadium und ist derzeit noch nicht am Markt erhältlich. [Köyer et al., 2010]

Oxidationsschutz durch Öl

Eine alternative Methode die Oxidation während des Erwärmungsprozesses zu verhindern ist die Benetzung der Formplattine mit speziellem Öl. In Untersuchungen von K. Mori [2009] konnte die Eigenschaft des Oxidationsschutzes der Öle G-2576 und G-2578T, der Nihon Kohsakyu Ltd., nachgewiesen werden. Dabei wurden die Formplattinen mittels eines elektrischen Widerstandsofens auf bis zu 900°C erwärmt und anschließend ohne Umformung an Luft abgekühlt. Weitere Versuche mittels eines U-förmigen Biegewerkzeuges lieferten zusätzliche Informationen über erreichbare Härtewerte. [K. Mori, 2009, S.267-270]

2.2.3 Tailored Welded Blanks

Als „Tailored Welded Blanks“ werden maßgeschneiderte Bleche bezeichnet, welche durch Laserschweißen miteinander verbunden sind. Dadurch ist nicht nur eine Kombination von unterschiedlichen Stahlgüten, sondern auch von Werkstoffen verschiedener Blechstärke möglich. Die wesentlichen Vorteile sind die Realisierung unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften innerhalb eines Bauteils (Zugfestigkeit, Bruchdehnung,...), die Materialeinsparung (Gewichtsreduzierung), sowie die Reduktion der Kosten pro Bauteil und der Investitionskosten. Die Einsatzmöglichkeiten von TWB sind vielfältig und werden in der Abbildung 2.15 aufgezeigt. Der Bedarf an diesen lasergeschweißten Plattinen nimmt stetig zu. [ThyssenKrupp AG, 2009], [ArcelorMittal, 2012]

Vor allem bei sicherheitsrelevanten Bauteilen spielen TWB eine wesentliche Rolle. Einerseits sollen die Bauteile bei einem Crash formstabil bleiben und andererseits die Energie des Aufpralls absorbieren. Die Abbildung 2.16 zeigt eine Lösung der ThyssenKrupp Steel AG. Dabei werden die Werkstoffe MBW-W® 1500+AS und MHZ340+AS miteinander kombiniert.

Der Stahlhersteller ArcelorMittal kombiniert, im Vergleich zur B-Säule der ThyssenKrupp Steel AG, die Werkstoffe Usibor® 1500P und Ductibor®500P. Eine weitere Möglichkeit gezielt auf die mechanischen Eigenschaften innerhalb eines Bauteils einzuwirken ist das „Tailored Tempering“. Dies wird entweder durch die Temperierung des Umformwerkzeuges, siehe Kapitel 2.1.1, oder durch eine partielle Erwärmung der Formplattine erreicht. Das Erwärmungsverfahren wird im Kapitel 2.3.4 näher beschrieben.

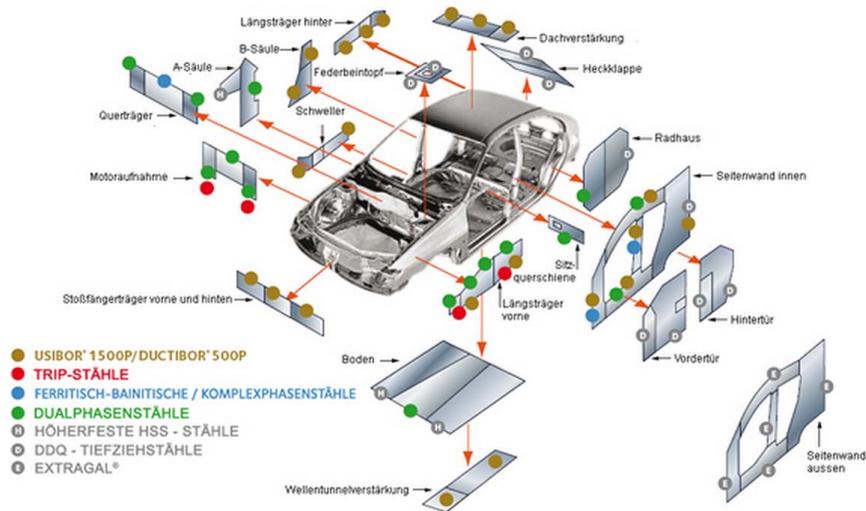


Abbildung 2.15: Anwendungsbereiche von TWB, [ArcelorMittal, 2012]

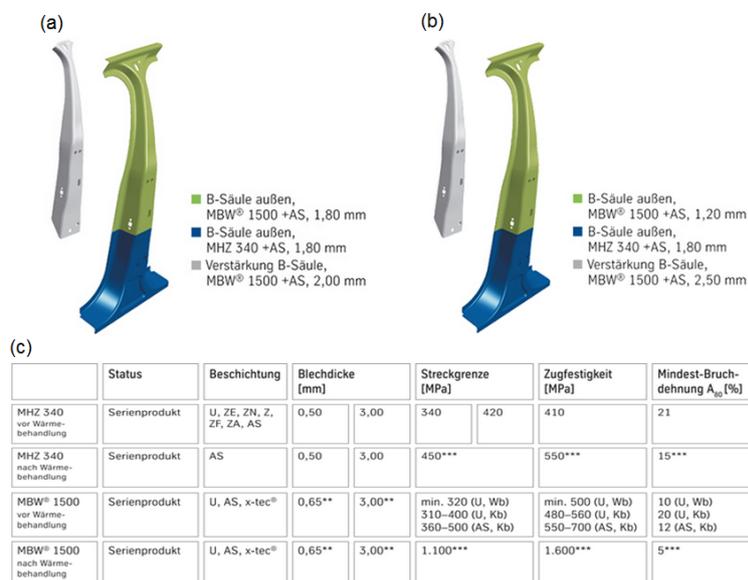


Abbildung 2.16: Pressgehärtete B-Säule als TWB, (a) ohne Dickensprung, (b) mit Dickensprung, (c) Übersicht der Werkstoffeigenschaften vor und nach der Wärmebehandlung, [ThyssenKrupp AG, 2009]

2.3 Erwärmungstechnologien

Ein effizienter Presshärteprozess setzt die Optimierung jedes einzelnen Teilprozesses voraus. Das größte Optimierungspotenzial hat dabei der Erwärmungsprozess, welcher aber an viele vorgegebene Prozessparameter gebunden ist. Eine wesentliche Vorgabe der Automobilhersteller ist die Reduktion der Zykluszeit und damit die Steigerung des Produktionsausstoßes. Mit dieser Vorgabe muss natürlich auch die eingesetzte Erwärmungstechnologie mithalten können. Die Grundaufgabe der Erwärmungsanlage ist die Erwärmung des borlegierten Vergütungsstahls bis zur vollständigen Austenitisierung. Für den Erwärmungsprozess ist es wesentlich ob ein un- oder beschichtetes Material erwärmt werden soll. Während für unbeschichtetes Material eine Schutzgasatmosphäre, zur Vermeidung von Zunderbildung, vorhanden sein muss, ist für die Erwärmung von beschichtetem Material die Erwärmungskurve maßgebend, um die Diffusionsvorgänge zwischen Grundmaterial und der Beschichtung zu garantieren.

Durch die Entwicklung verschiedenster Ofen- bzw. Erwärmungskonzepte konnten, in den letzten Jahren, auch im Bereich der Erwärmungstechnologien einige Neuerungen vorgestellt werden. Trotz der individuellen Vor- und Nachteile der einzelnen Erwärmungstechnologien ist der Einsatz von Rollenherdöfen im Presshärteprozess nach wie vor dominant. Die einzelnen Erwärmungstechnologien werden in Kapitel 2.3.1, 2.3.2 und 2.3.3 näher beschrieben. [Lehmann, 2010]

2.3.1 Konventionelle Erwärmungsanlagen

Unter konventionellen Erwärmungsanlagen werden Rollenherd- und Hubbalkenöfen verstanden. Diese beiden Ofenkonzepte unterscheiden sich durch das Transportsystem.

Schutzgasatmosphäre

Die Notwendigkeit einer Schutzgasatmosphäre im Ofeninnenraum hängt davon ab, welches Material wärmebehandelt werden soll. Für die Erwärmung von unbeschichtetem 22MnB5 ist, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, eine kontrollierte Atmosphäre zwingend notwendig. Dadurch wird eine Oxidation der Oberfläche vermieden. Unter kontrollierter Atmosphäre wird die Flutung des Ofeninnenraumes mit getrockneter Luft oder Schutzgas verstanden. Bei der Erwärmung von beschichtetem Material ist eine Schutzgasatmosphäre nicht erforderlich. Der Oxidationsschutz ist durch die Beschichtung gegeben. [Pfeifer et al., 2011], [H. Lehmann, 2008]

Beheizung des Ofeninnenraumes

Die Beheizung des Ofenraumes kann entweder durch die Verbrennung eines Gases, durch eine elektrische Widerstandsheizung oder durch eine Kombination dieser beiden Beheizungsvarianten, der Hybrid-Beheizung, erfolgen. Die Wärmeübertragung auf die Formplatinen erfolgt dabei durch Strahlung, Konvektion und durch Kontaktleitung zwischen der Formplatte und dem Transportsystem. Während früher die Erwärmung des Ofeninnenraumes durch eine offene Flamme realisiert wurde, werden in modernen konventionellen Ofenanlagen nur

mehr Mantelstrahlrohre oder elektrische Widerstandsheizungen verwendet. Grund dafür ist, dass sich bei der Erwärmung durch eine offene Flamme Wasserstoff im Gefüge der Platine einlagert und es dadurch zu einer verzögerten Wasserstoff-Versprödung kommen kann. [Pfeifer et al., 2011], [H. Lehmann, 2008]

• Indirekte Gasheizung

Bei der indirekten Gasbeheizung erfolgt die Verbrennung des Erdgases nicht direkt im Ofeninnenraum sondern in gasdichten Mantelstrahlrohren. Der Grund dafür ist die Entstehung feuchter Abgase nach der Verbrennung. Bei direkter Gasbeheizung würde es zu einer Wasserstoff-Versprödung der Bauteile kommen. Dadurch muss die Verbrennung abgekapselt vom Ofeninnenraum, in Mantelstrahlrohr-Brennern, stattfinden. Dabei erwärmen die heißen Abgase die Oberfläche des gasdichten Mantelstrahlrohres und dadurch auch den Ofeninnenraum. Die Gasbrenner werden bei einem Rollenherdofen entlang der Heizstrecke oberhalb und unterhalb der Heizstrecke positioniert, wobei der Ofeninnenraum in Längsrichtung in unterschiedliche Heizzonen unterteilt ist. Die Abbildung 2.17 zeigt den typischen Aufbau eines Mantelstrahlrohr- Brenners.[Pfeifer et al., 2011]

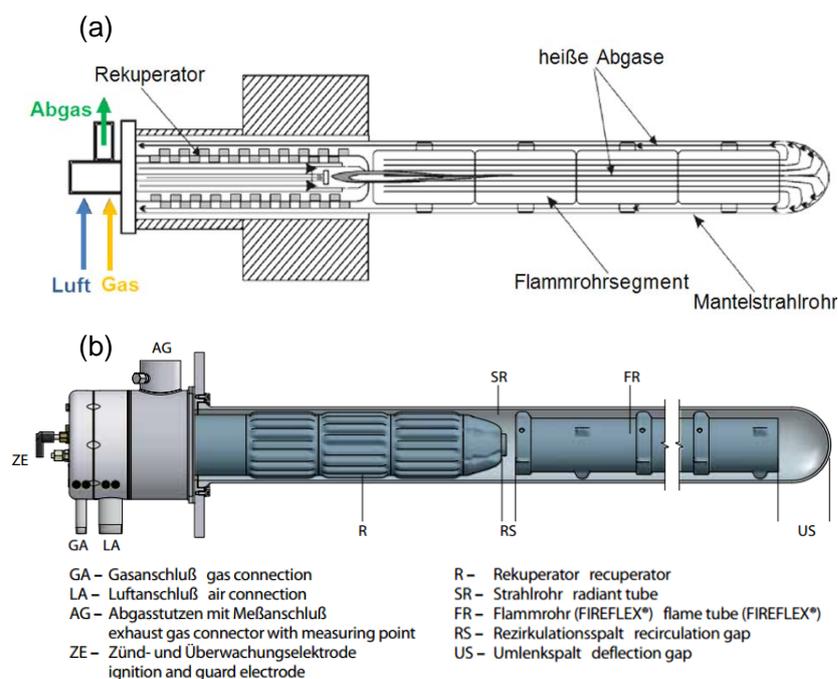


Abbildung 2.17: Schematischer Aufbau eines Mantelstrahlrohr - Brenners mit Rekuperator, (a) Pfeifer et al. [2011], (b) IBS Industrie-Brenner-Systeme GmbH [2013]

Die hohen thermischen Belastungen erfordert den Einsatz spezieller Materialien für das Mantelstrahl- und Flammrohr. Mantelstrahlrohre werden aus hitzebeständigem Stahl oder aus Keramik (SiSiC) gefertigt. Ein wesentlicher Nachteil metallischer Mantelstrahlrohre ist, dass sie sich aufgrund der hohen Temperaturen und des Eigengewichtes verbiegen. Um diese Biegung auszugleichen müssen sie in definierten Zeitabständen um 180° gedreht oder

auf Konsolen gelagert werden, welche die Durchbiegung verringern. Das innenliegende Flammrohr muss sich dieser Verformung anpassen und ist deswegen, wie aus der Abbildung 2.18 ersichtlich, aus segmentierten keramischen Elementen aufgebaut. [Pfeifer et al., 2011]



Abbildung 2.18: Aufbau des keramisches (a) Segmentflamrohrs SICAFLX® und (b) Strahlrohrs REKUMAT® C, Elster GmbH [2011], WS Wärmeprozessstechnik GmbH [2013]

Aufgrund der Verformung metallischer Mantelstrahlrohre werden derzeit zunehmend keramische Strahlrohre für die indirekte Beheizung verwendet, Abbildung 2.18. Diese bleiben bei Betriebstemperaturen bis 1350°C formstabil, wodurch ein Nachdrehen des Brenners nicht notwendig ist. Des Weiteren können die keramischen Mantelstrahlrohre bis $> 50\text{W}/\text{cm}^2$ belastet werden. Die Belastung der metallischen Bauart ist mit $20 \text{ bis } 38\text{W}/\text{cm}^2$ begrenzt. Der Einsatz keramischer Mantelstrahlrohre ermöglicht eine Reduktion der Brenneranzahl und des Durchmessers. Dadurch werden der Preis und das Gewicht gesenkt. Die Strahlrohre der Gasbrenner werden oberhalb der Transportebene in Keramik und unterhalb aus hitzebeständigem Stahl ausgeführt. Bei einem Bruch der keramischen Rollen schützt der Stahl die unteren Brenner vor herunterfallenden Rollenteilen. Durch den Einsatz von Rekuperatoren, siehe Abbildung 2.17, können feuerungstechnische Wirkungsgrade bis 72 Prozent erreicht werden. Der Rekuperator nutzt dabei die Abwärme des Abgases zur Erwärmung der zugeführten kalten Verbrennungsluft. Er wird entweder aus hitzebeständigem Stahl oder aus Keramik gefertigt. Keramische Rekuperatoren haben eine deutliche geringere Oberfläche für den Wärmeaustausch. Dies führt zu einer geringeren Luftvorerwärmung und senkt den feuerungstechnischen Wirkungsgrad. [Pfeifer et al., 2011]

• Direkte elektrische Beheizung

Die Erwärmung des Ofeninnenraumes erfolgt dabei direkt durch eine elektrische Widerstandsbeheizung. Auf mehreren keramischen Trägerrohren sind dabei Heizleiter spiralförmig aufgewickelt. Diese stromdurchflossene Heizleiter erwärmen den Ofeninnenraum und dadurch die Formplatinen. Die Abbildung 2.19 zeigt die elektrische Widerstandsheizung während des Betriebs.

Wesentliche Vorteile ergeben sich aufgrund niedriger Investitionskosten, der einfachen Bauweise und der langen Lebensdauer. Als Nachteile dieser Erwärmungsvariante können die begrenzte Heizleistung, die Empfindlichkeit der Heizelemente gegen bestimmte Schutzatmosphären und kostenintensive Zusatzgeräte (z.B. Thyristoren) identifiziert werden. [Pfeifer et al., 2011]

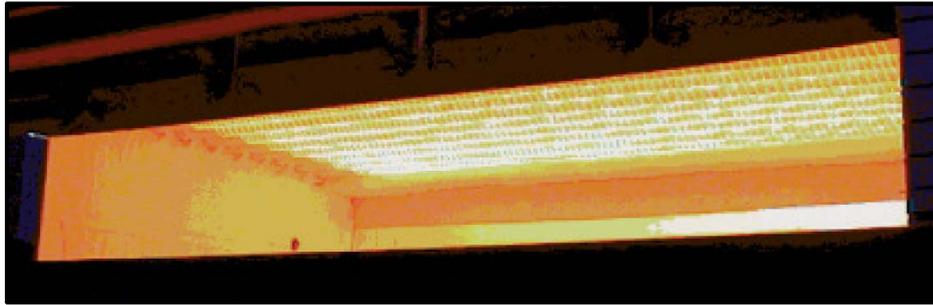


Abbildung 2.19: Elektrische Widerstandsheizung eines Rollenherdofens der Schwartz GmbH, [Pfeifer et al., 2011]

- **Hybrid-Beheizung**

Die Hybrid-Beheizung ist eine Kombination der indirekten Gasbeheizung und der direkten elektrischen Widerstandsheizung. Dabei wird der vordere Bereich des Ofens über Mantelstrahlrohr- Brenner beheizt. Der Grund dafür ist der enorme Bedarf an Heizleistung in den ersten Erwärmungszonen. Die elektrische Widerstandsheizung ist im hinteren Bereich des Ofens montiert und muss das Fördergut nur mehr mit einem geringen Temperaturgradienten erwärmen. Der Großteil der Heizleistung wird für die Kompensation der Ofenverluste benötigt. Die Ofeninnenraum-Temperatur wird bei dieser Beheizung über Thyristoren geregelt. Dadurch können Temperaturschwankungen von nur $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ realisiert werden. Im Vergleich zu rein gasbeheizten Öfen sind bei kombinierten Beheizungsvarianten die Investitionskosten und der Wartungsaufwand, aufgrund der elektrischen Widerstandsheizung, geringer. Der Aufbau eines Rollenherdofens mit Hybrid-Beheizung ist in Abbildung 2.20 dargestellt.[Pfeifer et al., 2011]

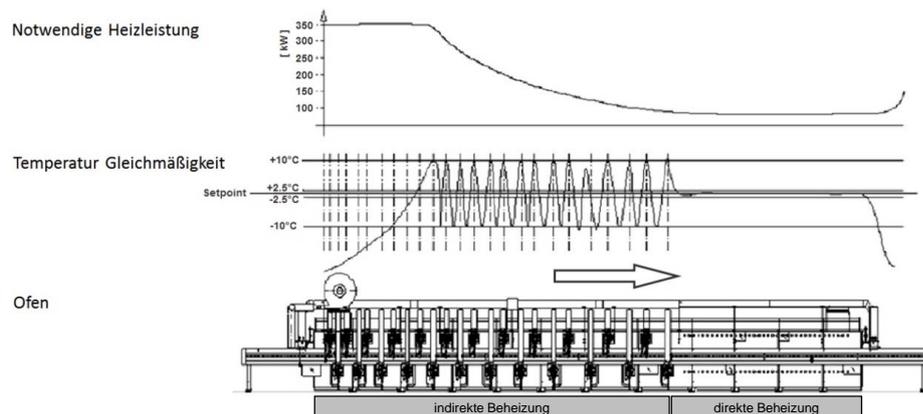


Abbildung 2.20: Rollenherdofen mit Hybrid-Beheizung der Schwartz GmbH, Pfeifer et al. [2011]

Rollenherdöfen

Derzeit werden Rollenherdöfen bevorzugt für die Erwärmung im Presshärteprozess eingesetzt, Abbildung 2.21. Sie haben sich in den letzten Jahren gegenüber anderen konventionellen Erwärmungskonzepten durchgesetzt. Sie verfügen aktuell, laut Pfeifer et al. [2011], über einen Marktanteil von mehr als 80 Prozent. Diese Erwärmungsanlagen kommen sowohl beim direkten Presshärten als auch beim indirekten Verfahren zum Einsatz. Die Ofenanlagen unterscheiden sich lediglich darin, dass beim indirekten Verfahren für den Transport der Bauteile Warenträger und ein Warenträger - Rückfördersystem integriert sind. Der Grund dafür ist die Komplexität der Bauteile, wodurch beim Transport mittels einfacher Rollen eine Positionierung nicht möglich wäre. Beim direkten Presshärten hingegen werden nur ebene Formplatinen erwärmt. Dadurch entfällt der Einsatz von Warenträgern.



Abbildung 2.21: Rollenherdöfen für das direkte Presshärten, (a) Schwartz GmbH und (b) LOI Thermoprozess GmbH

Nachfolgend werden nur Rollenherdöfen beschrieben, welche beim direkten Verfahren eingesetzt werden. Diese sind modular aufgebaut und bestehen aus einem Einlaufmodul, dem Erwärmungsmodul mit Rollenbetrieb und einem Auslaufmodul, Abbildung 2.22. Die Basis des Rollenherdofens bildet eine Stahlkonstruktion. Die Isolation des Ofeninnenraumes erfolgt durch keramische Fasermodule, Feuerleichtbeton, Isolier-Bauplatten oder durch Isoliersteine. Dadurch liegt bei einer Ofentemperatur von 950°C eine Außentemperatur von 40K über Raumtemperatur vor. Sie können wahlweise mit oder ohne Schutzgas betrieben werden, da sie serienmäßig schutzgasdicht geschweißt werden. [Pfeifer et al., 2011]

Der Transport der Formplatinen durch Rollenherdöfen erfolgt diskontinuierlich und besteht in Längsrichtung aus vier Bewegungszonen. Dabei handelt es sich um den Einlaufbereich, den Hauptrollengang, den Übergabebereich innerhalb des Ofens und den Auslaufbereich. Im Serienbetrieb werden die Formplatinen mittels Feeder bzw. Roboter von der Palette auf die angetriebenen Stahlrollen des Einlaufmoduls abgelegt. Anschließend werden sie kontinuierlich in den Ofeninnenraum befördert. Die Transportgeschwindigkeit beträgt bei einem Ofen der Bättenhausen GmbH $112,5\text{mm/s}$ und bei der Schwartz GmbH zwischen $40 - 200\text{mm/s}$. Beim Erreichen des Übergabebereiches werden die Formplatinen auf die Geschwindigkeit des Auslaufbereichs (Schwartz GmbH: $> 2000\text{mm/s}$ und Bättenhausen GmbH: 2000mm/s) beschleunigt. Im Auslaufmodul werden die Formplatinen gestoppt, positioniert und danach mittels Feeder bzw. Roboter, Abbildung 2.23, direkt in die Presse eingelegt.

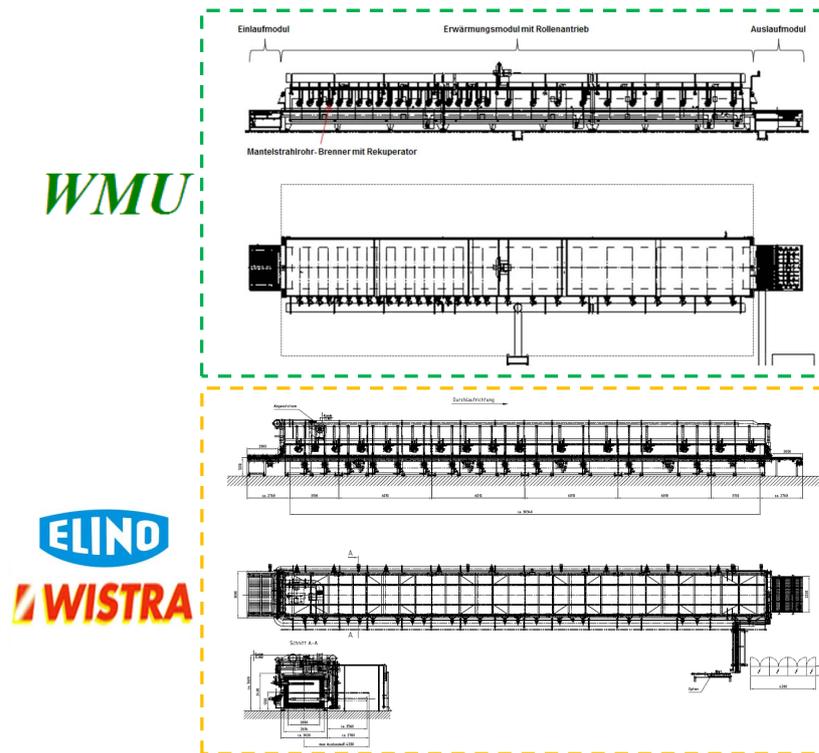


Abbildung 2.22: Modularer Aufbau eines Rollenherdofens der WMU GmbH und der WISTRA GmbH (Fa. Elino), WMU GmbH [2012]



Abbildung 2.23: Entnahme der erwärmten Formplatinen von Auslaufmodul mittels eines Feeders, [Pfeifer et al., 2011, S. 473]

- **Hochtemperaturbeständige Rollen für das Presshärten**

Die prozessbedingt hohen Temperaturen erfordern die Verwendung hochtemperaturbeständiger Materialien im Ofeninnenraum. Dies gilt speziell für die Transportrollen, welche neben den hohen thermischen auch den mechanischen Belastungen standhalten müssen. Derzeit werden Hohlrollen aus dem Werkstoff Sinter-Mullit ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$), Sillimantin 60, Sillimantin 65 und Sillimantin KS sowie Vollrollen aus Quarzglas ($> 99\% SiO_2$ - Fused Silica) dafür eingesetzt. Dies sind spezielle Werkstoffe für den Ofenbau. Die maximale Rollenlänge liegt derzeit bei 3700mm, was laut Fa. Haldenwanger einer maximalen nutzbaren Ofenbreite

te von 2500mm entspricht. Ein wesentliches Kriterium für die Auswahl keramischer Rollen ist die Feuerungsbeständigkeit, welche aber stark belastungsabhängig ist. Während die Werkstoffe Sillimantin 60 und KS bis 1300°C feuerungsbeständig sind, erreichen Sillimantin 65 und Sinter-Mullit Feuerungsbeständigkeiten bis 1350°C. Die Werkstoffe Sillimantin KS und Sinter-Mullit zeichnen sich besonders durch hohe mechanische Belastbarkeit aus. Auf Grund der Länge der Rollen kommt es bei starken mechanischen Belastungen und durch das Eigengewicht zu einem Verbiegen in bestimmten Temperaturbereichen. Diese Verformungen treten vor allem bei Quarzgut-Rollen im Temperaturbereich zwischen 700°C und 800°C auf. Des Weiteren ist die Anwendungstemperatur der Rollen aus Quarzgut auf 1100°C begrenzt. Sie zeichnen sich aber durch hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit und einen kleinen Wärmeausdehnungskoeffizienten aus. [W. HALDENWANGER Technische Keramik GmbH & Co. KG, 2012], [Pfeifer et al., 2011]

Ein wesentlicher Nachteil der keramischen Förderrollen ist die thermochemische Reaktion mit AlSi-beschichtetem Blech. Die Beschichtung schmilzt während des Erwärmungsprozesses auf, dringt in den porösen Rollenwerkstoff ein und verfestigt sich, Abbildung 2.24.



Abbildung 2.24: Thermochemischer Angriff auf Rollen (bei AlSi-beschichtetem Material), Pfeifer et al. [2011]

Insbesondere beim Abkühlen und Aufheizen entstehen Dichteunterschiede im Material und Bereiche mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Diese Faktoren führen zum Bruch der Rolle. Aus diesem Grund müssen "kritische" Rollen präventiv getauscht werden. Laut der Schwartz GmbH handelt es sich dabei um circa zwanzig Rollen pro Monat. Bei Quarzgut-Rollen hingegen ist ein Eindringen von AlSi, aufgrund der glatten Oberfläche, nahezu ausgeschlossen. Die Kosten für eine Rolle liegen jedoch etwa um den Faktor fünf bis sechs höher, als bei Rollen aus Sillimantin. [Pfeifer et al., 2011]

Eine Möglichkeit die keramischen Rollen vor der thermochemischen Reaktion mit der AlSi-Beschichtung zu schützen ist die Beschichtung durch eine Suspension. Diese wurde von der RWTH Aachen, mittels Sol-Gel Verfahren, entwickelt. Durch diese Beschichtung kann die Reaktion der Rollen mit der AlSi-Beschichtung stark reduziert werden. In der Abbildung 2.25 ist der Angriff auf die beschichteten und unbeschichteten keramischen Förderrollen, nach circa 40.000 AlSi-beschichteten Formplatinen vergleichend dargestellt. [Pfeifer et al., 2011]

Eine weitere Alternative ist die Verwendung von Rollen aus einer nichtoxidischen alu-phoben Keramik. Diese Rollen zeigen nach 1500h Kontakt mit AlSi-beschichteten Platinen nur geringe Reaktionen mit der Rollenmatrix. Allerdings kommt es nach Untersuchungen der RWTH Aachen, zu Anwachsungen an der Rollenoberfläche, Abbildung 2.26. Diese können aber abgeschliffen werden, wodurch die Rollen wieder einsatzfähig sind. [Pfeifer et al., 2011]

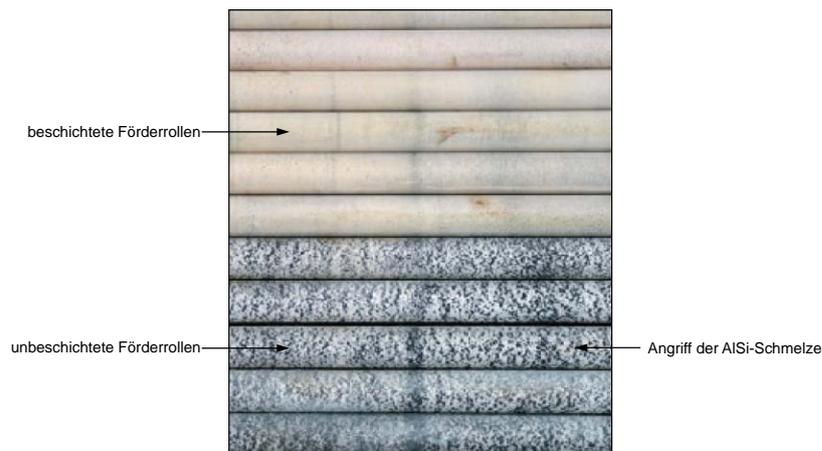


Abbildung 2.25: Thermochemischer Angriff auf un- und beschichtete keramische Rollen, Pfeifer et al. [2011, S. 465]

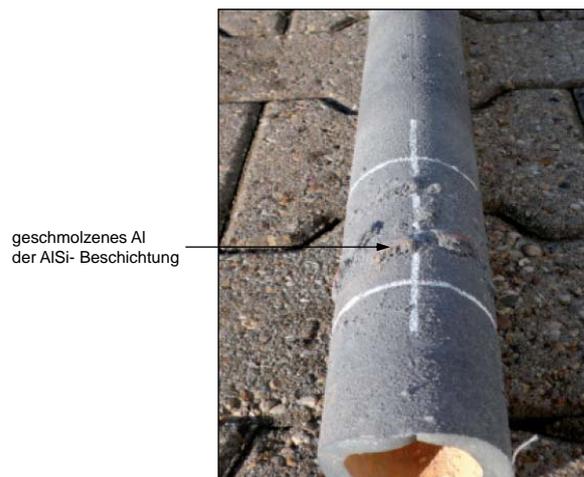


Abbildung 2.26: Anwachungen bei nichtoxidischen aluphoben Keramikrollen, Pfeifer et al. [2011, S. 466]

Die Nachteile dieses alternativen Werkstoffes sind die hohe Wärmeleitfähigkeit und der Preis. Diese Rollen sind bis zu 20 mal teurer, als vergleichbare Rollen aus Sinter-Mullit. [Pfeifer et al., 2011]

Der Antrieb der Rollen kann z.B. durch einen Simplex-Kettenantrieb, einen Duplex-Kettenantrieb oder kettenlos über eine schrägverzahnte Getriebestufe erfolgen, Abbildung 2.27. Im Gegensatz zum Simplex- ist beim Duplex- Antrieb die Rollenteilung variabel. Des Weiteren hält dieser Antrieb deutlich höheren Belastungen stand und es treten aufgrund der größeren Kettenmasse kaum Resonanzen auf.

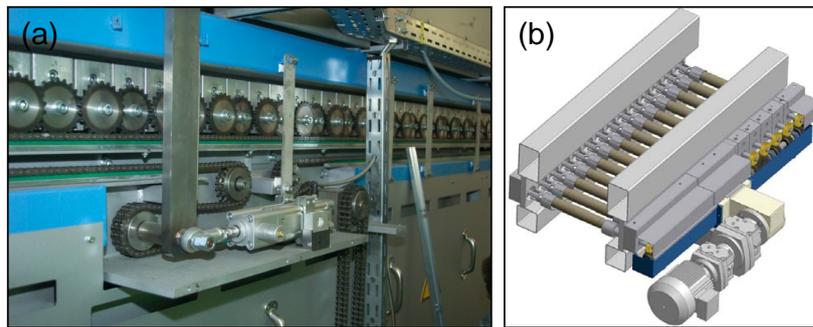


Abbildung 2.27: Antriebe bei Rollenherdöfen, (a) Duplex Antrieb - Antriebsseite mit Spannstation der WISTRA GmbH (Fa. Elinio) und (b) Antrieb der Fa. LOI Thermoprocess GmbH

„Doppel-Decker“ Rollenherdöfen

Ein wesentlicher Nachteil von Rollenherdofenanlagen sind die großen Abmessungen. Diese ergeben sich aufgrund der Vorgaben des Erwärmungsprozesses, des Massendurchsatzes und der geforderte Zykluszeit. Eine Möglichkeit die Baulänge zu reduzieren ist die Erwärmung der Formplatinen in zwei Etagen. Die Schwartz GmbH hat durch die Entwicklung des „Doppel-Decker“ Rollenherdofens dieses zwei Etagen Erwärmungskonzept realisiert. Der Transport der Platine kann mit Warenträger, beim indirekten Presshärten, und ohne Warenträger, beim direkten Verfahren, erfolgen. Der Aufbau eines „Doppel-Decker“ Rollenherdofens ohne Warenträger ist in Abbildung 2.28 dargestellt. Im Vergleich zu Standard-Rollenherdöfen konnte laut Lehmann [2011] durch diese Bauart die Baulänge um 23m, von 57 auf 34m, reduziert werden. Ein wesentliches Kriterium für den Einsatz von Rollenherdöfen ist die erreichbare Zykluszeit. Diese wird beim „Doppel-Decker“ Rollenherdofen der Schwartz GmbH mit $< 13\text{ s}$ angegeben. [Lehmann, 2011]

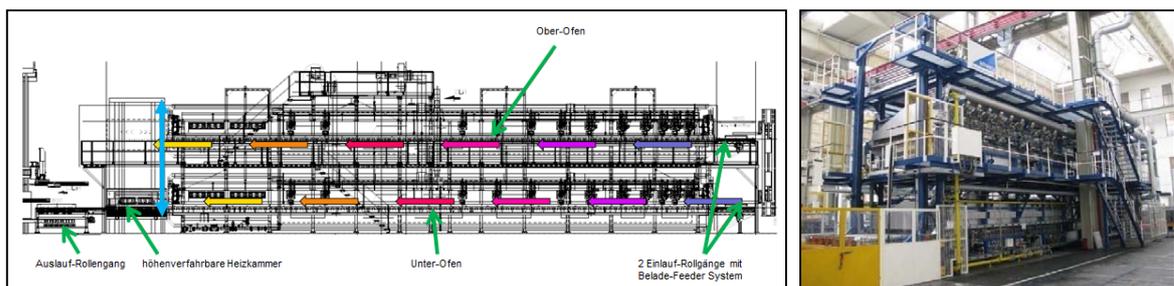


Abbildung 2.28: „Doppel-Decker“ Rollenherdofen ohne Warenträger der Schwartz GmbH

Der Nachteil dieser Anlage sind die Investkosten, die laut Lehmann [2009] etwas höher sind als bei vergleichbaren Standard-Rollenherdöfen.

Der Forderung nach Verkürzung der Länge von Rollenherdofen wird auch der zwei Etagen Rollenherdofen „HotPHASE“ der EBNER Industrieofenbau GmbH gerecht, Abbildung 2.29. Dieses Ofenkonzept wurde im Jahr 2010 vorgestellt und wird von der Ebner GmbH selbst oder als fixer Bestandteil von kompletten Presshärtelinien des Generalunternehmens HFS Hot Forming Solutions GmbH vertrieben.

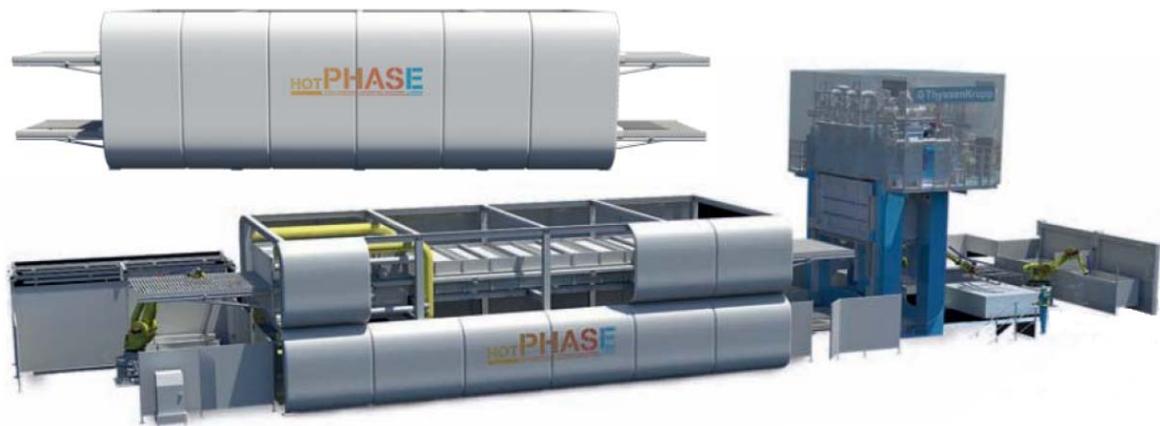


Abbildung 2.29: „HotPHASE“ - Zwei Etagen Rollenherdofen der Ebner GmbH

Hubbalkenöfen

Eine Hubbalkenofenanlage besteht aus einer Beschickungsanlage, einem deckenbeheizten Ofen mit Hubbalkentransportsystem und einer Entnahmemaschine mit automatischem Schnellförderer, Abbildung 2.30. Im Gegensatz zu Rollenherdöfen ist die Mechanik des Transportsystems von Hubbalkenöfen wesentlich aufwendiger. Der kontinuierliche Transport der Formplatinen durch die Erwärmungsanlage erfolgt dabei mittels Hubbalken. Diese nehmen das Fördergut von den Festherden auf und heben es an. Nach dem Erreichen der oberen Stellung transportiert der Hubbalken die Formplatinen vorwärts in horizontaler Richtung. Diese werden in einer Abwärtsbewegung wieder im Ofeninnenraum abgelegt. Der Balken verfährt danach, unter dem Fördergut, in die Ausgangsstellung zurück und wiederholt diese Rechteckbewegung. Das Transportsystem lässt sich präzise einstellen, wodurch sich unterschiedliche Durchlaufzeiten realisieren lassen. Es werden Durchsatzleistungen zwischen 200 bis 5000 kg/h erreicht. Hubbalkenöfen werden entweder indirekt mit Gas oder direkt elektrisch, mit Schutzgasatmosphäre, beheizt. Ein wesentliches Problem dieser Ofenbauart ist die Gasdichtheit. Laut H. Lehmann [2008] ist diese bei Schleusenbetrieb nicht durchgehend gewährleistet. Der Grund dafür ist die Transportmechanik, welche auch die Installation einer optimalen Bodenheizung durch Platzmangel nicht ermöglicht. Weitere Nachteile sind die große Baulänge, die aufwendige Transportmechanik, und der Preis. Des Weiteren kann mit dieser Ofenbauart kein doppelstöckiger Betrieb realisiert werden. [FK Industrieofenbau + Schutzgastechnik GmbH, 2009], [H. Lehmann, 2008]



Abbildung 2.30: Hubbalkenofen, SECO/WARWICK GmbH [2012]

2.3.2 Induktive Erwärmungsanlagen

Bei induktiven Erwärmungsanlagen erfolgt das Aufheizen der Formplatinen nicht über Strahlung, Konvektion oder durch Kontaktleitung, sondern durch ein magnetisches Wechselfeld. Dieses wird von einem stromdurchflossenen wassergekühlten Induktor erzeugt, welcher durch einen Hochfrequenz(HF)-Umrichter gespeist wird. Befindet sich eine Formplatte im wechselnden Magnetfeld des Induktors wird, gemäß dem Induktionsgesetz, ein kurzgeschlossener Wirbelstrom in das Material induziert. Der elektrische Widerstand des Metallkörpers wirkt diesen Wirbelströmen entgegen und bewirkt die Umwandlung von elektrischer Leistung ($P_{el} = U \cdot I^2$) in Heizleistung und dadurch die Erwärmung des Materials (Joule'sches Gesetz). Dieser Wirbelstrom ist dem Induktorstrom entgegengerichtet und baut ein magnetisches Wechselfeld auf das sich mit dem Induktorfeld überlagert und ebenfalls entgegengesetzt ist. Es kommt es zu einer Abnahme der magnetischen Feldstärke H in Richtung Materialmitte. Gleich verhält sich dazu die Stromdichte J . Sie ist am Rand des Materials am höchsten und nimmt zur Mitte hin ab, Abbildung 2.31. [Veit et al., 2011b], [J. Fasholz, 1991]

Daraus folgt, dass an der Oberfläche und den oberflächennahen Bereichen des Materials der Großteil des induzierten Wirbelstromes fließt. Das Stromeindringmaß δ bezeichnet dabei die Tiefe bei der die Stromdichte auf 37 Prozent des Maximalwertes absinkt und ist abhängig vom spezifischen elektrischen Widerstand ρ_r und der Permeabilitätszahl μ_r des Materials, sowie von der Frequenz f des Induktorfeldes. Bei technischen Anwendungen ist zu beachten, dass der elektrische Widerstand und die Permeabilitätszahl temperaturabhängig sind und sich dadurch das Stromeindringmaß während des Erwärmungsprozesses ändert.

$$\delta = 50,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_r}{\mu_r \cdot f}} \quad (2.1)$$

Aus der Gleichung (2.1) ergibt sich, dass das Stromeindringmaß bei niedrigen Frequenzen hoch und bei hohen Frequenzen niedrig ist. Die optimale Durchwärmung von ebenen Formplatinen wird bei einem Verhältnis von $d/\delta = 2,3$ erzielt. Bei der induktiven Erwärmung

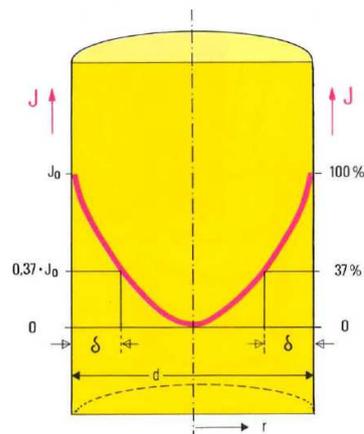


Abbildung 2.31: Stromdichteabnahme im Metallzylinder bei induktiver Erwärmung (Skin-Effekt), J. Fasholz [1991]

Die Erwärmung von ferromagnetischem Material tritt des Weiteren Hystereseverluste (Ummagnetisierungsverluste) auf. Durch das wechselnde Magnetfeld werden Teilbereiche (Elementarmagnete) des Materials ummagnetisiert. Dies geschieht mit der Frequenz des äußeren Magnetfeldes und verursacht Reibungswärme, da die Elementarmagnete beim Umklappvorgang aneinander reiben. Diese ferromagnetischen Eigenschaften sind jedoch nur unterhalb der Curie-Temperatur z.B. beim 22MnB5 circa 750°C vorhanden. Ab dieser Temperatur verliert das Material den Ferromagnetismus und wird unmagnetisch. [Kolleck et al., 2009],[Veit et al., 2011b],[J. Fasholz, 1991]

Bei der Erwärmung durch Induktion ist die Bauform der Induktoren entscheidend für den erreichbaren Wirkungsgrad. Diese bestimmt die relative Position des wechselnden Magnetfeldes zum Werkstück. Derzeit wird zwischen drei Bauformen unterschieden. Das sind der Längsfeld-, der Quersfeld- und der Flächen-Induktor, Abbildung 2.32.

Mit dem Längsfeld-Induktor kann das Material nur bis zur Curie-Temperatur erwärmt werden. Ab dieser Temperatur wird das Material unmagnetisch. Bei einer Erwärmung bis circa 550°C kommt es zu einem geringen Anstieg des Stromeindringmaßes, da der elektrische Widerstand bei steigender Temperatur zunimmt. Eine weitere Erwärmung führt zu einem Absinken der Permeabilitätszahl wodurch, wie aus der Gleichung (2.1) ersichtlich, das Stromeindringmaß deutlich ansteigt. Ab der Curie-Temperatur sinkt die Permeabilitätszahl auf den Wert 1 ab und das Stromeindringmaß erhöht sich auf das über 15-fache des ursprünglichen Wertes. Es kommt zu einer gegenseitigen Auslöschung der kurzgeschlossenen Wirbelströme, wodurch eine effiziente Erwärmung des Materials, bei gleichbleibender Frequenz, nicht mehr möglich ist. [Rudnev et al., 2003]

Bei Quersfeld- und Flächen-Induktoren unterscheidet sich die relative Anordnung des magnetischen Wechselfeldes zum Werkstück von der bei Längsfeld-Induktoren, 2.32. Bei der Erwärmung des Materials durch diese Bauformen spielt der Skin-Effekt eine untergeordnete Rolle. Des Weiteren ist das Stromeindringmaß nicht abhängig von der Frequenz des magnetischen Wechselfeldes oder der Permeabilitätszahl des Materials. Der Flächeninduktor ist für die homogene Erwärmung ebener Formplatinen am besten geeignet. Trotz des wesentlich

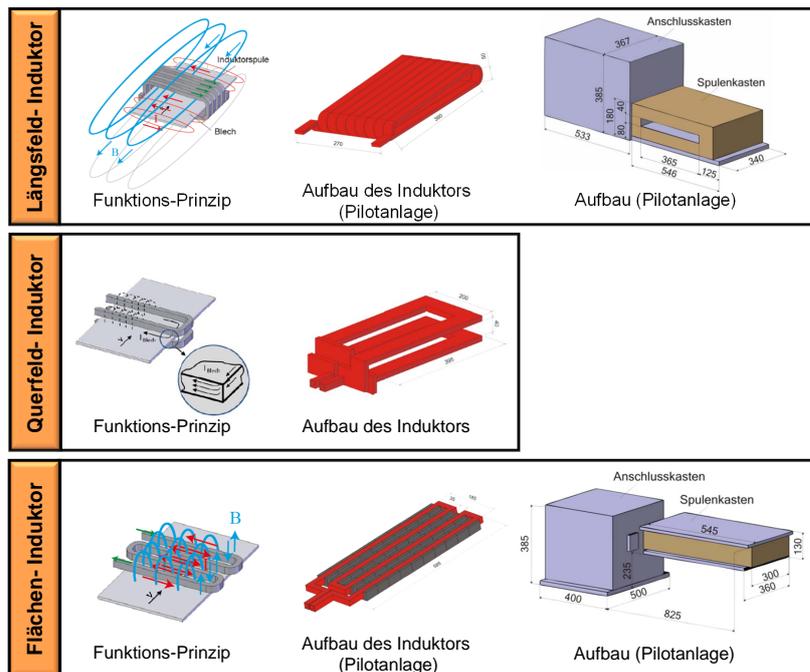


Abbildung 2.32: Längsfeld-, Querfeld- und Flächen-Induktor

schlechteren Wirkungsgrades wird diese Bauform dem Querfeld-Induktor vorgezogen, da es beim Querfeld-Induktor zu einer inhomogenen Erwärmung des Materials kommt. [Veit et al., 2011b]

• Pilotanlage für induktives Erwärmen

Am Institut T&F wurde eine Induktionsanlage für das Erwärmen von Formplatinen im Presshärteprozess entwickelt. Auf Grund des modularen Aufbaus ist es möglich beschichtetes und unbeschichtetes Material zu erwärmen. Bei AlSi-beschichtetem Material erfolgt die Erwärmung durch einen Längsfeldinduktor, einem induktiv beheizten Muffelofen, einer Flächen- spule und einem Temperaturhalteofen. Durch den induktiv beheizten Muffelofen wird dabei, wie in Kapitel 2.2.2 näher beschrieben, die notwendige Durchlegierung der Beschichtung erreicht. Bei unbeschichtetem Material wird diese Zwischenerwärmungsstufe nicht benötigt. Die Abbildungen, 2.33 und 2.34, zeigen den Erwärmungsprozess für beschichtetes und unbeschichtetes Material, die einzelnen Erwärmungsbereiche und die Anschlussleistungen der Einzelkomponenten der Anlage.

Die Speisung der Induktoren erfolgt über zwei Hochfrequenz(HF)-Umrichter (Umrichter 1: Nennleistung = 70kW, Frequenz = 100kHz, Umrichter 2: Nennleistung = 2x80kW, Frequenz = 10kHz) der ITG Induktionsanlagen GmbH. Die Kühlung der Induktoren wird durch ein Kühlaggregat, eine Pumpe und einen 1000 Liter Wasserspeicher gewährleistet. Der Transport der Formplatte durch die Induktionsanlage erfolgt durch ein elektrisch betriebenes Hubbalkensystem. Dabei werden keramische Rohre als Träger eingesetzt. Der Aufbau der Gesamtanlage ist in der Abbildung 2.35 dargestellt.

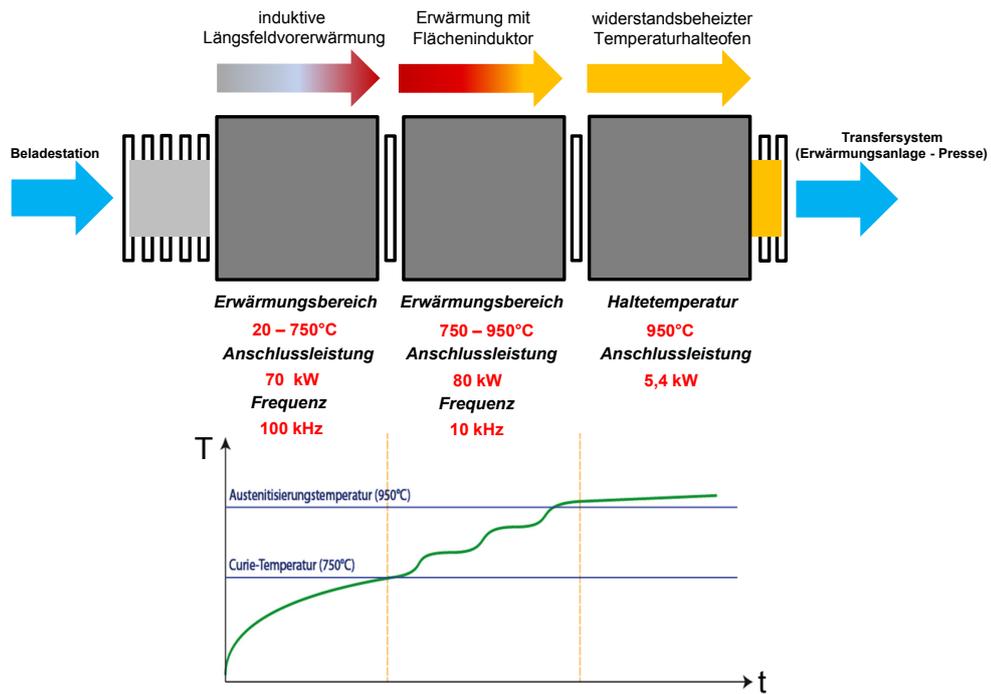


Abbildung 2.33: Induktiver Erwärmungsprozess bei der Pilotanlage (unbeschichtetes Material)

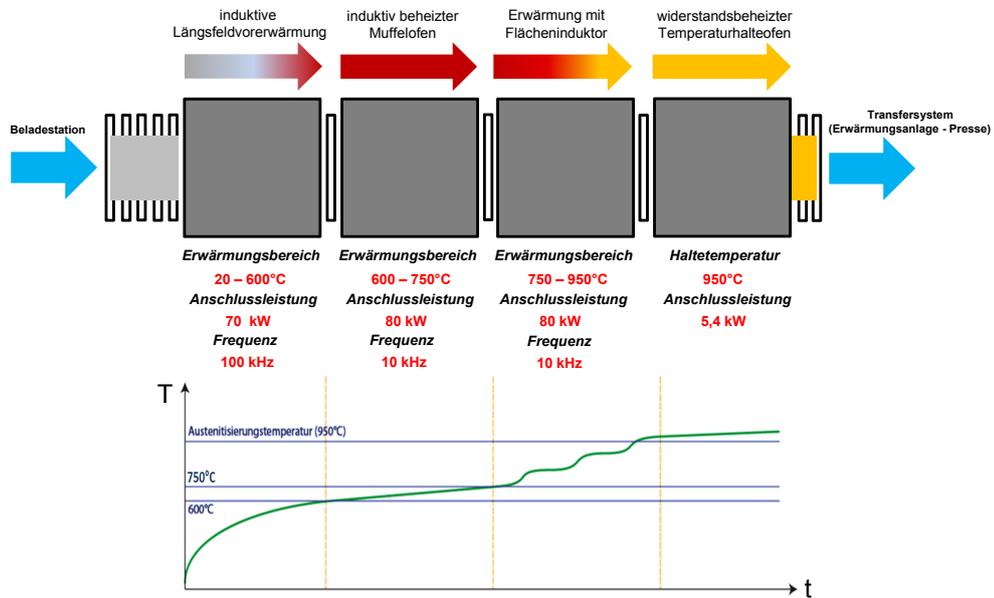


Abbildung 2.34: Induktiver Erwärmungsprozess bei der Pilotanlage (AlSi-beschichtetes Material)

• **Serienanlage für induktives Erwärmen**

Eine Serienanlage zum induktiven Erwärmen von Formplatinen für das Presshärten wurde noch nicht realisiert. Derzeit wird seitens des Instituts T&F nach Industrie-Partnern gesucht, welche bei der technischen Umsetzung der Serienanlage helfen und das Projekt finanziell unterstützen. Im Gegensatz zur Pilotanlage werden für die Realisierung einer Serienanlage deutlich höhere Anschlussleistungen der Induktoren und des Temperaturhalteofens, wie in Kapitel 4.2.2 näher beschrieben, benötigt. Eine effiziente Erwärmung erfordert des Weiteren eine Anpassung der Induktoren auf die Formplatinen, sowie ein optimiertes Transport- und Positioniersystem. Der Prozess zur Erwärmung von AISi-beschichtetem Material mit den dazugehörigen Anschlussleistungen der Induktoren ist in der Abbildung 2.36 dargestellt.



Abbildung 2.35: Pilotanlage des Instituts T&F

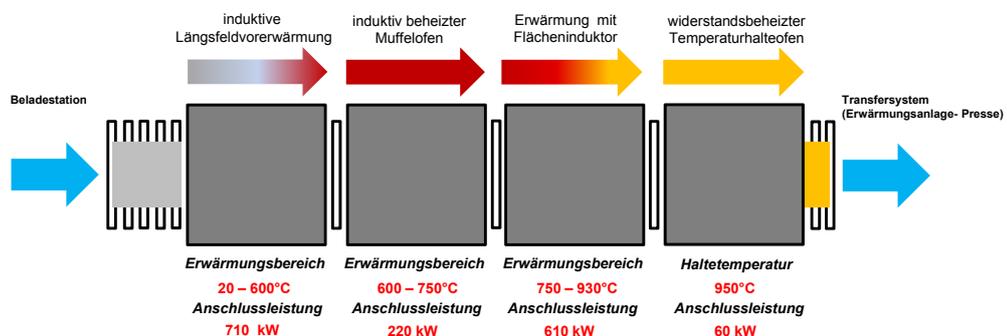


Abbildung 2.36: Induktiver Erwärmungsprozess für Serienanlage (AISi-beschichtetes Material)

2.3.3 Alternative Erwärmungskonzepte

Als alternative Erwärmungskonzepte werden Erwärmungsanlagen bezeichnet, welche sich entweder durch die Art der Erwärmung der Formplatinen oder durch neuartige Transportsysteme von den derzeit eingesetzten Erwärmungsanlagen unterscheiden.

Drehherdofen

Eine Möglichkeit der platzsparenden Erwärmung bietet der Einsatz von Drehherdöfen. Durch die Zusammenarbeit des Pressenherstellers Schuler AG und der Schwartz GmbH wurde diese Ofenbauart, speziell für das Presshärteverfahren entwickelt.

Im Vergleich zu Standard-Rollenherdöfen zeichnen sich Drehherdöfen durch hohe Prozesssicherheit und geringere Wartungskosten aus. Während bei Rollenherdöfen die Beschichtung mit den Transportrollen reagiert und sich dadurch Positionierungsungenauigkeiten der Platine ergeben, erfolgt bei Drehherdöfen der Transport über Gehänge. Das Einhängen der Platinen in die Gehänge erfolgt dabei über Belade-Roboter. Im Ofeninneren werden dann die Platinen erwärmt, vom Roboter entnommen und anschließend in die Presse transferiert. Dabei können Transferraten von bis zu zehn Platinen pro Minute erreicht werden. Die wesentlichen Vorteile dieser Ofenbauart sind die kompakte Bauweise (Ofendurchmesser $< 15m$), die nutzbare Fläche unter dem Ofen, der geringere Schutzgasverbrauch und das schnelle Entladen der Platinen. Des Weiteren ist der Wartungsaufwand für diese Anlagen geringer, da keine Transportrollen ausgetauscht werden müssen. Die Nachteile liegen laut Lehmann [2011] im komplizierten Belade- und Entlade-System, der Automatisierung und den längeren Aufheizzeiten für die Formplatinen im Vergleich zu Rollenherdöfen. Des Weiteren ist das Einstellen eines Temperatur-Profiles für den Erwärmungsprozess nicht möglich. [Schuler AG, 2009b], [Lehmann, 2011]



Abbildung 2.37: Presshärtelinie mit Drehherdofen, Schuler AG [2009a]

Mehrlagenmehrkammer (MLK) Ofen

Der Mehrlagenmehrkammer (MLK) Ofen ist eine Entwicklung der Schwartz GmbH in Kooperation mit der Fa. AP&T. Der Kammerofen besteht aus einzelnen Heizkammern, die geschichtet angeordnet sind. Dabei besteht ein Ofenmodul aus mehreren Heizkammern und der gesamte Ofen aus mehreren Ofenmodulen. Das Be- und Entladen der einzelnen Heizkammern erfolgt über ein schnelles Feeder-System. Dadurch ist eine Lagekorrektur der Platinen nach der Erwärmung nicht notwendig. Dies erfordert jedoch den Einsatz aufwändiger Automation. Die Funktionsweise eines MLK Ofens ist in Abbildung 2.38 dargestellt. [Pfeifer et al., 2011]

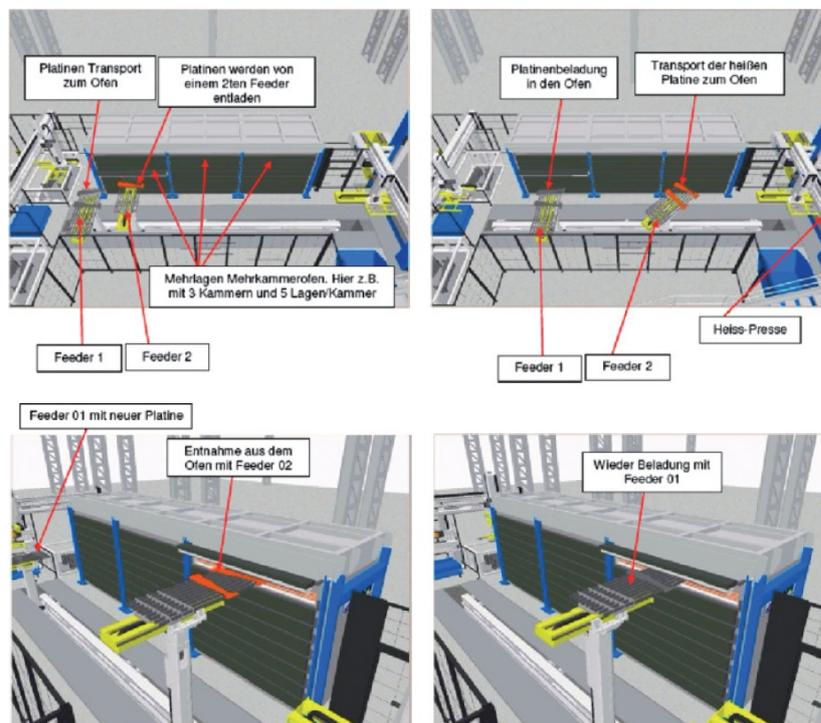


Abbildung 2.38: Funktionsschema des Mehrlagenmehrkammer (MLK) Ofens der Schwartz GmbH, Pfeifer et al. [2011]

Die wesentlichen Vorteile dieses Ofens sind die kompakte Bauweise und die Flexibilität der Anlage, da die Heizkammern unabhängig voneinander betrieben werden, Abbildung 2.39. Mit diesem unabhängigen Heizsystem sind allerdings ein erheblicher Wartungsaufwand und ein höherer Schutzgasverbrauch verbunden. Durch das zyklische Öffnen und Schließen der Türen kommt es einerseits zum Verschleiß der Schließmechanik und andererseits zu einem Einströmen der Umgebungsluft in die Heizkammer. Dieses Einströmen wird durch einen Sperrvorhang verhindert, was aber mit einem erheblichen Schutzgasverbrauch verbunden ist. Aus diesem Grund verfügt jede Heizkammer über eine eigene Schutzgaserzeugungseinrichtung mit Sauerstoffüberwachung. Die weiteren Nachteile sind die unterschiedlichen Transferzeiten der Platinen zur Presse und eine längere Aufheizzeit bei der Erwärmung von AISi-beschichteten Platinen im Vergleich zu Rollenherdöfen. Die Aufheizkurven in Lehmann

[2011] zeigen, dass bei gleicher Materialstärke von 1,6mm die Vergleichstemperatur der Platine von 930°C in Rollenherdöfen nach 190 Sekunden erreicht wird, während MLK-Öfen dafür 250 Sekunden benötigen. Derzeit sind diese MLK-Öfen nur elektrisch beheizt verfügbar, wobei an der Integration eines transparenten Strahlrohr-Systems mit regenerativem Brenner gearbeitet wird. Laut Lehmann [2011] sind zwei kleinere Öfen schon seit mehreren Jahren in Betrieb und zwei weitere Anlagen sind bereits beauftragt. [Lehmann, 2011], [Pfeifer et al., 2011]



Abbildung 2.39: Mehrlagenmehrkammer (MLK) Ofen der Schwartz GmbH, Lehmann [2011]

Kontakterwärmungsverfahren

Bei diesem Verfahren erfolgt die Erwärmung der Formplatinen zwischen zwei massiven Kontaktplatten aus hitzebeständigem Stahl. Diese werden vor dem Einlegen der kalten Platine auf die Erwärmungstemperatur vorgeheizt. Die Beheizung der Kontaktplatten erfolgt dabei durch wassergekühlte Induktionsspulen, wodurch hohe Aufheizraten realisiert werden können, Abbildung 2.40.

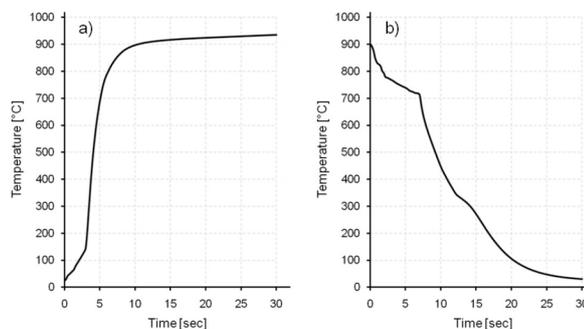


Abbildung 2.40: Aufheizkurve (a) bei einer Kontaktplattentemperatur von 950°C und Abkühlkurve (b) bei nachfolgender Abkühlung im Abkühlmodul, Ploshikhin et al. [2011]

Nach dem Einlegen werden das Ober- und Unterteil des Erwärmungsmoduls geschlossen und die Platinen zwischen den beiden Kontaktplatten erwärmt. Die Kontaktplatten werden dabei auf konstanter Temperatur gehalten. Die Erwärmung der Formplatinen erfolgt dabei durch Kontaktleitung, wodurch sehr hohen Aufheizgeschwindigkeiten, im Vergleich zur Erwärmung durch Strahlung oder Konvektion, erreicht werden. Das Funktionsschema dieses Erwärmungskonzeptes ist in der Abbildung 2.41 dargestellt.

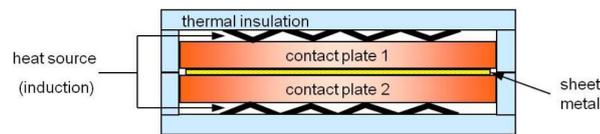


Abbildung 2.41: Prinzip der Kontakterwärmung, Ploshikhin et al. [2011]

Derzeit ist es möglich mit dieser Pilot-Anlage Platinen mit maximalen Abmessungen von 210x120mm auf bis zu 1020°C zu erwärmen. Den Aufbau des Kontakterwärmungssofens zeigt die Abbildung 2.42. In Untersuchungen von Ploshikhin et al. [2011] konnte nachgewiesen werden, dass bei einer 60 sekundigen Kontakterwärmung von AlSi- beschichtetem 22MnB5, die geforderte Diffusion von Eisen in die Beschichtung stattfindet. Dadurch kommt es zur notwendigen Schmelzpunkterhöhung der Beschichtung. Des Weiteren konnten keine Unterschiede der mechanischen Eigenschaften bei der Erwärmungsdauer von fünf Minuten und 15 Sekunden festgestellt werden. Dadurch kann die Erwärmungsdauer von fünf bis sieben Minuten, bei Standard-Rollenherdöfen, auf 20 bis 40 Sekunden durch das Kontakterwärmungsverfahren gesenkt werden. Weitere Vorteile sind die kompakte Bauweise, der geringere Wartungsaufwand und die Prozessflexibilität. Durch eine Segmentierung der Kontaktplatten ist es möglich partiell zu erwärmen. Dadurch können die mechanischen Eigenschaften in gewissen Bereichen der Platine gezielt beeinflusst werden.[Ploshikhin et al., 2011]

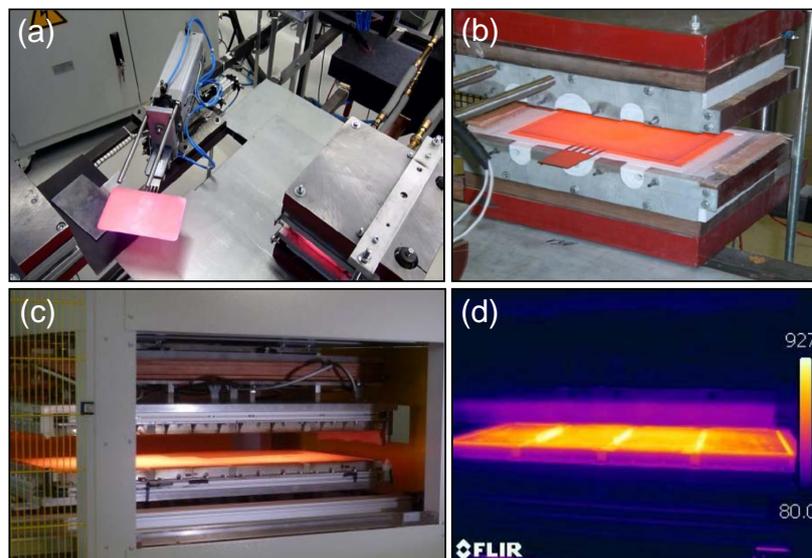


Abbildung 2.42: Automatisierte Pilot- Anlage zur Kontakterwärmung ((a) Transfer-system, (b) und (c) Erwärmungsmodul, (c) Temperaturverteilung im Erwärmungsmodul), Ploshikhin et al. [2011], Ploshikhin et al. [2012]

Wirbelschichtofen

Eine weitere Möglichkeit der Erwärmung bietet der Wirbelschichtofen. Die Benteler Automobiltechnik GmbH hat dieses spezielle Erwärmungsverfahren für das Presshärten zum Patent (DE 102010027179 (2010) und US 2012/0174406 A1) angemeldet. Bei diesem Ofen erfolgt die Erwärmung der Platine durch eine durchströmte Wirbelschicht innerhalb eines Wirbelschichtofens, Abbildung 2.43. Die Prozesskammer des Ofens kann dabei durch Gas, durch Induktion, durch Konduktion oder durch eine Hybrid-Beheizung erwärmt werden. Diese ist mit Feststoffpartikeln (Aluminiumoxid oder Siliziumoxid,...) gefüllt. In das Innere der Prozesskammer wird ein vorerwärmtes Prozessgas geleitet. Durch das Einströmen des Prozessgases und durch die erwärmten Feststoffpartikel kommt es zur Ausbildung einer Wirbelschicht. Die Erwärmung der Platinen erfolgt durch Eintauchen in die Wirbelschicht. Im Wirbelschichtofen können neben Einzelplatinen auch mehrere Platinen gleichzeitig und partiell erwärmt werden. Laut Benteler Automobiltechnik GmbH [2010] liegen die Vorteile dieser Erwärmungstechnologie im Platzbedarf und der schnellen Erwärmung der Platinen. [Benteler Automobiltechnik GmbH, 2010], [Benteler Automobiltechnik GmbH, 2012]

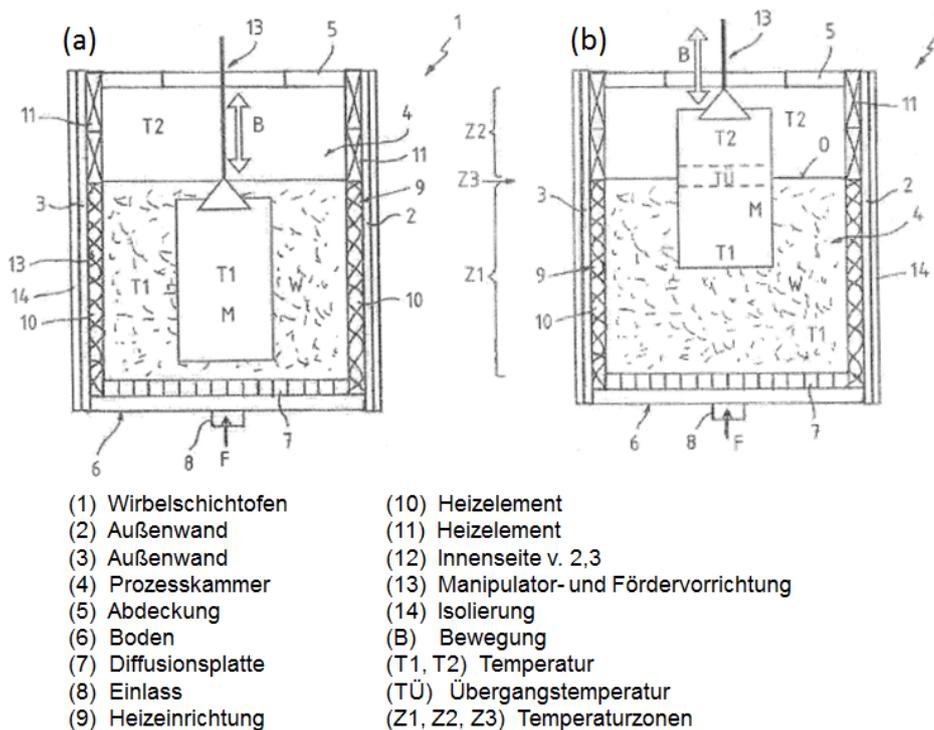


Abbildung 2.43: Erwärmung der Platine im Wirbelschichtofen: (a) vollständige Erwärmung und (b) partielle Erwärmung, Benteler Automobiltechnik GmbH [2012]

2.3.4 Anforderungen an Erwärmungsanlagen

Die Hersteller von Erwärmungsanlagen sind an die Vorgaben der Kunden gebunden. Diese definieren in einem Lastenheft die spezifischen Anforderungen an die Erwärmungsanlage. Dabei werden neben den einzuhaltenden Zykluszeiten und Temperaturen auch die zu leistende Durchsatzmenge pro Stunde festgelegt. Typische Vorgaben für Rollenherd-Platinenöfen, die beim direkten Presshärten eingesetzt werden, sind in der Tabelle 2.6 aufgelistet.

| Eckdaten | Forderung |
|--|--|
| Einzel-/Doppel-/Vierfach-Fertigung | erforderlich |
| Taktzeiten | 15 - 30 Sek. |
| Teileabmessungen (min.) | 200 - 500 mm |
| Teileabmessungen (max.) | 1000 - 2200 mm |
| Einzelteilgewichte | 1,5 - 10 kg |
| Dicke (max.) | 3 mm |
| Verfügbarkeit | > 90 Prozent |
| Arbeitsmodell | 24 Std. / Tag 6 Tage / Woche 300 Tage / Jahr |
| Temperaturen | |
| Nenntemperatur (min.) | 950 °C |
| Materialtemperatur | 930 ± 15 °C |
| Homogenes Temperaturprofil im Halte- und Entnahmebereich | ± 15 °C |
| Ofenkörper | |
| einstellbare Entnahmehöhe | ± 30 mm |
| Antriebssystem reversierbar | erforderlich |
| Ofenauslauf | |
| Positionierungsgenauigkeit an der Entnahmeposition | ± 1,5 mm |
| Zeit vom Ofenauslauf bis zur Positionierung | < 2 Sek. |
| Schutzgas | |
| Ofenatmosphäre | Stickstoff |
| Heiztechnik | |
| Beheizung | Erdgas |

Tabelle 2.6: Auszug aus einem Lastenheft für einen Rollenherdofen, Volkswagen AG

Weitere Anforderungen ergeben sich hinsichtlich der Einhaltung bestimmter Maschinenrichtlinien und der Forderung, dass die Erwärmungsanlage mit der nachfolgenden Transfer-einrichtung und der Presse verknüpft werden kann. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, muss bei der Verwendung von AlSi-beschichtetem Material die Durchlegierung der Beschichtung durch den Erwärmungsprozess gewährleistet sein. Dies hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Auslegung von Öfen für das Presshärten.

Erwärmungsanlagen zum partiellen Erwärmen

Bei der partiellen Erwärmung werden Bereiche der Formplatte unterschiedlich stark erwärmt. Dieser Vorgang wird als „Tailored Tempering“ bezeichnet. Er ermöglicht die gezielte Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften, innerhalb des Bauteils, durch den Erwärmungsprozess. Die Erwärmung erfolgt dabei bei einer Temperatur über AC_3 für den Bereich, welcher ein hartes martensitisches Gefüge nach dem Umform- und Aushärtevorgang aufweisen soll. Der Bereich in dem eine höhere Bruchdehnung und eine geringere Zugfestigkeit gefordert sind, wird bis zu einer Temperatur zwischen 700 bis 750°C erwärmt. Dadurch wird ein perlitisch-ferritisches Gefüge nach dem Aushärten erreicht. Die Abbildung 2.44 zeigt die unterschiedliche Gefügeausbildung innerhalb einer B-Säule.

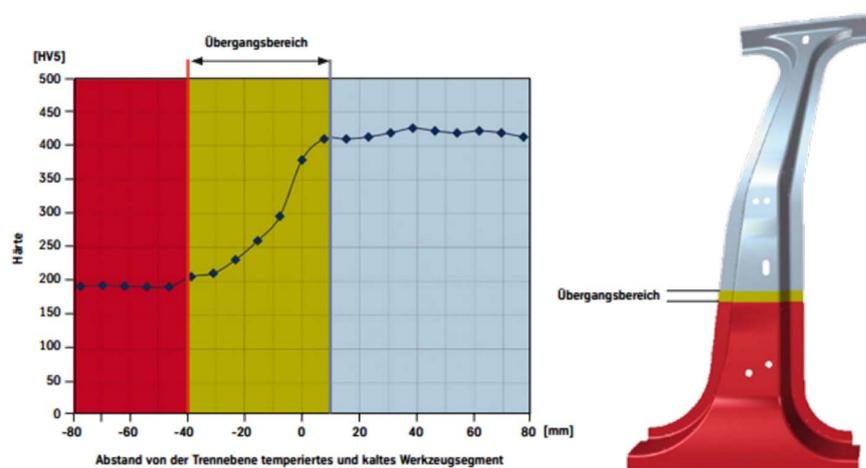


Abbildung 2.44: Unterschiedliche Gefügeausbildung innerhalb einer B-Säule durch „Tailored Tempering“, ThyssenKrupp AG [2012b]

Um diese Erwärmung zu ermöglichen gibt es seitens der Ofenhersteller mehrere Konzepte. Die Schwartz GmbH verwendet dazu laut dem Patent EP 2497840A1 [2012] einen gasbeheizten Ofen für die Erwärmung unterhalb der Temperatur $AC_3 = 845^\circ C$. Die partielle Erwärmung für die zu härtenden Bereiche erfolgt danach in einem Profilierofen. Eine weitere Möglichkeit wird im Patent EP 2143808A1 [2010] beschrieben. Dabei wird die Formplatte zuerst in einem Durchlaufofen auf eine Temperatur bis maximal $AC_1 = 720^\circ C$ erwärmt. Die weitere Erwärmung, für die zu härtenden Bereiche, auf AC_3 erfolgt in einem Infrarotlampenfeld. Bei der LOI Thermprocess GmbH wird die Formplatte, laut dem Patent EP 2548975A1 [2013], in einem Durchlaufofen auf eine Temperatur über AC_3 erwärmt. Danach durchläuft es eine Heiz- und Kühlstrecke, die durch einen anschließenden Ofen realisiert wird. Dabei wird ein Teil der Formplatte außerhalb des Ofens transportiert und dadurch gekühlt, während der andere Bereich auf einer Temperatur über AC_3 gehalten wird. Der Erwärmungssofen „HotPhase“ der Ebner GmbH hingegen, erwärmt das Material auf 700 bis 750 °C in der ersten Stufe des Erwärmungsprozesses. Dieser Teil des Ofens ist gasbeheizt. Die partielle Erwärmung erfolgt danach durch eine elektrisch beheizte Zone, wobei sich fünf Temperaturbereiche, über die Bauteilbreite, einstellen lassen. [EP 2497840A1, 2012], [EP 2143808A1, 2010], [EP 2548975A1, 2013]

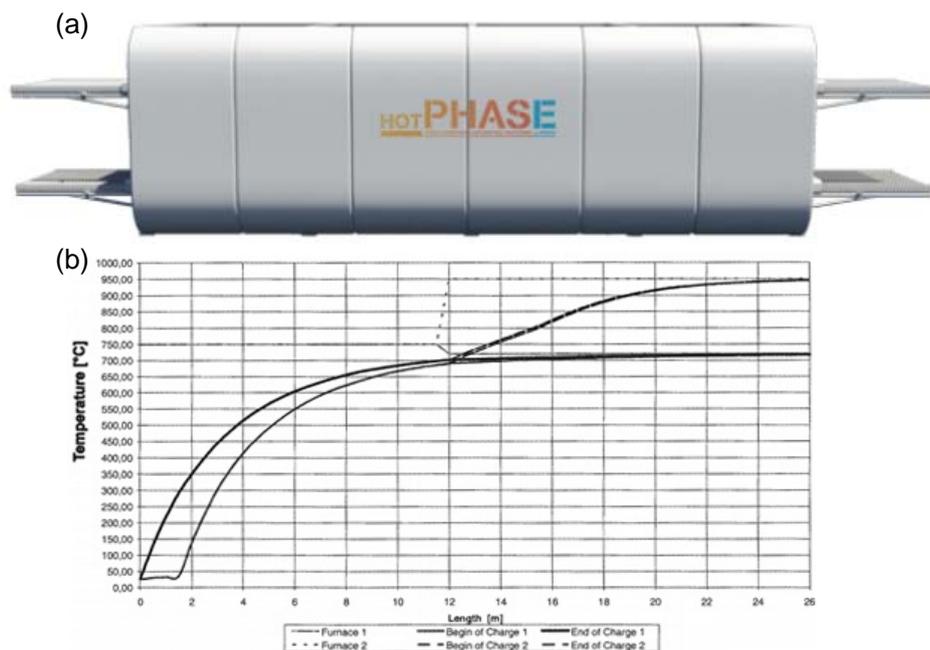


Abbildung 2.45: Partielles Presshärten mit „HotPHASE“ der Ebner GmbH, (a) Erwärmungsanlage- Seitenansicht, (b) Aufheizkurven, Ebner [2011]

2.4 Branchenanalyse

Die Analyse der Branchenstruktur liefert wichtige Informationen zur Formulierung der Wettbewerbsstrategie von Unternehmen. Die Branchenstruktur beeinflusst nicht nur das Verhalten etablierter Unternehmen, sondern ist auch entscheidend für die Aufnahmefähigkeit der Branche, für Neueinsteiger. Der Wettbewerb, innerhalb der Branche, wird von fünf internen Wettbewerbskräften geprägt und wird im folgenden Kapitel, nach Porter [2008], näher beschrieben.

2.4.1 Die fünf Wettbewerbskräfte nach M.E. PORTER

Durch das Konzept der fünf Wettbewerbskräfte kann die Branche auf die Intensität des Wettbewerbes, deren strukturelle Merkmale und die Rentabilität untersucht werden. Die fünf Wettbewerbskräfte (Gefahr des Markteintritts, Druck durch Substitutionsprodukte, Verhandlungsstärke der Abnehmer, Verhandlungsstärke der Lieferanten und der Grad der Rivalität unter bestehenden Wettbewerbern) und deren Einfluss auf die Branche sind in der Abbildung 2.46 dargestellt. Die Wettbewerbsintensität und die Rentabilität der Branche hängen entscheidend von der Zusammenfassung der Stärke dieser Kräfte ab. Bei der Analyse ist darauf zu achten, die stärksten Kräfte zu identifizieren, um daraus eine Strategie für das Unternehmen ableiten zu können. Unternehmen innerhalb der Branche können sich dadurch eine gute Position verschaffen, die sie gegen diese Kräfte schützt. Neue Konkurrenten hin-

gegen erkennen dadurch ob eine Branche attraktiv bzw. rentabel ist. In Branchen bei denen alle Wettbewerbskräfte stark sind herrscht eine hohe Rivalität unter den Konkurrenten und sie verfügen daraus resultierend über ein geringes Gewinnpotenzial. Die Wettbewerbskräfte liefern entscheidende Informationen über die Stärken und Schwächen des Unternehmens, in Bezug auf die Branche.

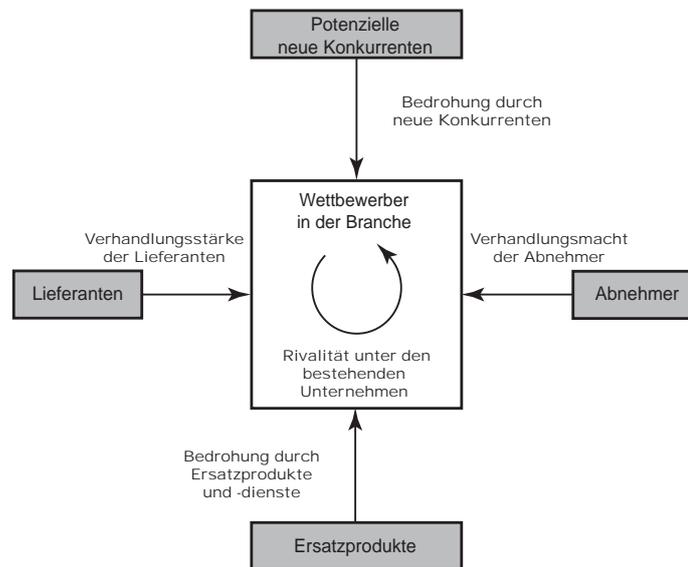


Abbildung 2.46: Die fünf Triebkräfte des Branchenwettbewerbs, Porter [2008]

Die Gefahr des Markteintritts

Der Eintritt neuer Unternehmen in die Branche kann zu Preissenkung oder zu Mehrkosten für bereits etablierte Unternehmen führen, was zu einem Abnehmen der Rentabilität innerhalb der Branche führt. Die Gründe dafür sind Kapazitätserweiterungen durch neue Unternehmen und deren Wunsch nach Gewinn. Ob ein Unternehmen in die Branche eindringen und sich etablieren kann ist von der Höhe existierender Eintrittsbarrieren und den Reaktionen der bereits etablierten Wettbewerbern abhängig. Bei hohen Barrieren ist die Gefahr des Eintritts neuer Unternehmen gering. Folgende Eintrittsbarrieren können den Eintritt verhindern:

Betriebsgrößensparnis („economies of scale“): Sie können bei hohem Produktionsausstoß erreicht werden. Der Grund dafür ist, dass die Stückkosten des Produktes pro Zeiteinheit sinken. Dadurch werden neue Unternehmen gezwungen mit einem hohen Produktionsvolumen in die Branche einzusteigen. Tun Sie das nicht, müssen sie einen Kostennachteil in Kauf nehmen. Betriebsgrößensparnisse können in den Unternehmen in fast allen Bereichen (z.B. Einkauf, Vertrieb, Produktion, Forschung,...) auftreten und sich auf ganze Funktionsbereiche (z.B. Verkauf) oder auf Teile davon beziehen (z.B. Operationen oder Aktivitäten).

Produktdifferenzierung: Produktdifferenzierung ist in gewissen Branchen (z.B. Arzneimittel, Kosmetika,...) eine hohe Eintrittsbarriere. Die etablierten Unternehmen verfügen über einen hohen Bekanntheitsgrad und loyale Käufer. Diesen Status erreichen sie durch langjäh-

rige Werbemaßnahmen, Produktunterschiede oder durch gute Serviceleistungen. Eine weitere Möglichkeit ist, dass das Unternehmen als erstes in der Branche war. Neueinsteiger müssen mit Einstiegsverlusten rechnen. Sie müssen ihre Produkte erst etablieren und die loyalen Käufer der Konkurrenz von sich überzeugen.

Kapitalbedarf: Eintrittsbarrieren werden durch hohen Kapitaleinsatz für Forschung und Entwicklung, Einstiegswerbung und Produktionsanlagen geschaffen. Des Weiteren wird Kapital für Kundenkredite und zur Deckung von Einstiegsverlusten benötigt.

Umstellungskosten: Bei einem Lieferantenwechsel, fallen beim Abnehmer zusätzliche Kosten (z.B. Umschulungskosten für Mitarbeiter, Kosten für Zusatzgeräte, Kosten für Einarbeitung) an, die als Umstellungskosten bezeichnet werden. Bei hohen Umstellungskosten ist ein Lieferantenwechsel seitens der Abnehmer eher unwahrscheinlich. Neue Lieferanten können diesen Wechsel nur durch niedrige Preise oder bessere Leistung erreichen.

Zugang zu Vertriebskanälen: Die Vertriebskanäle innerhalb der Branche werden von den etablierten Unternehmen bedient. Der Zugang und die Akzeptanz für Neueinsteiger sind schwierig und können nur durch Preissenkungen, gemeinsame Werbemaßnahmen, usw. erreicht werden. Bei extrem hohen Eintrittsbarrieren müssen diese sogar neue Vertriebskanäle schaffen.

Größenunabhängige Kostennachteile: Neue Unternehmen können trotz ihrer Größe oder Betriebsgrößensparnis Kostennachteile gegenüber etablierten Unternehmen haben, da diese z.B. im Besitz von Produktionstechnologie (Patente, Know-how) sind, einen günstigen Zugang zu Rohstoffen haben, über günstige Standorte verfügen oder staatlich subventioniert werden.

Staatliche Politik: Der Staat kann z.B. durch Lizenzzwang, Sicherheitsvorschriften, begrenzten Zugang zu Rohstoffen, Testnormen oder Umweltvorschriften den Markteintritt für neue Unternehmen begrenzen oder sogar verhindern. Neue Konkurrenten haben beim Markteintritt mit erheblichen Reaktionen etablierter Unternehmen zu rechnen. Was sie zu erwarten haben, hängt z.B. von Vergeltungsmaßnahmen gegen frühere Wettbewerber und den verfügbaren liquiden Mitteln der etablierten Unternehmen ab. Des Weiteren kann auch ein langsames Wachstum der Indikator für Vergeltungsmaßnahmen sein, da die Rentabilität der Branche bei einer Neuaufnahme von weiteren Unternehmen sinkt.

Der Grad der Rivalität unter bestehenden Wettbewerbern

Die Unternehmen einer Branche stehen in ständiger wechselseitiger Beziehung und Abhängigkeit. Sie versuchen ständig ihre Position, gegenüber Rivalen, innerhalb der Branche zu verbessern. Diese Positionskämpfe werden durch hohen Preiswettbewerb, intensive Werbeschlachten, verbesserte Service- und Garantieleistungen oder durch die Einführung neuer Produkte ausgetragen. Dabei führt jede Maßnahme eines Unternehmens zu einer Gegenmaßnahme der Konkurrenz, innerhalb der Branche. Folgende Faktoren sind für den Grad der Rivalität verantwortlich:

Hohe Anzahl an oder gleiche Ausstattung von Wettbewerbern: Ist die Anzahl der Unternehmen innerhalb einer Branche hoch, ist es möglich, dass einige Unternehmen versuchen unbemerkt ihre Position zu verbessern. Auch bei wenigen gleich ausgestatteten Unternehmen stellt sich dadurch ein instabiler Zustand ein, der zu dauerhaften und harten Vergel-

tungsmaßnahmen führen kann. Bei hoch konzentrierten Branchen oder bei Branchen, die durch ein oder wenige Unternehmen dominiert werden, ist dies nicht der Fall.

Langsames Wachstum der Branche: Ein langsames Branchenwachstum hat einen intensiveren Kampf, um Marktanteile, zwischen den Konkurrenten zur Folge, als schnelleres Branchenwachstum.

Hoher Anteil an Fix- oder Lagerkosten: Hohe Fixkosten veranlassen die Unternehmen zur Auslastung ihrer Kapazitäten. Daraus resultierende Überschusskapazitäten führen zu Preissenkungen, denen Preiskämpfe folgen können. Des Weiteren sind Produkte mit einem hohen Anteil an den Lagerkosten ebenfalls Auslöser für Preissenkungen.

Fehlende Differenzierung oder Umstellkosten: Fehlende Differenzierung der Produkte führt zu einem intensiven Wettbewerb bei Preis und Service, da sich die Käuferentscheidung auf diese beiden Faktoren stützt. Die Produktdifferenzierung verhindert diesen Wettbewerb. Dies verhält sich bei den Umstellungskosten gleich.

Große Kapazitätserweiterungen: Betriebsgrößenersparnisse und Kapazitätserweiterungen, die technologisch an Mindestgrößen gebunden sind, stören den Markt und führen zu zyklischen Überkapazitäten und Preissenkungen.

Heterogene Wettbewerber: Die Wettbewerber einer Branche unterscheiden sich in deren Strategie, der Herkunft und der Persönlichkeit. Durch abweichende Ziele und Strategien des Wettbewerbsverhaltens kann ein Konflikt entstehen.

Hohe strategische Einsätze: Wenn sich ein Unternehmen unbedingt den Erfolg in einer Branche zum Ziel setzt, kann die Rivalität einen hohen Grad erreichen. Der finanzielle Einsatz ist dabei nebensächlich solange der Erfolg z.B. für die Konzernstrategie von großer Bedeutung ist.

Hohe Austrittsbarrieren: Austrittsbarrieren sind Faktoren, die über den Verbleib von Unternehmen in der Branche bestimmen. Trotz geringer oder negativer Erträge können gewisse Gegebenheiten das Unternehmen dazu zwingen die Branche nicht zu wechseln, sondern in dieser zu verbleiben. Als Hauptursachen für Austrittsbarrieren gelten neben den **Fixkosten des Austritts** (z.B. Sozialpläne, Umsiedlungskosten), **strategische Wechselbeziehungen** (z.B. Marketingfähigkeit, gemeinsam betriebene Anlagen), **administrative und soziale Restriktionen** (z.B. staatliche Stellen verbieten Austritt) auch **emotionale Barrieren** (z.B. Identifikation mit der Branche, Loyalität gegenüber Mitarbeitern). Durch hohe Austrittsbarrieren sind schwache Unternehmen gezwungen auf extreme Maßnahmen zurückzugreifen, was eine dauerhaft niedrige Rentabilität der Branche zur Folge hat.

Druck durch Substitutionsprodukte

Der Wettbewerb innerhalb einer Branche wird nicht nur von den Produkten der konkurrierenden Unternehmen bestimmt, sondern auch durch Substitutionsprodukte. Als Substitutions- oder Ersatzprodukte werden Produkte bezeichnet, welche die Produkte der Branche in der Funktion ersetzen können. Diese Substitute sind schwer zu identifizieren und stellen eine Bedrohung innerhalb der Branche dar, da sie deren Gewinnpotenzial begrenzen. Vor allem Produkte mit gutem Preis-/Leistungsverhältnis und Ersatzprodukte bei denen hohe Gewinne erzielt werden führen zu intensiverem Wettbewerb, zu niedrigeren Preisen oder zu einer verbesserten Leistung in der Branche. Die Unternehmen, innerhalb der Branche, können

diesem Druck langfristig nur durch kollektive Werbemaßnahmen, einem verbesserten Marketing oder durch eine Steigerung der Produktqualität entgegenwirken.

Verhandlungsstärke der Abnehmer

Die Abnehmer der Produkte bzw. Dienstleistung können die Profitabilität einer Branche wesentlich beeinflussen. Sie können einen hohen Wettbewerb zwischen den konkurrierenden Unternehmen erzeugen, auf Preise einwirken oder höhere Qualität fordern. Wie stark der Einfluss der Abnehmer auf diese Faktoren ist hängt im Wesentlichen von ihrer Verhandlungsstärke ab. Folgende Faktoren können zu verhandlungsstarken Abnehmern oder Abnehmergruppe führen:

Konzentrierte Abnehmer: Die Verhandlungsstärke eines Abnehmers ist hoch, wenn dieser für einen Großteil des Umsatzes verantwortlich ist. Vor allem Großabnehmer haben dadurch, in Branchen mit hohen Fixkostenanteilen, einen Vorteil.

Die Produkte haben einen hohen Anteil an den Gesamtkosten der Abnehmer: Die Abnehmer sind auf der Suche nach alternativen Anbietern um einen geringeren Preis zu erhalten. Sie sind selektiver bei der Auswahl, um dadurch ihre Gesamtkosten zu senken.

Die Produkte sind standardisiert oder nicht differenziert: Innerhalb der Branche unterscheiden sich die Produkte nicht, wodurch den Abnehmern eine große Auswahl an alternativen Lieferanten zur Verfügung steht.

Niedrige Umstellungskosten: Bei hohen Umstellungskosten ist der Abnehmer an den Lieferanten gebunden. Ist der Umstieg mit geringen bzw. gar keinen Umstellungskosten verbunden, so ist die Bindung an den Lieferanten gering bzw. nicht vorhanden. Dadurch verfügen die Abnehmer über eine hohe Verhandlungsstärke.

Die Gewinne sind niedrig: Niedrige Gewinne sind der Auslöser, dass Lieferanten unter Druck gesetzt werden. Die Abnehmer versuchen geringere Preise für die Produkte zu verhandeln um dadurch ihre Einkaufskosten zu senken.

Die Abnehmer drohen mit Rückwärtsintegration: Große Abnehmer können damit drohen, dass sie gewisse Produkte ihrer Lieferanten selbst herstellen. Die Glaubwürdigkeit basiert dabei, auf der vorhandenen Fähigkeit die Produkte herstellen zu können. Eine hohe Verhandlungsstärke haben Abnehmer die bestimmte Einzelteile schon selbst produzieren und den Rest bei Lieferanten zukaufen (partielle Integration).

Die Abnehmer sind von der Qualität und Leistung der Lieferantenprodukte nicht abhängig: Sind die Abnehmer stark von der Qualität und Leistung der Lieferantenprodukte abhängig sind die Abnehmer preisunempfindlich. Ist diese Abhängigkeit nicht vorhanden, ist die Verhandlungsstärke hoch.

Der Abnehmer ist vollständig informiert: Verfügt der Abnehmer über gute Kenntnisse der aktuellen Marktpreise, über die Nachfrage nach den Lieferantenprodukten und deren Kosten stärkt er seine Verhandlungsstärke.

Verhandlungsstärke von Lieferanten

Auch die Lieferanten können den Unternehmen der Branche drohen z.B. durch eine Erhöhung der Preise. Dadurch können sie extrem auf die Rentabilität der Branche einwirken.

Folgende Faktoren sind für eine hohe Verhandlungsstärke der Lieferanten ausschlaggebend:

Die Lieferantengruppe ist konzentriert: Eine konzentrierte Lieferantengruppe die an eine zerstreute Abnehmergruppe liefert kann stark auf die Preise und Qualität der Produkte einwirken. Des Weiteren kann sie die Lieferbedingungen zu ihrem Vorteil gestalten.

Es besteht keine Gefahr durch Substitutionsprodukte: Substitute können die Verhandlungsstärke von mächtigen Lieferanten senken, wenn diese ihre Produkte ersetzen könnten. Ist dies nicht der Fall, ist die Verhandlungsstärke hoch.

Die Branche ist für die Lieferanten unwichtig: Der Verkauf der Produkte in mehrere Branchen, senkt die Abhängigkeit von spezifischen Branchen und führt zu einer hohen Verhandlungsstärke der Lieferanten.

Die Produkte des Lieferanten sind für die Produkte der Abnehmer wichtig: Wenn die Lieferantenprodukte entscheidend für die Qualität der Abnehmerprodukte oder deren Produktionsprozess sind steigt die Verhandlungsstärke der Lieferanten.

Differenzierte Produkte oder Umstellungskosten: Wenn Abnehmer durch hohe Umstellungskosten bei einem Lieferantenwechsel oder durch differenzierte Produkte an den Lieferanten gebunden werden, steigt die Verhandlungsstärke.

Drohen mit Vorwärtsintegration: Die Lieferanten können damit drohen die Produkte der Abnehmer selbst herzustellen, um dadurch die Einkaufsbedingungen der Branche einzuschränken.

2.4.2 Leitfaden zur Erstellung einer Branchenanalyse

Am Anfang einer Branchenanalyse ist es wichtig zu wissen nach welchen Daten man sucht und wie man sich diese beschaffen kann. Bei den Daten wird dabei zwischen öffentlich zugänglichen Daten und Felddaten (Daten aus Interviews) unterschieden. Zur Identifikation von öffentlich zugänglichen Daten kann auf eine Reihe publizierter Quellen (z.B. Branchenstudien, Wirtschaftsverbände, Handelszeitungen, Unternehmensverzeichnisse und statistische Daten, Unternehmensdokumente,...) zurückgegriffen werden. Die Quellen für die Erhebung von Felddaten werden in der Abbildung 2.47 aufgelistet.

Für die Sammlung der Rohdaten ist es notwendig systematisch vorzugehen. Es ist von Vorteil die Daten in Kategorien zu unterteilen, um danach die Analyse dieser Rohdaten zu erleichtern. In der Tabelle 2.7 sind die Kategorien von Rohdaten die zu einer vollständigen Beschreibung einer Branche benötigt werden zusammengefasst.

Nach der Erstellung des Leitfadens ist es sinnvoll sich einen allgemeinen Überblick über die Branche zu verschaffen bevor Detailbetrachtungen vorgenommen werden. Dadurch kann ein allgemeines Verständnis für die Branche geschaffen werden, welches es ermöglicht wichtige von unwichtigen Informationen zu unterscheiden. Im Folgenden sind die Schritte beschrieben, die zu einen allgemeinen Überblick der Branche verhelfen können:

1. Identifikation der Branchenteilnehmer: Zuerst ist es sinnvoll die Branchenteilnehmer zu identifizieren und eine Liste zu erstellen, beginnend mit den führenden Unternehmen. Dadurch lassen sich die ersten Hauptkonkurrenten erkennen. Eine hilfreiche Quelle bei der Suche ist das statistische Bundesamt (Systematik der Wirtschaftszweige).

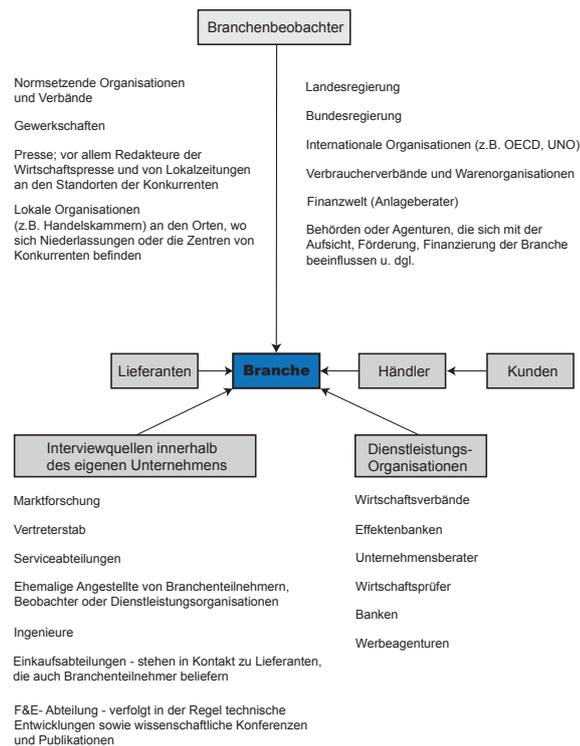


Abbildung 2.47: Quellen von Felddaten, Porter [2008, S. 460]

| Datenkategorie | Zusammenstellung |
|---|---------------------------|
| Produktlinie | Nach Unternehmen |
| Käufer und Käuferverhalten | Nach Jahr |
| Komplementäre Produkte | Nach funktionellem Gebiet |
| Ersatzprodukte | |
| Wachstum | |
| - Tempo | |
| - Verlauf (saisonal, zyklisch) | |
| - Determinanten | |
| Produktions- und Vertriebstechnologie | |
| - Kostenstruktur | |
| - Betriebsgrößensparnisse | |
| - Wertschöpfung | |
| - Logistik | |
| - Personal | |
| Marketing und Verkauf | |
| - Marktsegmentierung | |
| - Marketingpraktiken | |
| Lieferanten | |
| Vertriebskanäle | |
| Innovationen | |
| - Arten | |
| - Ursachen | |
| - Tempo | |
| - Betriebsgrößensparnisse | |
| Konkurrenten | |
| - Strategien und Ziele | |
| - Stärken und Schwächen | |
| Umfeld (gesellschaftlich, politisch, rechtlich) | |
| Gesamtwirtschaftliches Umfeld | |

Tabelle 2.7: Rohdatenkategorien in Anlehnung an Porter [2008, S. 452]

2. Branchenstudien: Bereits vorhandene Branchenanalysen sind sehr hilfreich, um sich einen allgemeinen Überblick über die Branche zu verschaffen. Dabei ist allerdings auf die

Qualität und Glaubwürdigkeit der Quelle zu achten.

3. Jahresberichte: Die Jahresberichte der letzten zehn bis 15 Jahre können zu einem guten Einblick in die Branche und deren Entwicklung verschaffen. Dabei müssen die Jahresberichte mehrerer Unternehmen betrachtet werden, um Erfolgs- oder Misserfolgskriterien der Branche identifizieren zu können.

Kapitel 3

Zielsetzung der Diplomarbeit

Das Ziel der Diplomarbeit ist es, unterschiedliche Erwärmungstechnologien im Presshärteprozess zu analysieren. Dies ermöglicht den Vergleich und die Bewertung konventioneller Erwärmungsanlagen mit der induktiven Erwärmungstechnologie. Neben einer Energiebilanz, sollen dabei auch die Anschaffungs- und Folgekosten, sowie der Platzbedarf als Bewertungskriterien herangezogen werden.

Einen wesentlichen Schwerpunkt bildet die Analyse der Struktur der Branche „Erwärmungstechnologien für den Presshärteprozess“. Daraus kann die Wettbewerbsintensität innerhalb der Branche festgestellt werden. Des Weiteren liefert sie wichtige Informationen zu Lieferanten und Abnehmern dieser Erwärmungsanlagen. Dadurch ist es möglich neue Erwärmungskonzepte und mögliche neue Konkurrenten der Branche zu identifizieren.

Des Weiteren soll das derzeitige Spektrum an pressgehärteten Bauteilen abgebildet und eine Prognose über den zukünftigen Bedarf an Warmumformbauteilen erstellt werden. Der Bedarf an pressgehärteten Bauteilen spiegelt auch den zukünftigen Bedarf an Erwärmungsanlagen wider.

Kapitel 4

Analyse und energetische Bewertung der Erwärmungstechnologien im Presshärteprozess

Die Auswahl der Erwärmungstechnologie bietet hohe Potenziale hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des gesamten Presshärteprozesses. Zur Identifikation der optimalen Erwärmungsstrategie ist es notwendig die Erwärmungstechnologien durch bestimmte Kriterien miteinander zu vergleichen. Neben dem Wirkungsgrad der gesamten Erwärmungsanlage sind auch die Kosten ein wichtiges Kriterium zur Bewertung. Aufgrund der Abmessungen der Erwärmungsanlagen, die sich durch die Erwärmungsvorgaben für die Halbzeuge ergeben, spielt auch der Platzbedarf eine wesentliche Rolle. Folgende Betriebszustände der Erwärmungsanlage werden dabei näher betrachtet:

- **Serien-Betrieb:** Die Erwärmungsanlage wird unter Volllast ohne Stillstandszeiten betrieben ($\dot{m} = 7200 \text{ kg/h}$).
- **Teillast-Betrieb:** Die Auslastung der Erwärmungsanlage beträgt 50 Prozent ($\dot{m} = 3600 \text{ kg/h}$).
- **Halte-Betrieb:** Die Erwärmungsanlage muss auf Temperatur gehalten werden. Der Grund dafür sind Stillstandszeiten bedingt durch Störungen der Fertigungslinie oder bei Werkzeugwechseln.
- **Standby-Betrieb:** Die Ofentemperatur wird am Wochenende und an nicht produktiven Schichten auf 500°C abgesenkt.

4.1 Anfrage an die Ofenhersteller

Um eine Bewertung der derzeitig eingesetzten Erwärmungstechnologien durchführen zu können ist es notwendig Angebote von Ofenherstellern einzuholen. Dazu muss ein Referenzbauteil bestimmt werden, auf das sich alle Betrachtungen beziehen. Nur dadurch wird eine gemeinsame Basis für einen Vergleich geschaffen. Als Referenzbauteil wird eine Formplatte für eine übliche B-Säule, ähnlich der Passat B6-B-Säule, festgelegt und daraus ein Lastenheft für die Ofenhersteller erstellt.

Die Formplatte hat die Abmessungen von $1700\text{mm} \times 800\text{mm}$ bei einer Blechdicke von $1,5\text{mm}$. Der Massendurchsatz für die Erwärmungsanlage ergibt sich bei einer Doppelfertigung und einer Taktzeit von 16 Sekunden zu 7200 kg/h . Als Werkstoff der Formplatte kommt ein beschichteter borlegierter Stahl 22MnB5 zum Einsatz. In der Anfrage wurden neben der AlSi-Beschichtung auch andere Beschichtungen und unbeschichtetes Material (Schutzgasbetrieb) berücksichtigt. Die Ofen-Auslastung wurde mit 16 Stunden pro Tag, also einer zweischichtigen Auslastung festgelegt. Dies entspricht einer wöchentlichen Nutzungsdauer von 80 Stunden. Des Weiteren wurde auch die Nichtnutzung der Anlage von Freitags 22:00 Uhr bis Montags 6:00 Uhr (Schichtbeginn) in die Anfrage miteinbezogen. Für die Temperaturen wurden folgende Werte definiert. Die Einlegetemperatur beträgt $20\text{ }^\circ\text{C}$, die Entnahmetemperatur soll $950\text{ }^\circ\text{C}$ betragen, die Abweichungen sollen im Bereich von $\pm 15\text{ }^\circ\text{C}$ liegen. Eine maximale Temperaturüberschreitung von $+20\text{ }^\circ\text{C}$ bezogen auf die $950\text{ }^\circ\text{C}$ ist zulässig. Hinsichtlich der Positioniergenauigkeit an der Entnahmeposition zur Warmformpresse werden $\pm 2\text{mm}$ zugelassen. Die vollständige Anfrage an die Ofenhersteller liegt im Anhang B bei.

4.2 Energiebetrachtung

Die Ausgangsbasis für die Berechnung der Energieeffizienz der untersuchten Erwärmungstechnologien bildet die dem Bauteil theoretisch zuzuführende Wärmemenge. Dabei werden noch keine Verluste berücksichtigt. Sie ist das Produkt aus der zu erwärmenden Masse m , der spezifischen Wärmekapazität c_p des Werkstoffes und der Temperaturdifferenz ΔT .

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (4.1)$$

Durch Berücksichtigung der Durchsatzmenge je Zeiteinheit (Massendurchsatz) ergibt sich die theoretisch zuzuführende Heizleistung nach:

$$P_{th} = \dot{Q} = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T}{t} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (4.2)$$

Für sämtliche Vergleichsrechnungen werden die im Lastenheft angegebenen Eingangswerte herangezogen:

Abmessungen der Formplatte:

$$\begin{aligned} l &= 1,7\text{ m} \\ b &= 0,8\text{ m} \\ s &= 0,0015\text{ m} \\ V &= 0,00204\text{ m}^3 \end{aligned}$$

Materialdaten:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 7200\text{ kg/h (Serien-Betrieb)} \\ \dot{m} &= 3600\text{ kg/h (Teillast-Betrieb)} \\ \rho &= 7848,7\text{ } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Eintritts- und Austrittstemperatur:

$$t_{ein} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{aus} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$$

Die spezifische Wärmekapazität c_p ist temperaturabhängig und ist für den Werkstoff 22MnB5 in der Tabelle 4.1 angeführt.

| Temperatur $t[^\circ\text{C}]$ | spezifische Wärmekapazität $c_p[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}]$ |
|--------------------------------|---|
| 20 | 475,63 |
| 100 | 487,67 |
| 200 | 499,21 |
| 300 | 519,18 |
| 400 | 543,45 |
| 500 | 570,3 |
| 600 | 599,31 |
| 700 | 630,23 |
| 800 | 694,1 |
| 900 | 691,61 |
| 1000 | 689,12 |
| 1100 | 686,65 |

Tabelle 4.1: Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität des Materials 22MnB5, M. Spittel [2009]

Für die Berechnung werden mittlere spezifische Wärmekapazitäten $c_{p(t_1-t_2)}$ zwischen den einzelnen Temperaturbereichen (t_1 bis t_2) berechnet und sind in der Tabelle 4.2 angegeben.

| Temperatur $t_1 - t_2[^\circ\text{C}]$ | mittlere spezifische Wärmekapazität $c_{p(t_1-t_2)}[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}]$ |
|--|---|
| 20 - 100 | 481,65 |
| 100 - 200 | 493,44 |
| 200 - 300 | 509,195 |
| 300 - 400 | 531,315 |
| 400 - 500 | 556,875 |
| 500 - 600 | 584,805 |
| 600 - 700 | 614,77 |
| 700 - 800 | 662,165 |
| 800 - 900 | 692,855 |
| 900 - 1000 | 690,365 |

Tabelle 4.2: Mittlere spezifische Wärmekapazität von einzelnen Temperaturbereichen, nach M. Spittel [2009]

Für das betrachtete Material und die gewünschte Durchsatzmenge pro Stunde kann eine theoretisch zuzuführende Heizleistung P_{th} berechnet werden. Diese ergibt sich, aufgrund der Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität, aus der Summe der theoretischen Teilheizleistungen:

$$P_{th(20-100^{\circ}C)} = \dot{m} \cdot c_{p(20-100^{\circ}C)} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$P_{th(20-100^{\circ}C)} = 7200 \frac{kg}{h} \cdot 481,65 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 80K \cdot \frac{1}{3600 \frac{s}{h}}$$

$$P_{th(20-100^{\circ}C)} = 77064W = 77,064kW$$

Analog zur Berechnung der theoretischen Heizleistung im Temperaturbereich zwischen 20 und 100°C können die Teilheizleistungen bis 950°C berechnet werden.

$$P_{th(100-200^{\circ}C)} = 98,688kW$$

$$P_{th(200-300^{\circ}C)} = 101,839kW$$

$$P_{th(300-400^{\circ}C)} = 106,263kW$$

$$P_{th(400-500^{\circ}C)} = 111,375kW$$

$$P_{th(500-600^{\circ}C)} = 116,961kW$$

$$P_{th(600-700^{\circ}C)} = 122,954kW$$

$$P_{th(700-800^{\circ}C)} = 132,433kW$$

$$P_{th(800-900^{\circ}C)} = 138,571kW$$

$$P_{th(900-950^{\circ}C)} = 69,0365kW$$

Die Summe der Teilheizleistungen ergibt die gesamte theoretisch zuzuführende Heizleistung, bei voller Auslastung der Anlage.

$$P_{th-SB} = 1075,185kW$$

Für den Teillast-Betrieb ergibt sich demnach eine theoretische Heizleistung von:

$$P_{th-TB} = 537,592kW$$

4.2.1 Erwärmung mit konventionellem Ofen

Der Wirkungsgrad der Erwärmungsanlage kann aus den Angeboten der Ofenhersteller ermittelt werden. Er ist abhängig von der elektrischen Antriebs- und Steuerleistung, sowie dem Erdgas- und Stromverbrauch der Anlage. Des Weiteren wirken sich der Heizwert des verwendeten Erdgases und der tatsächliche Massendurchsatz auf den Wirkungsgrad aus. Je nach Detaillierungsgrad der erhaltenen Angebote kann dadurch ein Wirkungsgrad für den Serien- und den Teillast-Betrieb berechnet werden. Welche Verluste dabei auftreten ist von der Erwärmungsanlage abhängig. Dadurch muss jede Erwärmungsanlage separat betrachtet werden. Die typischen Verluste eines Rollenherdofens werden anhand eines Sankey-Diagramms in der Abbildung 4.1 dargestellt.

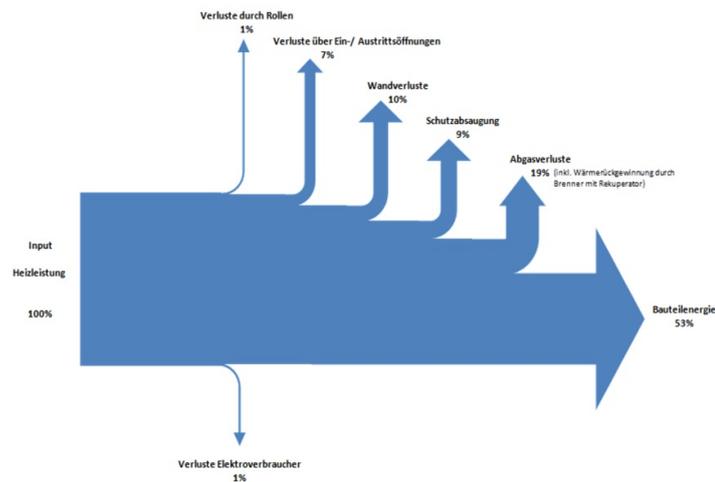


Abbildung 4.1: Sankey-Diagramm eines Rollenherdofens mit Schutzgas im Serien-Betrieb, nach Informationen der Wistra GmbH (Fa. Elino)

Des Weiteren ist es, sofern im Angebot enthalten, möglich die Verluste für den Halte- und Standby-Betrieb zu identifizieren. Die Abbildung 4.2 zeigt die Verluste eines Rollenherdofens im Standby-Betrieb (500°C).

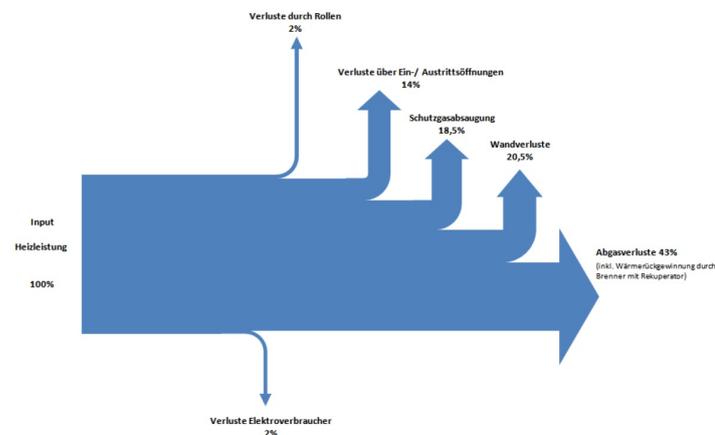


Abbildung 4.2: Sankey-Diagramm eines Rollenherdofens mit Schutzgas im Standby-Betrieb (500°C), nach Informationen der Wistra GmbH (Fa. Elino)

Für die Ermittlung der tatsächlichen Heizleistungen der unterschiedlichen Erwärmanlagen wird der untere Heizwert des Erdgases mit $H_u = 10,5 \text{ kWh/m}^3$ angenommen. Dies entspricht der Verwendung der Erdgassorte H-Gas.

Im Folgenden werden die Erwärmanlagen der verschiedenen Ofenhersteller, hinsichtlich des Wirkungsgrades und der Verluste bei den einzelnen Betriebszuständen, näher betrachtet.

WMU Wärmebehandlungsanlagen für Industrie und Umwelttechnik GmbH

Serien-Betrieb

Nach Angaben des Ofenherstellers WMU GmbH wird für den Serienbetrieb eine Heizleistung von 1900kW benötigt. Darin inkludiert sind, die Netto-Heizleistung von 1500kW, die Leerverluste von 180kW und der Wirkungsgrad der Rekuperator-Gasbrenner von 0,8. Weitere 80kW werden für den Antrieb, die Schaltanlage und die Gebläse benötigt. Zusammen mit der Heizleistung ergibt sich dadurch eine erforderliche Gesamtleistung von 1980kW. Daraus kann der Wirkungsgrad der Gesamtanlage für den Serien-Betrieb berechnet werden.

$$\eta_{WMU-SB} = \frac{P_{th-SB}}{P_{WMU-SB}} = \frac{1075,185kW}{1980kW} = 0,543$$

Teillast-Betrieb

Die Netto-Heizleistung für den Teillast-Betrieb beträgt 744,5kW und errechnet sich aus der theoretischen Heizleistung von 537,59kW, dem Regelanteil der Rekuperator-Gasbrenner (5 Prozent) und den Leerverlusten von 180kW. Mit einem Rekuperator-Gasbrenner Wirkungsgrad von 0,8 ergibt sich eine Brutto-Heizleistung von 930,6kW. Zusammen mit der Antriebs- und Steuerleistung von 80kW ergibt sich eine benötigte Gesamtleistung von 1010,6kW und ein Wirkungsgrad von 0,532.

$$\eta_{WMU-TB} = \frac{P_{th-TB}}{P_{WMU-TB}} = \frac{537,592kW}{1010,6kW} = 0,532$$

Halte-Betrieb

Beim Halte-Betrieb müssen für ein Halten der Temperatur die Leerverluste von 180kW kompensiert werden. Durch den Regelanteil und den Wirkungsgrad der Gasbrenner, sowie den Leistungen von ca. 50kW für die Steuerung und den Antrieb ergibt sich eine Gesamtleistung von 286,25kW.

Standby-Betrieb

Beim Standby-Betrieb müssen Leerverluste von 120kW durch die Ofenbeheizung kompensiert werden. Zusätzlich werden 50kW für die Steuerung des Ofens und den Antrieb der Förderrollen angenommen. Dadurch ergibt sich, unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades der Rekuperator-Gasbrenner eine Gesamtleistung von 207,5kW.

N. Bättenhausen Industrielle Wärme- u. Elektrotechnik GmbH***Serien-Betrieb***

Die Beheizung des Rollenherdofens erfolgt in sechs Heizzonen mit 30 Rekuperatorbrennern und einer gesamten Anschlussleistung von 2520kW. Abzüglich 756kW (30 Prozent der Anschlussleistung), die als Regelreserve eingeplant werden, ergibt sich eine Gesamtheizleistung von 1764kW. Zusätzlich werden 30kW für den Verbrennung- und Injektorlufventilator, 5,5kW für den Abgasventilator, 7,5kW für die Antriebe und 1kW für den Steuerstrom benötigt. Daraus ergeben sich eine Gesamtleistung von 1808kW und ein Wirkungsgrad von 0,5947.

$$\eta_{BH-SB} = \frac{P_{th-SB}}{P_{BH-SB}} = \frac{1075,185kW}{1808kW} = 0,5947$$

Teillast-Betrieb

Die Gesamtleistung beträgt im Teillast-Betrieb 1054,34kW und setzt sich, bei einem Brennerwirkungsgrad von 80 Prozent aus der Bauteil-Heizleistung von 671,99kW, der Verlustheizleistung von 338,35kW und der elektrischen Leistung von 44kW zusammen. Seitens der Bättenhausen GmbH werden die Verluste mit 1kW pro Quadratmeter Ofeninnenraumoberfläche angegeben, wodurch sich eine Netto-Verlustleistung von 270,68kW und durch den Wirkungsgrad der Brenner eine Brutto-Verlustleistung von 338,35kW ergibt.

$$\eta_{BH-TB} = \frac{P_{th-TB}}{P_{BH-TB}} = \frac{537,592kW}{1054,34kW} = 0,5099$$

Halte-Betrieb

Im Halte-Betrieb werden eine Gesamtheizleistung von 338,35kW und eine elektrische Leistung von 37,5kW benötigt um die Temperatur des Ofens konstant auf 950°C zu halten. Dies ergibt eine Gesamtverlustleistung von 375,85kW.

Standby-Betrieb

Die Verlustleistung für den Standby-Betrieb wird mit 0,5kW pro Quadratmeter Ofeninnenraumoberfläche angegeben. Dadurch ergeben sich eine Netto-Verlustleistung von 135,34kW und eine Brutto-Verlustleistung zu 169,175kW. Zusätzlich wird eine elektrische Leistung von 19,75kW benötigt, wodurch sich eine Gesamtverlustleistung von 188,925kW ergibt.

SECO/WARWICK EUROPE S.A.***Serien-Betrieb***

Die SECO/WARWICK EUROPE S.A. gibt die gesamte Heizleistung mit 2575kW an. Die Beheizung des Ofens erfolgt in 16 Heizzonen mit 128 Rekuperator- Gasbrennern. Die gesamte benötigte elektrische Leistung beträgt 88 kW. Daraus ergeben sich eine Gesamtleistung von 2663kW und ein Wirkungsgrad der Gesamtanlage zu 0,4037.

$$\eta_{SW-SB} = \frac{P_{th-SB}}{P_{SW-SB}} = \frac{1075,185kW}{2663,00kW} = 0,4037$$

Teillast-Betrieb

Die gesamte Heizleistung für den Teillast-Betrieb wird mit 1550kW angegeben. Zusätzlich wird eine elektrische Leistung von 88kW für den Betrieb der Erwärmungsanlage benötigt. Dadurch ergeben sich eine Gesamtleistung von 1638kW und ein Wirkungsgrad zu 0,3282.

$$\eta_{SW-TB} = \frac{P_{th-TB}}{P_{SW-TB}} = \frac{537,592kW}{1638kW} = 0,3282$$

Halte-Betrieb

Die gesamte Verlustleistung wird beim Halte-Betrieb mit 581kW angegeben. Dieser setzt sich aus der Heizleistung von 525kW und elektrischen Leistung von 56kW zusammen.

Standby-Betrieb

Die Verlustleistung beträgt insgesamt 276kW im Standby-Betrieb. Davon werden 220kW für die Beheizung des Rollenherdofens und 56 kW an elektrischer Leistung benötigt.

4.2.2 Erwärmung mittels Induktionsanlage

Um die induktive mit der konventionellen Erwärmung vergleichen zu können, werden als Basis für die Berechnungen die Eingangsdaten aus der Anfrage an die Ofenhersteller herangezogen. Wie in Kapitel 4.2 berechnet, müssen die gleichen theoretische Heizleistungen von $P_{th_{SB}} = 1075,185kW$ (Serien-Betrieb) und $P_{th_{TB}} = 537,592kW$ (Teillast-Betrieb) für die Erwärmung des Materials aufgewendet werden. Diese setzen sich bei der induktiven Erwärmung aus den Teil- Heizleistungen der einzelnen Erwärmungsstufen zusammen. Dabei erfolgt die Erwärmung der Formplatte durch einen Längsfeldinduktor von 20 auf 600°C, im induktiv beheizten Muffelofen von 600 auf 750°C und durch einen Flächeninduktor von 750 auf 950°C.

Serien-Betrieb

Die Vorgehensweise bei der Berechnung für die theoretischen Heizleistungen der einzelnen Erwärmungsstufen wird anhand der Erwärmung durch den Längsfeldinduktor gezeigt.

$$P_{th-LF(20-100^\circ C)} = \dot{m} \cdot c_{p(20-100^\circ C)} \cdot (T_2 - T_1) = 7200 \frac{kg}{h} \cdot 481,65 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 80K \cdot \frac{1}{3600 \frac{s}{h}}$$

$$P_{th-LF(20-100^\circ C)} = 77064W = 77,064kW$$

$$P_{th-LF(100-200^\circ C)} = \dot{m} \cdot c_{p(100-200^\circ C)} \cdot (T_2 - T_1) = 7200 \frac{kg}{h} \cdot 493,44 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 100K \cdot \frac{1}{3600 \frac{s}{h}}$$

$$P_{th-LF(100-200^\circ C)} = 98688W = 98,688kW$$

Analog werden die theoretischen Teil- Heizleistungen bis 600°C berechnet und ergeben:

$$P_{th-LF(200-300^\circ C)} = 101,839kW$$

$$P_{th-LF(300-400^\circ C)} = 106,263kW$$

$$P_{th-LF(400-500^\circ C)} = 111,375kW$$

$$P_{th-LF(500-600^\circ C)} = 116,961kW$$

Die theoretisch benötigte Heizleistung des Längsfeldinduktors ist die Summe der Teil- Heizleistungen bis 600°C und ergibt:

$$P_{th-LF} = 612,190kW$$

Für die Erwärmung durch den induktiv beheizten Muffelofen und den Flächeninduktor wird eine analoge Berechnung durchgeführt.

$$P_{th-M} = 189,1705kW$$

$$P_{th-FL} = 273,824kW$$

$$P_{th-SB} = P_{th-LF} + P_{th-M} + P_{th-FL} = 1075,185kW$$

Die Berechnung des Gesamtwirkungsgrades der Induktionsanlage erfolgt über die Wirkungsgrade der Anlagenkomponenten, die Anschlussleistung des widerstandsbeheizten Temperaturhalteofens und die Antriebsleistung der Gesamtanlage. Der Wirkungsgrad des Längsfeldinduktors setzt sich aus dem Wirkungsgrad des Umrichters $\eta_{Um} = 0,95$, der Zuleitung $\eta_{Zu} = 0,97$ und den Strahlungsverlusten $\eta_{St} = 0,94$ zusammen.

$$\eta_{LF} = \eta_{Um} \cdot \eta_{Zu} \cdot \eta_{St} = 0,95 \cdot 0,97 \cdot 0,94$$

$$\eta_{LF} = 0,86621$$

Daraus kann die notwendige Anschlussleistung des Längsfeldinduktors berechnet werden.

$$P_{LF} = \frac{P_{th-LF}}{\eta_{LF}} = \frac{612,190kW}{0,86621}$$

$$P_{LF} = 706,745kW \rightarrow P_{LF} = 710kW$$

Der Gesamtwirkungsgrad des Flächeninduktors wird durch den Wirkungsgrad der Spule $\eta_{Sp} = 0,5$, der Zuleitung $\eta_{Zu} = 0,95$, des Transformators $\eta_{Tr} = 0,95$ und des Umrichters $\eta_{Um} = 0,9$ beeinflusst.

$$\eta_{FL} = \eta_{Sp} \cdot \eta_{Zu} \cdot \eta_{Tr} \cdot \eta_{Um} = 0,5 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,9$$

$$\eta_{FL} = 0,406125$$

Durch den Wirkungsgrad kann die Anschlussleistung bestimmt werden.

$$P_{FL} = \frac{P_{th-FL}}{\eta_{FL}} = \frac{273,824kW}{0,406125}$$

$$P_{FL} = 674,236kW \rightarrow P_{FL} = 680kW$$

Beim induktiv beheizten Muffelofen erfolgt die Erwärmung der Formplatte, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, durch einen Längsfeldinduktor. Dadurch kann die benötigte Anschlussleistung über den Wirkungsgrad $\eta_{LF} = 0,86621$ berechnet werden.

$$P_M = \frac{P_{th-M}}{\eta_{LF}} = \frac{189,1705kW}{0,86621}$$

$$P_M = 218,3887kW \rightarrow P_M = 220kW$$

Die Anschlussleistung des widerstandsbeheizten Temperaturhalteofens beträgt für die Pilotanlage 5,3kW und wird für die Serienanlage mit $P_{HO} = 50kW$ geschätzt. Wie hoch die Anschlussleistung tatsächlich sein muss, hängt von der Isolierung des Ofens und dem Temperaturabfall der Formplatte nach der Erwärmung durch den Flächeninduktor ab.

Die benötigte Antriebsleistung der Serienanlage kann nur abgeschätzt werden. Aus den Angeboten der Rollenherdofenhersteller kann eine durchschnittliche Antriebsleistung pro Meter Anlagenlänge berechnet werden und ergibt $P_{AnKon} = 0,1521 \frac{kW}{m}$. Unter der Annahme, dass pro Meter Anlagenlänge der Induktionsanlage dieselbe durchschnittliche Antriebsleistung wie beim Rollenherdofen benötigt wird ergibt sich bei einer Gesamtlänge der Serienanlage von $l_{Ind} = 16m$ folgende Antriebsleistung:

$$P_{AnInd} = l_{Ind} \cdot P_{AnKon} = 16m \cdot 0,1521 \frac{kW}{m} = 2,4336kW$$

Für die weiteren Berechnungen wird die benötigte Antriebsleistung der Serienanlage mit $P_{AnInd} = 3kW$ angenommen. Der Steuerleistung für die elektrischen Komponenten der Anlage wird gleich der von konventionellen Rollenherdöfen angenommen. Diese beträgt laut dem Angebot der Bättenhausen GmbH $P_S = 1kW$

Aus der Summe der Teilleistungen kann die gesamte benötigte Leistung und dadurch auch der Wirkungsgrad für eine Serienanlage mit induktiver Bauteilerwärmung berechnet werden.

$$P_{Ind-SB} = P_{LF} + P_M + P_{FL} + P_{HO} + P_{AnInd} + P_S$$

$$P_{Ind-SB} = 710kW + 220kW + 680kW + 50kW + 3kW + 1kW$$

$$P_{Ind-SB} = 1664kW$$

$$\eta_{Ind-SB} = \frac{P_{th}}{P_{Ind-SB}} = \frac{1075,185kW}{1664kW}$$

$$\eta_{Ind} = 0,64614$$

Teillast-Betrieb

Die Berechnung des Wirkungsgrades für den Teillast-Betrieb erfolgt analog der Berechnung für den Serien-Betrieb. Die theoretische Heizleistung beträgt dabei $P_{th-TB} = 537,592kW$ und setzt sich aus der theoretischen Heizleistung des Längsfeldinduktors von 306,095kW, des induktiv beheizten Muffelofens von 94,585kW und des Flächeninduktors von 136,912kW zusammen. Mit den Wirkungsgraden des Längsfeldinduktors $\eta_{LF} = 0,86621$, des Muffelofens $\eta_M = 0,86621$ und des Flächeninduktors $\eta_{FL} = 0,46125$ können die Heizleistungen der einzelnen Erwärmungsstufen berechnet werden. Zusammen mit der Antriebs- und Steuerleistung, sowie der Heizleistung des Temperaturhalteofens ergibt sich die Gesamtheizleistung P_{Ind-TB} .

$$P_{Ind-TB} = P_{LF-TB} + P_{M-TB} + P_{FL-TB} + P_{HO} + P_{AnInd} + P_S$$

$$P_{Ind-TB} = 360kW + 110kW + 340kW + 50kW + 3kW + 1kW$$

$$P_{Ind-TB} = 864kW$$

$$\eta_{Ind-TB} = \frac{P_{th}}{P_{Ind-TB}} = \frac{537,592kW}{864kW}$$

$$\eta_{Ind-TB} = 0,6222$$

Halte-Betrieb

Im Halte-Betrieb können die Erwärmungskomponenten abgeschaltet werden. Es ist nur eine Anschlussleistung von 15kW für den Betrieb des Temperaturhalteofens aufzuwenden.

Standby-Betrieb

Im Standby-Betrieb können der Längsfeldinduktor, der Muffelofen und der Flächeninduktor abgeschaltet werden. Die Verluste in der Höhe von 10kW ergeben sich durch den Temperaturhalteofen der konstant auf 500°C gehalten wird.

4.2.3 Gesamtwirkungsgrade der Erwärmungsanlagen

Um die Erwärmungstechnologien miteinander vergleichen zu können, sind die Wirkungsgrade und die Verlustleistungen der Erwärmungsanlagen in der Tabelle 4.3 zusammengefasst. Dabei beziehen sich die Wirkungsgrade auf die einzelnen Betriebszustände der Anlagen.

| | WMU GmbH | N. Bättenhausen GmbH | SECO/WARWICK S.A. | T&F |
|------------------------|----------|----------------------|-------------------|--------|
| Wirkungsgrad | | | | |
| Serien-Betrieb | 0,5430 | 0,5947 | 0,4037 | 0,6461 |
| Teillast-Betrieb | 0,5320 | 0,5099 | 0,3282 | 0,6222 |
| Verlustleistung | | | | |
| Halte-Betrieb | 286,25kW | 375,85kW | 581kW | 15kW |
| Standby-Betrieb | 207,5kW | 188,925kW | 276kW | 10kW |

Tabelle 4.3: Wirkungsgrade und Verluste bei unterschiedlichen Betriebszuständen

Daraus resultiert, dass die induktive Erwärmungsanlage höhere Wirkungsgrade bei allen Betriebszuständen aufweist. Des Weiteren sind die Verluste im Halte- und Standby-Betrieb wesentlich geringer.

Zur Berechnung des Gesamtwirkungsgrades der einzelnen Erwärmungsanlagen ist das Betreibermodell der Abnehmer entscheidend. Er errechnet sich unter Berücksichtigung der produktiven Zeiten (Serien- und Teillast-Betrieb), sowie den Stillstands- (Halte-Betrieb) und den Nebenzeiten (Standby-Betrieb) daher wie folgt:

$$\eta_{ges} = \frac{P_{th-SB} \cdot t_{SB} + P_{th-TB} \cdot t_{TB}}{P_{SB} \cdot t_{SB} + P_{TB} \cdot t_{TB} + P_{HB} \cdot t_{HB} + P_{SBB} \cdot t_{SBB}} \quad (4.3)$$

Für die Berechnung des Gesamtwirkungsgrades wird ein Jahr mit 251 Produktions-, 104 Wochenend- und 9 Feiertage definiert. Die Betriebszeiten für die einzelnen Betriebszustände variieren zwischen den Betreibermodellen (1 Schicht-, 2 Schicht- und 3-Schicht-Betrieb) und werden in der Tabelle 4.4 festgelegt.

Die Gesamtwirkungsgrade werden nach der Formel (4.3) für jedes Betreibermodell berechnet. Diese sind bei der Betrachtung eines einzigen Produktionstages in der Tabelle 4.5 angeführt.

Aus der Tabelle 4.5 ist ersichtlich, dass die Rollenherdöfen und die Induktionsanlage im 3 Schicht- Betrieb den besten Wirkungsgrad aufweisen. Umso höher der Anteil der Produktionszeit (Serien- und Teillast-Betrieb) an der Gesamtzeit ist, desto höher ist der Wirkungsgrad

der Erwärmungsanlagen. Geringe Produktionszeiten, wie beim 1 Schicht- Betrieb, führen zur deutlichen Verschlechterung des Wirkungsgrades bei Rollenherdöfen während die Abnahme bei der induktiven Erwärmung gering ist. Die Gründe dafür sind die relativ hohen Energieverbräuche des Rollenherdofens während den Neben- und Stillstandszeiten. Die Betrachtung eines kompletten Produktionsjahres verdeutlicht diesen Umstand, Tabelle 4.6.

| Betriebszustände | 1 Schicht - Betrieb | | 2 Schicht - Betrieb | | 3 Schicht - Betrieb | |
|---------------------------------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|
| | Std. / Tag | Std. / Jahr | Std. / Tag | Std. / Jahr | Std. / Tag | Std. / Jahr |
| Serien-Betrieb | 6 | 1506 | 12 | 3012 | 18 | 4518 |
| Teillast-Betrieb | 1,75 | 439,25 | 3,50 | 878,50 | 5,25 | 1317,75 |
| Halte-Betrieb | 0,25 | 62,75 | 0,50 | 125,50 | 0,75 | 188,25 |
| Standby-Betrieb (Produktion) | 16 | 4016 | 8 | 2008 | - | - |
| Standby-Betrieb (WE+Feiertage) | - | 2712 | - | 2712 | - | 2712 |

Tabelle 4.4: Festgelegte Betriebszeiten bei unterschiedlichen Betreibermodellen

| | WMU GmbH | N. Bättenhausen GmbH | SECO/WARWICK S.A. | T&F |
|--|----------|----------------------|-------------------|--------|
| Wirkungsgrad (1 Schicht -Betrieb) | 0,4338 | 0,4782 | 0,3158 | 0,6340 |
| Wirkungsgrad (2 Schicht -Betrieb) | 0,5080 | 0,5605 | 0,3679 | 0,6406 |
| Wirkungsgrad (3 Schicht -Betrieb) | 0,5388 | 0,5945 | 0,3893 | 0,6428 |

Tabelle 4.5: Vergleich der Wirkungsgrade - Betrachtung eines Produktionstages

| | WMU GmbH | N. Bättenhausen GmbH | SECO/WARWICK S.A. | T&F |
|--|----------|----------------------|-------------------|--------|
| Wirkungsgrad (1 Schicht -Betrieb) | 0,3834 | 0,4225 | 0,2801 | 0,6281 |
| Wirkungsgrad (2 Schicht -Betrieb) | 0,4717 | 0,5202 | 0,3425 | 0,6376 |
| Wirkungsgrad (3 Schicht -Betrieb) | 0,5109 | 0,5637 | 0,3699 | 0,6408 |

Tabelle 4.6: Vergleich der Wirkungsgrade - Betrachtung eines Produktionsjahres inkl. Wochenend- und Feiertage

Insgesamt verfügt die induktive Erwärmungsanlage, im Vergleich zu Rollenherdöfen, über einen höheren Wirkungsgrad in allen betrachteten Betreibermodellen. Dies ist auf eine effizientere Erwärmung im Serien- und Teillast-Betrieb, sowie auf geringere Verluste im Halte- und Standby-Betrieb zurückzuführen.

4.3 Kostenvergleich

Die Kosten bilden meist die Entscheidungsgrundlage für den Kauf von Erwärmungsanlagen. Folgend werden neben den Investitions- auch die Folgekosten der einzelnen Angebote ausgewertet und verglichen.

WMU Wärmebehandlungsanlagen für Industrie und Umwelttechnik GmbH

Die Investitionskosten für den Rollenherdofen werden laut Angebot mit 2.238.000 € angegeben. Zusätzlich belaufen sich die Kosten für die Montage der Anlage auf 94.000 € wodurch sich einen Netto- Gesamtpreis von 2.332.000 € ergibt. Optional wird vom Hersteller eine Taupunktregelung der Luft zu 38.000 € angeboten. Die Instandhaltungskosten werden mit 152.000 € pro Jahr angegeben. Dies entspricht einem Durchschnittswert über die gesamte Lebensdauer und ist in den ersten Jahren deutlich niedriger. Die Betriebskosten sind abhängig vom aktuellen Strom- und Gaspreis, vom verwendeten Schichtmodell und den tatsächlichen Produktionszeiten der Erwärmungsanlage.

N. Bättenhausen Industrielle Wärme- u. Elektrotechnik GmbH

Der Netto- Gesamtpreis für den Rollenherdofen beträgt 1.990.000 €. Dieser Preis bezieht sich auf den Liefer- und Leistungsumfang gemäß dem Angebot. Zusätzlich werden Ersatzrollen für die eingesetzten ROLLMOD Rollenherdmodule zu 450 € pro Stück angeboten. Weitere Angaben zu den Instandhaltungs-, Instandsetzungs- oder Betriebskosten liegen nicht vor.

SECO/WARWICK EUROPE S.A.

Der Grundpreis für den Rollenherdofen wird mit 2.578.752 € angegeben. Zuzüglich den Kosten für die Transport von 25.180 € und den Kosten für die Montage, Inbetriebnahme und Einschulung von 38.450 € ergibt sich ein Netto- Gesamtpreis von 2.642.382 €. Angaben zu den monatlichen Instandhaltungs-, Instandsetzungs- oder Betriebskosten sind im Angebot nicht enthalten.

Institut T&F - Induktive Erwärmungsanlage

Die Anschaffungskosten für die Induktive Erwärmungsanlage werden mit ca. 900.000 € (Netto) angegeben. Die Kosten für die Montage, den Transport und die Inbetriebnahme betragen 60.000 €. Dadurch ergibt sich ein Netto- Gesamtpreis von 960.000 € für die induktive Erwärmungsanlage.

Die Kosten für die betrachteten Erwärmungsanlagen werden in der Tabelle 4.7 zusammengefasst. Daraus resultiert, dass die Anschaffungskosten für die induktive Erwärmungsanlage bei unter 50 Prozent von vergleichbaren Rollenherdöfen liegen.

| | WMU GmbH | N. Bättenhausen GmbH | SECO/WARWICK S.A. | T&F |
|---------------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| Anschaffungskosten | | | | |
| Kosten - Erwärmananlage | 2.238.000 € | 1.990.000 € | 2.578.752 € | 900.000 € |
| Montage, Transport und Inbetriebnahme | 94.000 € | - | 63.630 € | 60.000 € |
| Gesamtkosten (exkl. MWST) | 2.332.000 € | 1.990.000 € | 2.642.382 € | 960.000 € |
| Gesamtkosten (inkl. MWST) | 2.798.400 € | 2.388.000 € | 3.170.858 € | 1.152.000 € |

Tabelle 4.7: Vergleich der Anschaffungskosten für die Erwärmananlagen

4.3.1 Betriebskosten

Nicht nur die Anschaffungskosten, sondern auch die laufenden Betriebskosten sind bei den Erwärmananlagen von wesentlicher Bedeutung. Für den Vergleich der Betriebskosten werden die Betriebszeiten der einzelnen Betreibermodelle, gemäß den Annahmen aus der Tabelle 4.4, herangezogen. Des Weiteren wird ein Strompreis von 0,0895 €/kWh und ein Erdgaspreis von 0,04334 €/kWh als konstant über den Betrachtungszeitraum angenommen. Diese Preise entsprechen den Netto-Preisen in Deutschland. Die Brutto-Preise sind sehr stark vom jährlichen Verbrauch abhängig, Abbildung 4.3. Diese werden von den Stromlieferanten unternehmensspezifisch verhandelt. Durch Sonderregelungen senkt der Staat des Weiteren die Preise für Unternehmen in stromintensiven Industrien. [EUROSTAT, 2013b], [EUROSTAT, 2013a], [Bundesnetzagentur, 2013]

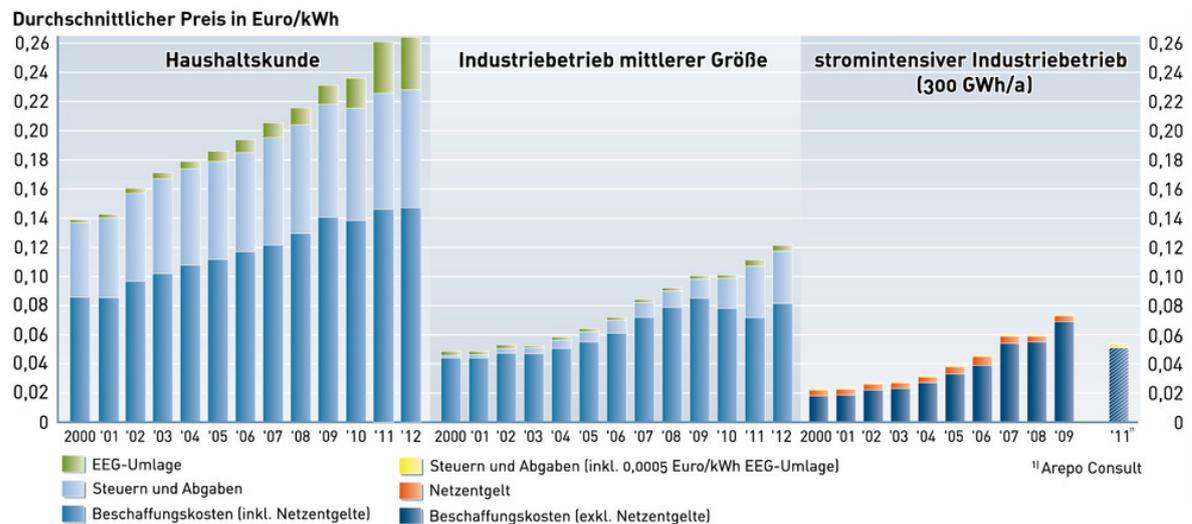


Abbildung 4.3: Strompreise verschiedener Endverbraucher, Arepo Consult [2013]

Die laufenden Betriebskosten berechnen sich aus den benötigten Heizleistungen, den Betriebszeiten sowie dem Preis für Strom und Erdgas. Diese werden in der Tabelle 4.8 zusammengefasst und sind für einen Betrachtungszeitraum von einem Jahr und zehn Jahren gesondert ausgewiesen.

Der Rollenherdofen der N.Bättenhausen GmbH hat die geringsten Betriebskosten in allen Betreibermodellen. Trotz des höheren Wirkungsgrades der Induktionsanlage, bei allen Be-

| | 1 Schicht-Betrieb | | 2 Schicht-Betrieb | | 3 Schicht-Betrieb | |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| | Betriebskosten pro Jahr | Betriebskosten pro 10 Jahre | Betriebskosten pro Jahr | Betriebskosten pro 10 Jahre | Betriebskosten pro Jahr | Betriebskosten pro 10 Jahre |
| WMU GmbH | 232.614 € | 2.326.136 € | 366.501 € | 3.665.012 € | 494.576 € | 4.945.760 € |
| T&F | 264.358 € | 2.643.577 € | 520.897 € | 5.208.967 € | 694.915 € | 6.949.145 € |
| N. Bättenhausen GmbH | 200.537 € | 2.005.373 € | 321.580 € | 3.215.798 € | 439.607 € | 4.396.071 € |
| SECO/WARWICK S.A. | 312.512 € | 3.125.118 € | 497.943 € | 4.979.427 € | 676.952 € | 6.769.521 € |

Tabelle 4.8: Vergleich der Betriebskosten bei unterschiedlichen Betreibermodellen

triebszuständen, sind die Betriebskosten höher als bei Rollenherdöfen. Der Grund dafür ist, dass diese Erwärmungsanlage mit Strom betrieben wird und derzeit der Strom- deutlich höher als der Erdgaspreis ist. Die Betriebskosten der Induktionsanlage des T&F Instituts unterscheiden sich im 1 Schicht-Betrieb kaum von dem der Rollenherdöfen. Im 3 Schicht-Betrieb ist der Unterschied am deutlichsten. Die weiteren Betrachtungen beziehen sich deswegen auf dieses Betreibermodell.

4.3.2 Gesamtkosten

Eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit der Erwärmungsanlage kann nicht nur anhand der Anschaffungs- und Betriebskosten getroffen werden. Vielmehr müssen auch weitere kostenverursachende Faktoren in die Betrachtungen miteinfließen. Der Platzbedarf und die Kosten für Ersatzrollen wirken sich vor allem bei Rollenherdöfen auf die Gesamtkosten aus. Die Kosten für die Platzschaffung werden von der ITG Induktionsanlagen GmbH auf circa 3000 € pro Quadratmeter geschätzt. Der Mehr-Platzbedarf der Rollenherdöfen im Vergleich zur Induktionsanlage ist in der Abbildung 4.5 dargestellt. Des Weiteren müssen beim Rollenherdofen die Rollen präventiv gewechselt werden. Dies sind vor allem die Rollen, welche in der Diffusionszone des Rollenherdofens betrieben werden. Der Preis für eine Ersatzrolle wird derzeit von der Bättenhausen GmbH mit 450 € angegeben. Pro Monat werden, laut der Schwartz GmbH, circa 20 Rollen ausgetauscht. Bei der Induktionsanlage werden ebenfalls keramische Rollen für den Transport der Platinen eingesetzt. Diese sind längs zur Transportrichtung angeordnet, wodurch deutlich weniger Rollen verwendet werden können. Des Weiteren liegen die Platinen während des Transportes auf den keramischen Rollen auf und rollen nicht über diese. Das Eindiffundieren der AlSi-Beschichtung in die Transportrollen kann auch hier nicht verhindert werden. Aufgrund der Anordnung der Transportrollen können diese aber gedreht werden und sind dadurch länger einsetzbar. Die Gesamtkosten sind für einen Betrachtungszeitraum von zehn Jahren in der Tabelle 4.9 angegeben.

| | WMU GmbH | N. Bättenhausen GmbH | SECO/WARWICK S.A. | T&F |
|------------------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------|
| Anschaffungskosten | 2.798.400 € | 2.388.000 € | 3.170.858 € | 1.152.000 € |
| Betriebskosten (3 Schicht-Betrieb) | 4.945.760 € | 4.396.071 € | 6.769.521 € | 6.949.145 € |
| Mehr-Kosten für Platzschaffung | 733.650 € | 491.850 € | 1.025.340 € | - |
| Kosten für Ersatzrollen | 1.080.000 € | 1.080.000 € | 1.080.000 € | 96.000 € |
| Summe | 9.557.810 € | 8.355.921 € | 12.045.719 € | 8.197.145 € |

Tabelle 4.9: Vergleich der Gesamtkosten

Trotz der höheren Betriebskosten liegen die Gesamtkosten für die Induktionsanlage unter denen der betrachteten Rollenherdöfen. Bei sinkenden Strom- und steigenden Erdgaspreisen wird der Vorteil der Induktionsanlage zum Rollenherdofen noch deutlicher. Die Energiepreise unterliegen starken Schwankungen und sind von vielen Faktoren abhängig. Dadurch kann eine Prognose über die zukünftige Entwicklung nicht abgegeben werden. Großes Potenzial hat die Induktionsanlage auch in Ländern mit niedrigen Strompreisen wie z.B. den USA, Kanada oder Russland. Die weltweiten relativen Industriestrompreise verschiedener Länder sind in der Abbildung 4.4 dargestellt.

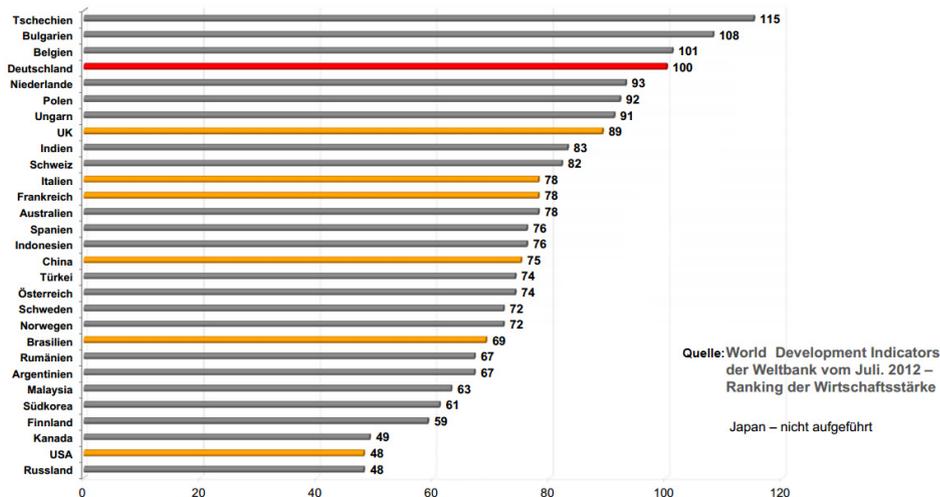


Abbildung 4.4: Weltweite Industriestrompreise im Vergleich - Basis Deutschland = 100 Prozent, in Anlehnung an VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. [2013]

4.4 Platzbedarf

Die Vorgaben für die Erwärmung des Materials, die Abmessungen der Formplatte und die geforderten Zykluszeiten der Abnehmer bestimmen die Abmessungen von Rollenherdöfen. Zusätzlich ist noch der Platzbedarf für das Austauschen der Förderrollen bzw. der Förderrollenmodule bei der Ermittlung der gesamten Aufstellungsfläche zu berücksichtigen. Der Platzbedarf für die Serienanlage mit induktiver Erwärmung kann nur abgeschätzt werden und setzt sich folgendermaßen zusammen:

- **Induktionsanlage:** $l_{Ind} = 16m$ (Länge der Module = $12m + \text{Einlaufbereich} = 2,0m + \text{Auslaufbereich} = 2,0m$), $b_{Ind} = 3,2m$ (Ofeninnenraumbreite = $1,8m + \text{Isolierungsgesamtbreite} = 0,7m + \text{Breite des Schwingkreises für die Induktoren} = 0,7m$), $A_{Ind} = 51,2m^2$.
- **Umrichter- Längsfeldinduktor:** $A_{ULF} = b_{ULF} \cdot l_{ULF} = (0,8 \cdot 2,0)m = 1,6m^2$, in Anlehnung an die Konzeptanlage der SMS-Elotherm GmbH

- **Umrichter- Flächeninduktor und Muffelofen:** $A_{FL-M} = b_{FL-M} \cdot l_{FL-M} = (0,8 \cdot 2,0)m = 1,6m^2$, in Anlehnung an die Konzeptanlage der SMS-Elotherm GmbH
- **Steuerschrank:** $A_S = b_S \cdot l_S = (0,8 \cdot 1,5)m = 1,2m^2$, in Anlehnung an die Konzeptanlage der SMS-Elotherm GmbH
- **Rückkühlanlage:** $A_{RK} = b_{RK} \cdot l_{RK} = (2 \cdot 2)m = 4m^2$, in Anlehnung an die Konzeptanlage der SMS-Elotherm GmbH
- **freie Fläche:** $A_{FInd} = l_{FInd} \cdot b_{FIn} = (16 \cdot 3,5)m = 56m^2$, für Wasser-, Strom-, und Steuerleitungen sowie als Zugangsmöglichkeit bei Instandhaltungsmaßnahmen. In diesem Bereich werden auch die Umrichter, der Steuerschrank, die Rückkühlanlage und eventuell die Kühlwasser-Tanks aufgestellt.

Der gesamte Platzbedarf für die Serienanlage ergibt sich somit zu $A_{Ind-ges} = 107,2m^2$.

Der Vergleich zwischen dem Platzbedarf von Rollenherdöfen, verschiedener Hersteller, und der Serienanlage mit induktiver Erwärmung ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

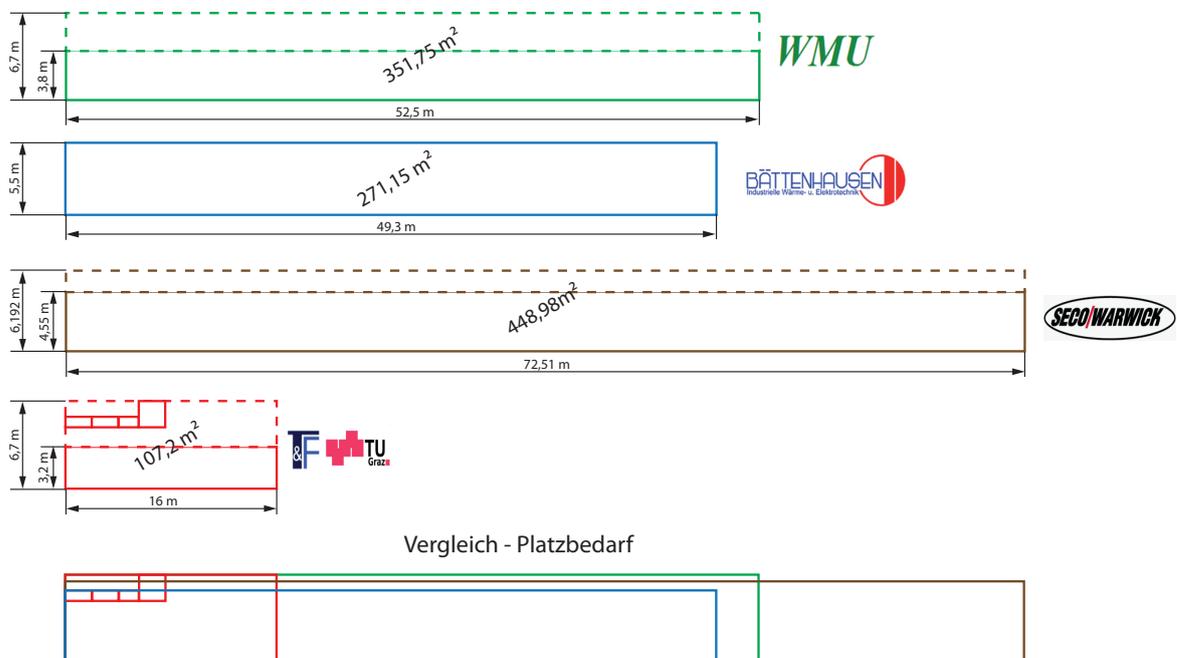


Abbildung 4.5: Vergleich des Platzbedarfes der Erwärmungsanlagen

Aus dem Vergleich resultiert, dass die induktive Erwärmungsanlage den geringsten Platzbedarf aufweist.

Kapitel 5

Branchenanalyse - Potenziale für die induktive Erwärmungstechnologie

5.1 Analyse der Branche „Erwärmungstechnologien für den Presshärteprozess“

Die Strukturanalyse der Branche „Erwärmungstechnologien für den Presshärteprozess“ ist für die Abschätzung des Marktpotenzials, der induktiven Erwärmungstechnologie, von großer Bedeutung. Dadurch soll es möglich sein die Chancen und Barrieren für diese Erwärmungstechnologie in der Branche zu identifizieren. Die Analyse wurde in Form von Internet-Recherchen, durch Fragebögen und telefonische Interviews mit Unternehmen der Branche durchgeführt. Des Weiteren wurden Angebote kompletter Erwärmungsanlagen (Rollenherdöfen) eingeholt.

5.1.1 Grad der Rivalität unter bestehenden Unternehmen

Es können zehn Unternehmen identifiziert werden die Erwärmungsanlagen für den Presshärteprozess anbieten, Abbildung 5.1.

Der deutliche Marktführer ist die Schwartz GmbH, mit Sitz in Deutschland. Diese wird bis zum Ende des Jahres 2013 mehr als 140 Erwärmungsöfen für das Presshärten ausliefern und steht in enger Zusammenarbeit mit der Hütte GmbH. Der Marktanteil der Schwartz GmbH liegt bei über 70 Prozent. Der Hauptkonkurrent ist die österreichische EBNER Industrieofenbau GmbH. Dieses Unternehmen ist nicht nur in dieser Branche tätig, überzeugt aber durch die ständige Weiterentwicklung der Ofentechnologie für das Presshärten und verfügt über gute Kontakte zu den Abnehmern. Sowohl die Schwartz, als auch die EBNER GmbH setzen verstärkt auf Werbemaßnahmen. Durch eine Vielzahl an Veröffentlichungen, der Teilnahme an Konferenzen und durch hohe Präsenz bei Messen machen sie verstärkt auf ihre Produkte aufmerksam. Beide verfügen über eine lange Erfahrung im Bau von Erwärmungsanlagen für das Presshärten, wodurch sie sich von anderen Wettbewerbern abheben. Von der BSN-Thermoprozesstechnik GmbH werden derzeit keine Rollenherdöfen für das einfache, sondern nur mehr für das partielle Presshärten angeboten. Weitere Unternehmen sind die

5.1. ANALYSE DER BRANCHE „ERWÄRMUNGSTECHNOLOGIEN FÜR DEN PRESSHÄRTEPROZESS“

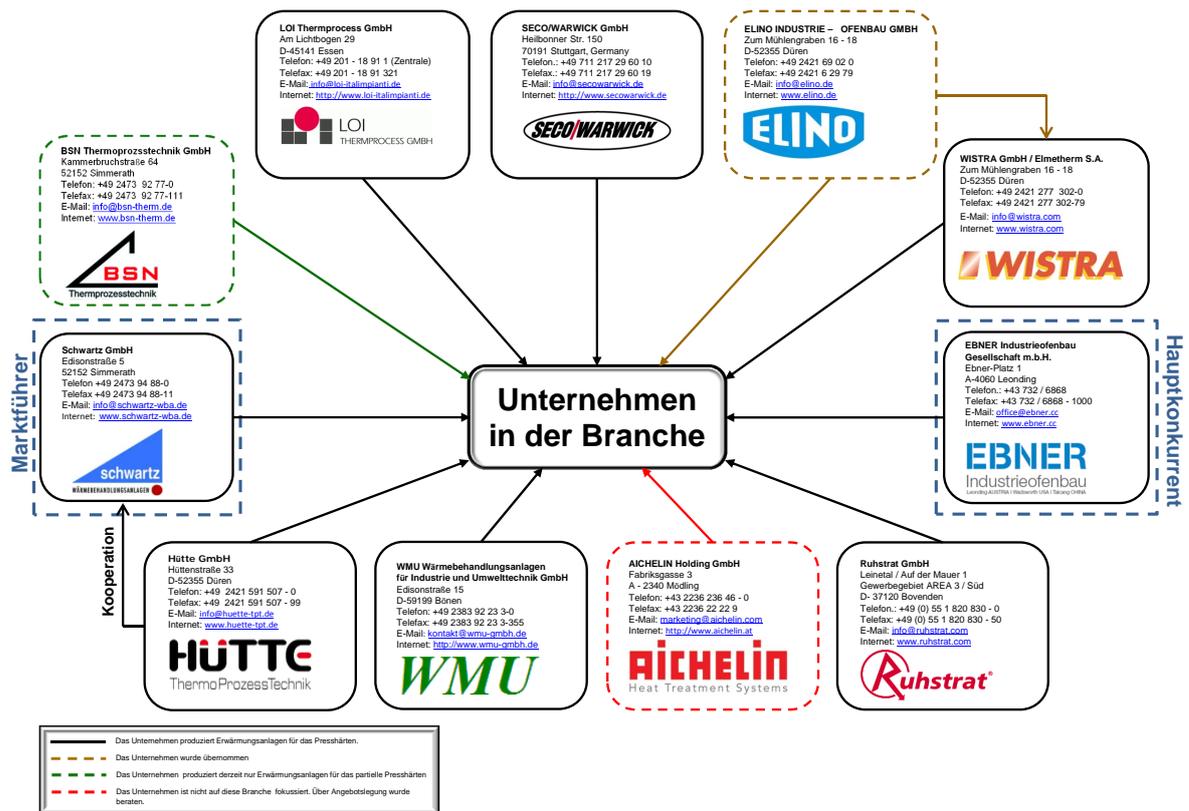


Abbildung 5.1: Unternehmen in der Branche

WMU GmbH, LOI Thermoprozess GmbH, die WISTRA GmbH, die Ruhstrat GmbH, die AICHELIN Holding GmbH und die SECO/WARWICK GmbH. Diese Unternehmen sind nicht so stark auf diese Branche fokussiert und stellen auch Erwärmungsanlagen für andere Anwendungsbereiche bzw. Branchen her. Aufgrund der Nachfrage sind aber auch sie daran interessiert Erwärmungstechnologien für das Presshärten anzubieten bzw. anbieten zu können. Derzeit ist das Branchenwachstum, laut Aussage der Schwartz GmbH, zwar langsamer geworden, es wird aber in den nächsten Jahren wieder schneller werden. Die Rivalität zwischen den Wettbewerbern wird als niedrig eingestuft. Der Grund dafür ist das Vorhandensein eines eindeutigen Marktführers und die Tatsache, dass die Branche gut aufgeteilt ist.

5.1.2 Lieferanten

Die Branche wird von vielen Lieferanten bedient. Die wichtigsten Lieferanten sind die Hersteller von Heiztechnik (Rekuperator-Brenner, Strahlrohre, elektrischer Widerstandsheizung, ...), von Förderrollen aus Keramik oder Quarzglas, von Isolationsmaterialien, der Antriebseinheit und der Steuerung. Die Lieferanten sind in der Abbildung 5.2 aufgelistet.

Die Lieferanten sind für die Ofenhersteller von großer Bedeutung, da diese sehr stark von der Qualität der Produkte abhängig sind. Die Qualität der Einzelkomponenten ist ausschlaggebend für die Performance der gesamten Erwärmungsanlage. Für die Lieferanten hingegen

5.1. ANALYSE DER BRANCHE „ERWÄRMUNGSTECHNOLOGIEN FÜR DEN PRESSHÄRTEPROZESS“

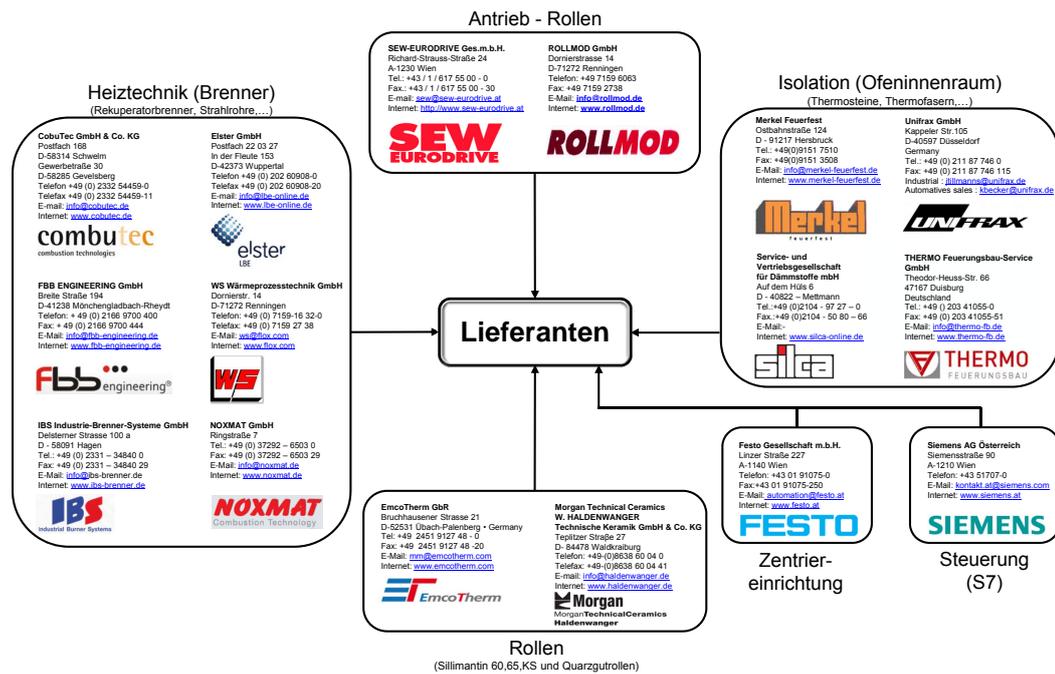


Abbildung 5.2: Lieferanten der Branche

ist die Branche nicht so wichtig, da viele auch in anderen Branchen tätig sind. Nach Informationen eines Ofenherstellers herrscht aber eine große Branchenabhängigkeit bei den Herstellern von keramischen Förderrollen. Die Fähigkeit von Lieferanten selbst Erwärmungsanlagen herzustellen ist, laut der Schwartz GmbH, nicht vorhanden. Diese sieht des Weiteren die Lieferanten als langjährige Partner, wobei die Qualität im Vordergrund steht. Im Jahresabschluss 2011 der Schwartz GmbH wurde die Marktsituation auf der Beschaffungsseite als Verkäufermarkt bezeichnet. Darin wurde auch ein teilweiser Verlust von Einkaufsvorteilen, und daraus resultierend ein hoher Wettbewerbs- und Preisdruck im Verkauf der Erwärmungsanlagen prognostiziert. Die Verhandlungsstärke der Lieferanten wird als hoch eingestuft. [VIKTORIA TREUHAND GMBH, 2012]

5.1.3 Analyse potenzieller Wettbewerber

Der Bedarf an pressgehärteten Bauteilen und dadurch auch die Nachfrage nach Erwärmungsanlagen nehmen zu. Daraus resultiert das Interesse von Unternehmen in diese Branche einzusteigen. Dabei muss zwischen zwei Kategorien von Unternehmen unterschieden werden. Unternehmen die das gleiche Produkt anbieten wollen, wie die Unternehmen innerhalb der Branche und Unternehmen die versuchen durch neuartige Erwärmungskonzepte in die Branche einzudringen. Die Abbildung 5.3 zeigt potenzielle neue Konkurrenten für die Unternehmen innerhalb der Branche.

Die Benteler AG, ein langjähriger Kunde der Branche, wird oder stellt schon selbst Erwärmungsanlagen für den Presshärteprozess her. Ob dies nur zur Deckung des Eigenbedarfs gemacht wird oder ob die Erwärmungsanlagen auch weiterverkauft werden ist derzeit un-

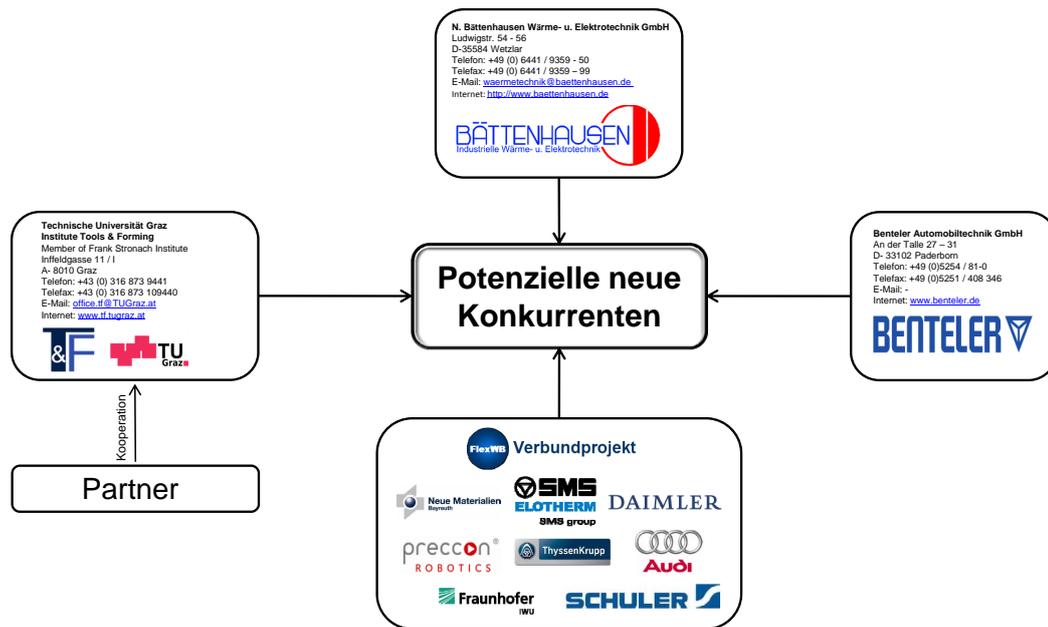


Abbildung 5.3: Potenzielle neue Konkurrenten

klar. Die Bättenhausen GmbH stellt bereits Erwärmungsöfen verschiedenster Bauarten her und will nun auch in diese Branche einsteigen. Die induktive Erwärmungsanlage vom Institut T&F, der Technischen Universität Graz, befindet sich derzeit noch im Entwicklungsstadium. Erst bei einer serienreifen Erwärmungsanlage kann das T&F aktiv in die Branche einsteigen. Gleich ist die Situation beim Verbundprojekt FlexWB. Der entwickelte Kontakterwärmungs- ofen ist noch nicht serienreif. Die Benteler AG hingegen könnte eine Bedrohung für die derzeitigen Unternehmen innerhalb der Branche darstellen. Sie verfügt als Anwender über hervorragende Kenntnisse der prozessbestimmenden Faktoren des Presshärtens. Des Weiteren hat die Benteler AG mehrere Patente im Bereich der Erwärmungstechnologien angemeldet. Bei der Bättenhausen GmbH ist das technische Know-how für die Herstellung von Erwärmungsanlagen vorhanden. Das Unternehmen verfügt aber über keine Erfahrung im Bereich des Presshärtens. Die Bedrohung durch neue Konkurrenten wird als niedrig eingestuft.

5.1.4 Abnehmer

Die Abnehmer von Erwärmungsanlagen für das Presshärten sind Hersteller kompletter Presshärteanlagen, Automobilhersteller und Automobilzulieferer, Abbildung 5.4. Insgesamt können 25 direkte Abnehmer identifiziert werden. Die tatsächliche Anzahl dürfte aber höher sein. Des Weiteren wollen eine Vielzahl weiterer Unternehmen das Presshärten einführen. Seitens der Abnehmer werden viele pressgehärtete Bauteile bei Autozulieferern zugekauft. Der Grund dafür dürften die hohen Anschaffungskosten kompletter Presshärteanlagen und das fehlende technische Know-how bei der Herstellung dieser Bauteile sein.

5.1. ANALYSE DER BRANCHE „ERWÄRMUNGSTECHNOLOGIEN FÜR DEN PRESSHÄRTEPROZESS“

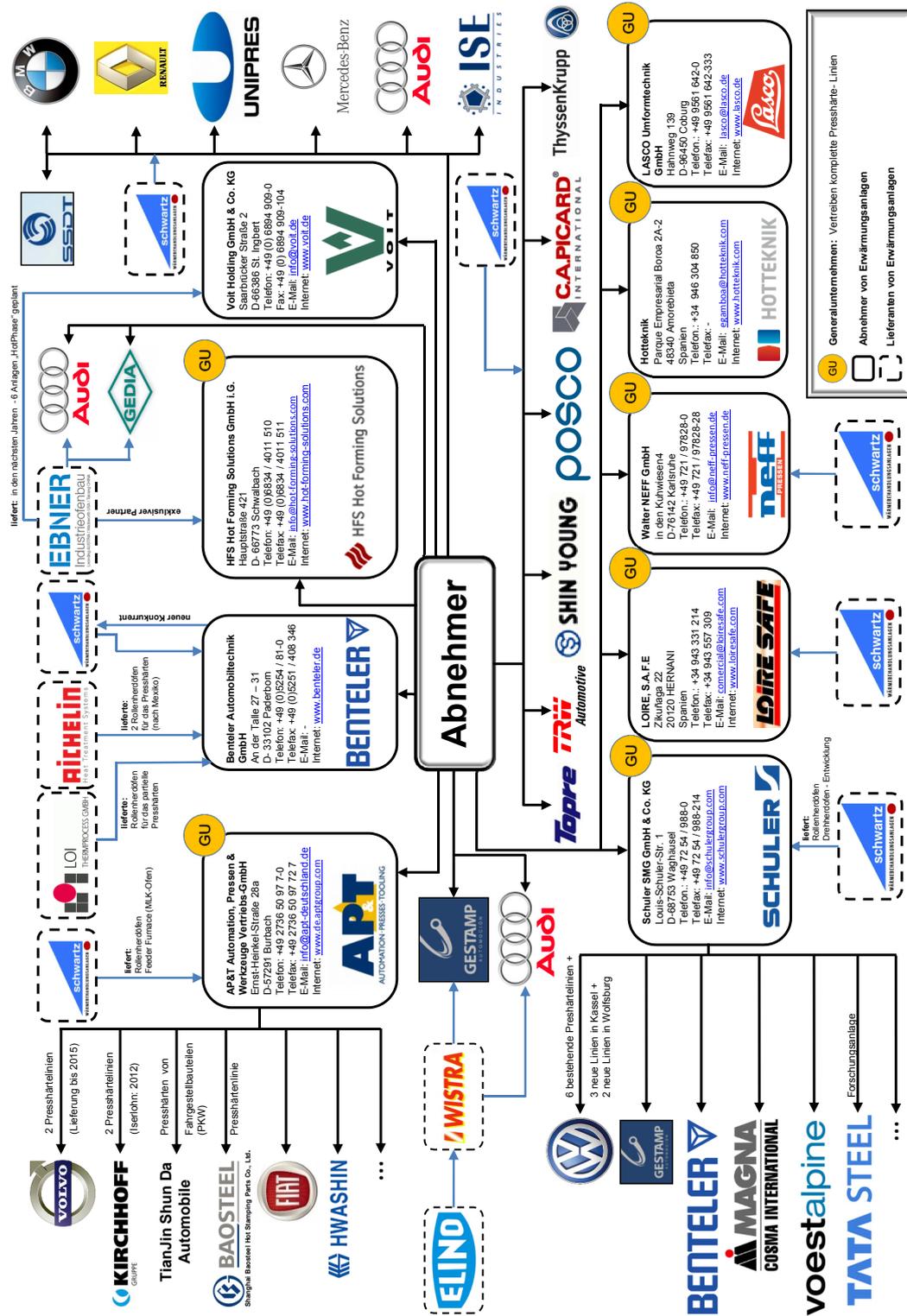


Abbildung 5.4: Abnehmer der Branche

Die meisten Abnehmer kaufen komplette Presshärtelinien von Generalunternehmen (GU). Der Grund dafür ist, dass die Abnehmer alle Komponenten separat kaufen und die Automatisierung der Belade-, Übergabe- und Endladestationen selbst übernehmen müssten. Es werden aber durchaus auch Einzelkomponenten angekauft. Es können sieben GU identifiziert werden, welche komplette Presshärtelinien anbieten. Davon arbeiten vier mit der Schwartz GmbH zusammen, Abbildung 5.4. Die EBNER GmbH ist ein etablierter Partner der HFS Hot Forming Solutions GmbH, einer Kooperation zwischen der BRAUN-CarTec GmbH und der ThyssenKrupp System Engineering GmbH. Mit welchen Partnern die Generalunternehmen Hottechnik und die LASCO Umformtechnik GmbH zusammenarbeiten ist nicht bekannt. Die Abnehmer sind stark von der Qualität und Leistung der Erwärmungsanlagen abhängig. Andererseits üben die Abnehmer durch ihre hohen Anforderungen an die Erwärmungsanlagen und zeitliche Vorgaben, großen Druck auf die Ofenbauer aus. Nach Auskünften der Schuler AG wurden von den Abnehmern schon etliche Erwärmungsanlagen aufgrund Qualitätsmängel ab- oder umgebaut. Des Weiteren wirken sie stark auf die Preise und dadurch auf das Gewinnpotenzial der Hersteller ein. Vor allem die Tatsache, dass eine Erwärmungsanlage über ein GU und danach in Form einer kompletten Presshärtelinie an den Endabnehmer verkauft wird dürfte dabei nicht unwesentlich sein. Die Endabnehmer sind große Automobilhersteller und Automobilzulieferer, die für harte Preisverhandlungen bekannt sind. Auch die Umstellungskosten sind für die Abnehmer gering, da sie nicht an den Lieferanten gebunden sind. Nach Informationen des Jahresabschlusses 2011 der Schwartz GmbH wurde ein stärkerer Druck auf die Ertragslage für das Geschäftsjahr 2012 prognostiziert. Der Grund dafür war die Wandlung des Marktes zum Käufermarkt. Die Verhandlungsstärke der Abnehmer wird als hoch eingestuft. [VIKTORIA TREUHAND GMBH, 2012]

5.1.5 Substitutionsprodukte

Als Substitutionsprodukte werden im Folgenden Ersatzprodukte für die derzeit beim Presshärteprozess eingesetzten Rollenherdöfen verstanden. Es können fünf Substitute für Rollenherdöfen identifiziert werden, Abbildung 5.5.

Die Induktionsanlage des T&F Instituts und der Kontakterwärmungsöfen des Verbundprojektes FlexWB sind derzeit in der Entwicklungsphase und noch nicht serienreif. Sie könnten aber Rollenherdöfen langfristig ersetzen. Diese Erwärmungstechnologien werden in den Kapiteln 2.3.2 und 2.3.3 näher beschrieben. Über das Potenzial von Wirbelschichtöfen (Benteler Automobiltechnik GmbH), die Rollenherdöfen langfristig ersetzen zu können, kann derzeit keine Aussage getroffen werden. Bei den Recherchen wurde nur das Patent gefunden. Ob diese Öfen tatsächlich im Einsatz sind ist derzeit nicht bekannt. Ein wesentlich höheres Potenzial hat der Mehrlagenmehrkammer-Ofen. Laut Lehmann [2011] sind zwei kleinere Öfen schon seit mehreren Jahren in Betrieb und zwei weitere Anlagen sind bereits beauftragt. Neben der Schwartz GmbH arbeitet auch die EBNER GmbH an einem gleichartigen Ofensystem. Dieses Ofenkonzept hat, laut der Schwartz GmbH, gute Chancen zum Substitut zu werden. Voraussetzung dafür ist aber, dass sich der MLK-Ofen der EBNER GmbH beim Abnehmer, der Audi AG, bewährt. Das größte Vermögen die Rollenherdöfen langfristig ersetzen zu können hat der Drehherdöfen. Durch die Zusammenarbeit der Schwartz GmbH und der Schuler AG wurde ein spezieller Drehherdöfen für das Presshärten entwickelt. Dieser Ofen soll, laut der Schuler AG, nach fünfjähriger Entwicklungsarbeit noch dieses Jahr

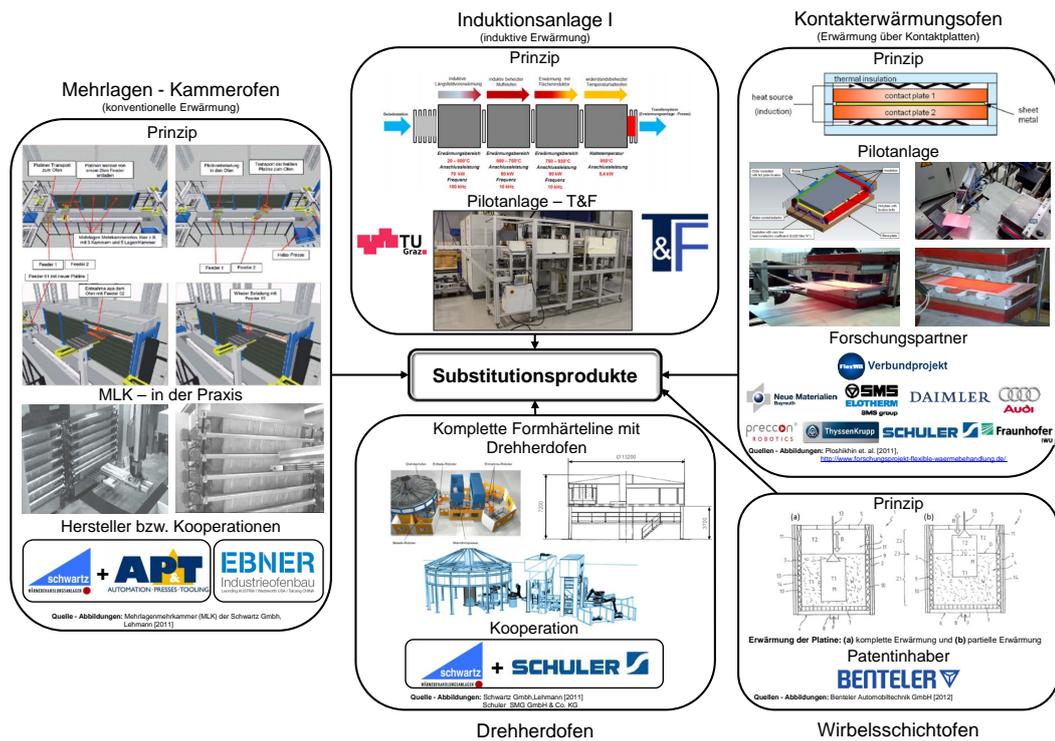


Abbildung 5.5: Substitutionsprodukte

zur Serienreife gebracht werden. Ab Mitte des Jahres 2014 soll er als Komponente einer kompletten Presshärteanlage am Markt erhältlich sein. Die Schwartz GmbH sieht derzeit keine Alternative zum Rollenherdofen, die Schuler AG aber glaubt daran, dass es mit dem richtigen Konzept einen Ersatz geben könnte. Dies wären aber in jedem Fall gasbeheizte Systeme, so die Schuler AG. Die Bedrohung durch Substitutionsprodukte wird durch die Erwärmungskonzepte des MLK-Ofens, des Drehherdofens und der Induktionsanlage langfristig als sehr hoch eingestuft.

5.1.6 Überblick über die Branchenstruktur

Die fünf Wettbewerbskräfte und deren Ausprägung in der Branche „Erwärmungstechnologien für den Presshärteprozess“ sind in der Abbildung 5.6 dargestellt.

Sowohl die Abnehmer, als auch die Lieferanten verfügen über eine hohe Verhandlungsstärke. Dieser Umstand wirkt sich negativ auf die Rentabilität der Branche aus und erhöht die Wettbewerbsintensität zwischen den Unternehmen. Dies führt zur Senkung der Preise der Erwärmungsanlagen. Die Abhängigkeit der Abnehmer bezüglich der Qualität der Öfen wirkt diesem Umstand entgegen. Gerade nicht etablierte Wettbewerber versuchen mit niedrigen Preisen die Abnehmer auf sich aufmerksam zu machen. Diese niedrigen Preise wirken sich natürlich auf die Qualität der Erwärmungsanlagen aus. Die Bedrohung durch Substitutionsprodukte ist in der Branche ebenfalls hoch. Sollte sich der MLK-Ofen (Schwartz GmbH und EBNER GmbH) oder der Drehherdofen (Schwartz GmbH) als Substitut für den Rollen-

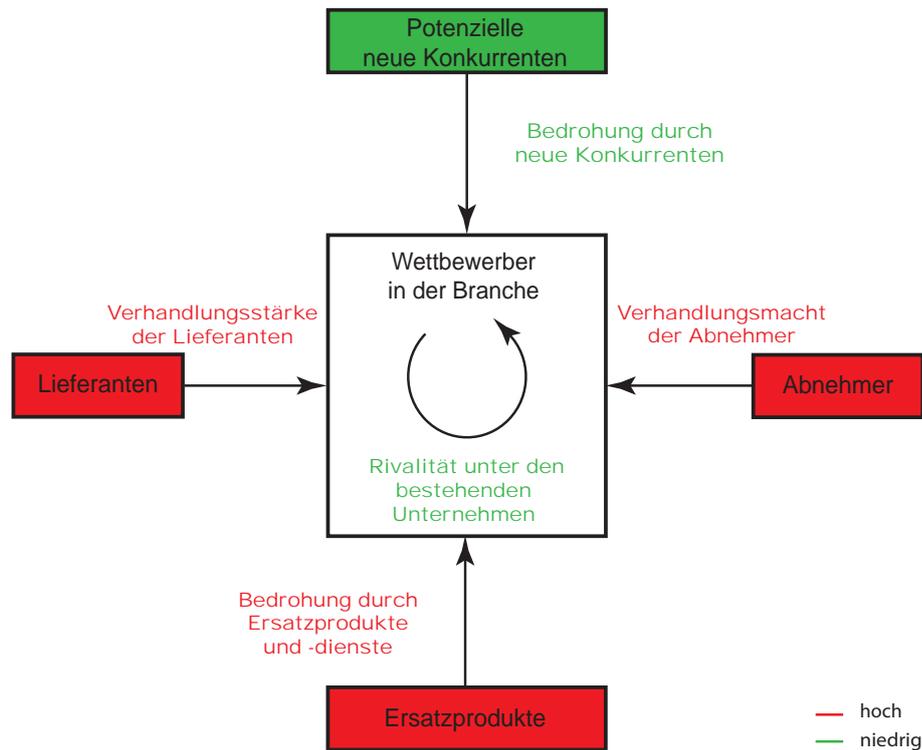


Abbildung 5.6: Ausprägung der fünf Wettbewerbskräfte innerhalb der Branche

herdofen durchsetzen werden die restlichen Wettbewerber der Branche enorm unter Druck geraten, da Sie diese Ofentechnologie nicht anbieten können. Generell ist die Wettbewerbsintensität innerhalb der Branche für nicht und weniger etablierte Unternehmen hoch. Für den derzeitigen Marktführer gilt dies nicht.

Die Chancen für die Induktionsanlage, des Instituts T&F, sich in dieser Branche etablieren zu können, sind mit Sicherheit vorhanden. Der Ersteinsatz beim Abnehmer ist dabei wesentlich. Nur dadurch kann festgestellt werden, ob sich die Anlage im Serieneinsatz langfristig bewährt. Bei der Erwärmungstechnologie für das Presshärten spielt, laut der Schuler AG, die Erfahrung und Reputation eine wesentliche Rolle. Für das T&F sind der Aufbau von Erfahrung und die ständige Verbesserung der Serienanlage ein jahrelanger Prozess und können nur durch einen starken Partner erreicht werden. Des Weiteren ist der Aufbau der Kontakte zu den Abnehmern entscheidend. Generell ist der Zugang zu den vorhandenen Vertriebskanälen für potenzielle neue Konkurrenten, laut der Schwartz GmbH, abhängig von den Kontakten über die das Unternehmen vor dem Eintritt in die Branche verfügt. Die Abhängigkeit des T&F von Lieferanten dieser Branche ist nicht gegeben. Durch die neuartige Erwärmungstechnologie sind das T&F und deren Partner von anderen Lieferanten abhängig.

Kapitel 6

Bauteilspektren am Markt und Prognose - Zukünftiger Bedarf an pressgehärteten Bauteilen

6.1 Bauteilspektren am Markt

Derzeit werden pressgehärtete Bauteile ausschließlich in der Automobilindustrie eingesetzt. Dies sind sicherheitsrelevante Bauteile die im PKW der Insassensicherheit dienen. Anhand des Golf VII (2012) werden in der Abbildung 6.1 Beispiele für den Einsatz von pressgehärteten Bauteilen im Karosseriebau gezeigt.



Abbildung 6.1: Pressgehärtete Bauteile im neuen VW Golf VII, Stahl-Informations-Zentrum / Volkswagen AG [2012]

Das Spektrum an pressgehärteten Bauteilen beschränkt sich schon lange nicht mehr auf die typischen Bauteile wie z.B. auf die Verstärkung der B-Säule, A-Säule, C-Säule und den Seitenaufprallträger. Es werden zunehmend andere Bauteile, wie z.B. Längsträger, Querträger, Torsionsstreben und die Verstärkung des Dachrahmens, pressgehärtet. Das komplette Spektrum an pressgehärteten Bauteilen ist in der Abbildungen 6.2 und 6.3 dargestellt.



Abbildung 6.2: Bauteilspektrum im PKW - 1



Abbildung 6.3: Bauteilspektrum im PKW - 2

Der Einsatz von pressgehärteten Bauteilen bei verschiedenen Fahrzeugmodellen unterschiedlicher Hersteller ist im Anhang A dargestellt.

6.2 Prognose - Zukünftiger Bedarf an pressgehärteten Bauteilen

Die Automobilhersteller haben in den letzten Jahren verstärkt auf die Integration von pressgehärteten Bauteilen in die Karosserie gesetzt. Mit einem Anteil von 21,7 Prozent pressgehärteter Bauteile an der Rohkarosserie ist dieser Trend beim neuen Audi A3 deutlich zu erkennen, Anhang A. Auch beim Golf VII ist ein hoher Anstieg an pressgehärteten Bauteilen festzustellen. Während im Golf VI nur 6 Prozent pressgehärtete Bauteile verbaut wurden, sind es laut Stahl-Informations-Zentrum [2012] beim Golf VII schon 25 Prozent. Vor allem der Volkswagen Konzern ist mit den Premiummodellen von Audi und mit den VW und Skoda Modellen der Vorreiter. Die Entwicklungen des schwedischen Automobilhersteller Volvo AB gehen auch in die Richtung eines höheren Anteils an pressgehärteten Bauteilen im Fahrzeug, wie die Abbildung 6.4 deutlich zeigt.

Fast alle bedeutenden Automobilhersteller folgen diesem Trend. Ausnahmen sind jedoch z.B. Land Rover die derzeit fast keine pressgehärteten Bauteile verwenden und der General Motors Konzern, der zwar zunehmend pressgehärtete Bauteile in die Fahrzeugmodelle integriert, aber langfristig auf die Kaltumformung von Strukturbauteilen setzt.

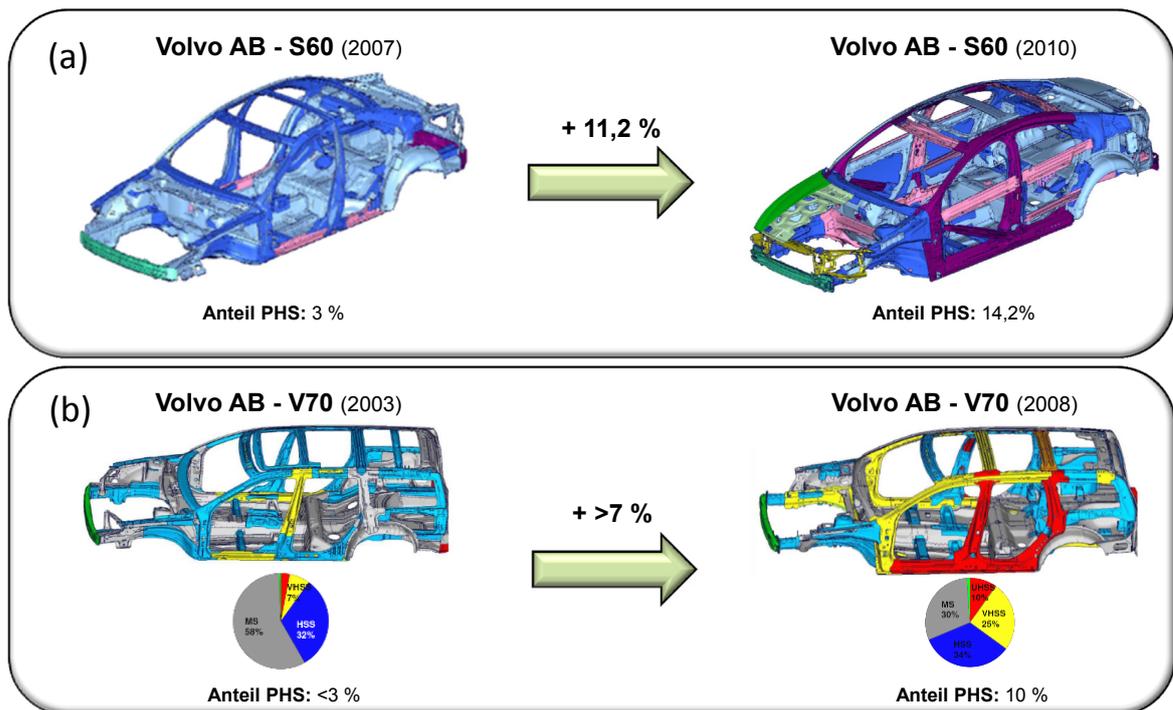


Abbildung 6.4: Zunahme des Anteils an pressgehärteten Bauteilen bei der Volvo AB:
 (a) Modell S60, Automotive Circle International [2010] und (b) Modell V70, Automotive Circle International [2007]

Bei der Prognose über den zukünftigen Bedarf an pressgehärteten Bauteilen sind sich die Experten uneinig. Die Meinungen gehen weit auseinander und sind in der Abbildung 6.5 dargestellt.

Laut Hund [2011] wurde der zukünftige Bedarf an pressgehärteten Bauteilen, von Prof. Steinhoff der Universität Kassel, im Jahr 2010 auf 450 Millionen Bauteile für das Jahr 2013 geschätzt. Diese Voraussage wurde im Jahr 2011 nach Informationen in M. Schupfer [2011], auf 500 Millionen Bauteile für das Jahr 2013 und sogar auf ca. 635 Millionen Bauteile im Jahr 2015, nach oben korrigiert. Die Schuler AG schätzte den Bedarf, laut Schuler AG [2011], auf 350 Millionen Bauteile für das Jahr 2015. Dieser Bedarf wurde im Jahr 2012 ebenfalls nachkorrigiert. Derzeit prognostiziert die Schuler AG, laut Schuler AG [2012], den Bedarf auf 450 Millionen Bauteile im Jahr 2015. Die Schwartz GmbH sieht diesen Bedarf erst im Jahr 2018. Ein großer Automobilhersteller hingegen prognostiziert den Bedarf auf 350 Millionen Bauteile im Jahr 2015 und 400 Millionen Bauteile 2016.

Der hohe Bedarf ist auf den zukünftigen Anstieg des Einsatzes von pressgehärteten Bauteilen seitens der Automobilhersteller zurückzuführen. Des Weiteren wird ein Zuwachs bei den Produktionszahlen der Automobilherstellung in den nächsten Jahren erwartet, Abbildung 6.6.

Aus den Daten in der Abbildung 6.6 kann ein durchschnittlicher Trend der Automobilproduktion bis zum Jahr 2022 ermittelt werden. Dieser ist in der Abbildung 6.7 dargestellt.

6.2. PROGNOSE - ZUKÜNFTIGER BEDARF AN PRESSGEHÄRTETEN BAUTEILEN

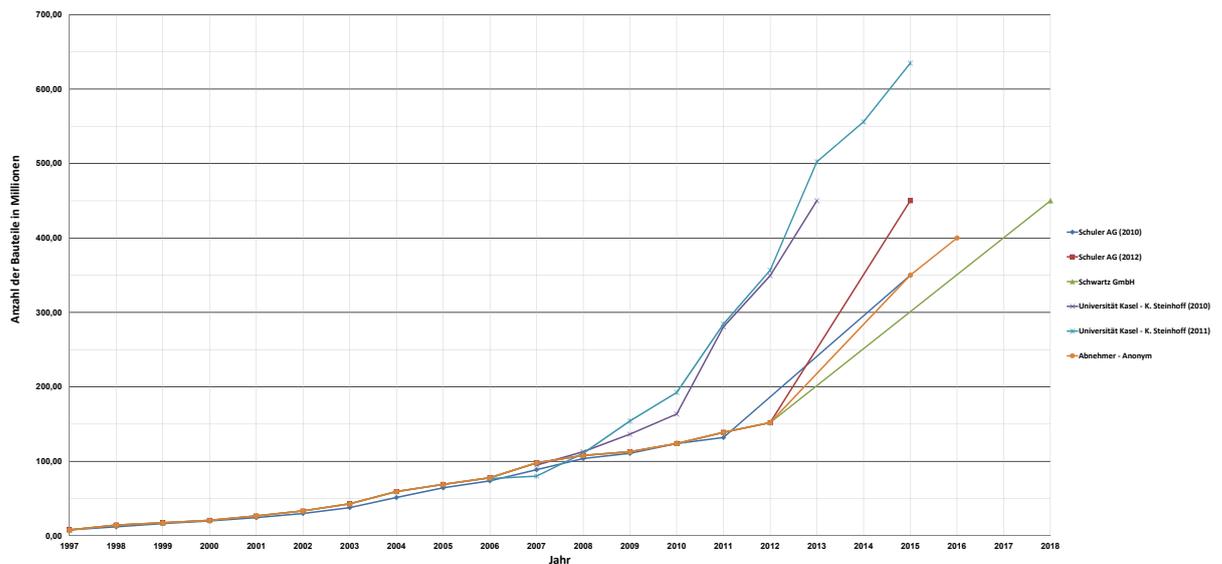


Abbildung 6.5: Prognose des Bedarfs an Warmumformteilen, nach Informationen aus Hund [2011], M. Schupfer [2011], Schuler AG [2011], Schuler AG [2012] und durch Interviews

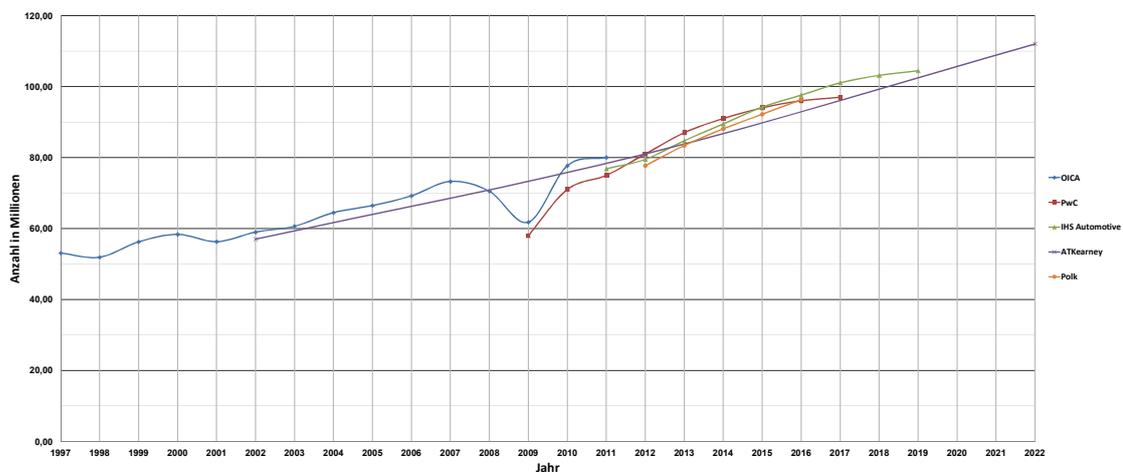


Abbildung 6.6: Produktionszahlen von Fahrzeugen bis 2011 und Trend bis 2022, nach Informationen aus OICA [2012], PwC - PricewaterhouseCoopers International Limited [2011], A.T. Kearney [2012] und L. Polk & Co. [2012]

Durch die Daten aus den Abbildungen 6.5 und 6.7 kann der Durchschnitt an pressgehärteten Bauteilen pro PKW berechnet werden. Dieser wird in der Abbildung 6.8 dargestellt. Als Basis werden die Daten des vergangenen und zukünftigen Bedarfs an pressgehärteten Bauteilen aus Schuler AG [2012] herangezogen. Der Grund dafür ist, dass die Schuler AG als großer Hersteller von Presshärteanlagen den zukünftigen Bedarf gut abschätzen kann.

6.2. PROGNOSE - ZUKÜNFTIGER BEDARF AN PRESSGEHÄRTETEN BAUTEILEN

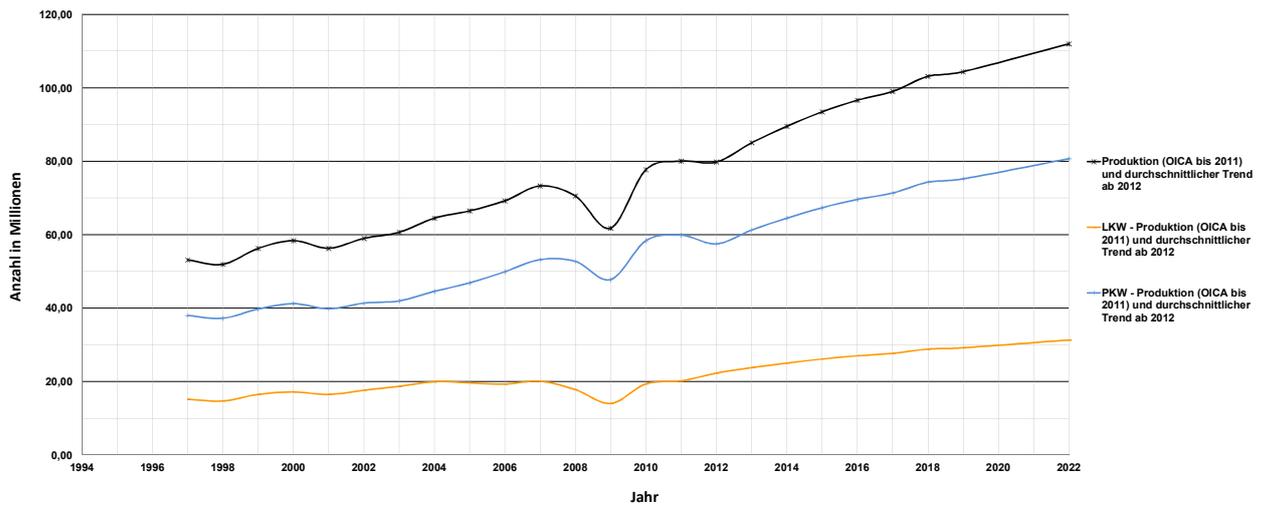


Abbildung 6.7: Prognose der zukünftigen Fahrzeugproduktion bis 2022

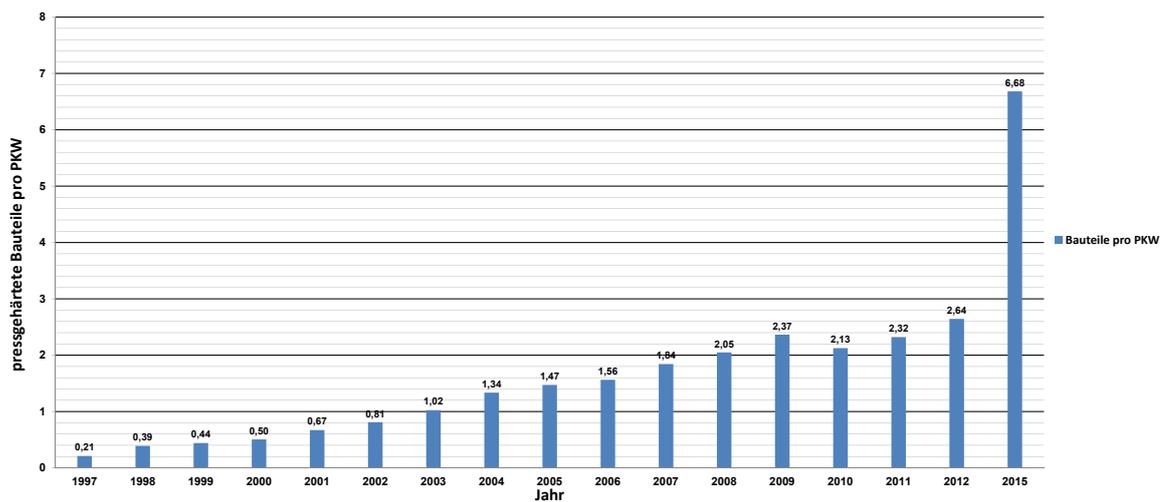


Abbildung 6.8: Prognose - Anzahl pressgehärteter Bauteile pro PKW bezogen auf die weltweite Produktion

Derzeit sind circa 2,6 pressgehärtete Bauteile pro PKW verbaut. Im Jahr 2015 könnten es nach den Prognosen schon ca. 6,7 Bauteile, gemessen an der gesamten PKW - Produktion sein. Laut einem großen Automobilhersteller werden in dessen Fahrzeugen derzeit durchschnittlich acht bis zehn pressgehärtete Bauteile verbaut. Bis zum Jahr 2015 prognostiziert dieser einen Anstieg auf zehn bis 20 Bauteile pro Fahrzeug. Bei der Konkurrenz könnten es sogar 40 bis 45 Bauteile auf lange Sicht sein.

Daraus resultiert ein hoher Bedarf an Presshärteanlagen und dadurch auch an Erwärmungsanlagen. Im Jahr 2010 waren, nach Informationen aus Stahl-Informations-Zentrum [2011], 150 Presshärteanlagen im Betrieb.

6.2. PROGNOSE - ZUKÜNFTIGER BEDARF AN PRESSGEHÄRTETEN BAUTEILEN

Die Schwartz GmbH schätzt die Anzahl der Produktionsanlagen auf circa 185 Ende des Jahres 2013.

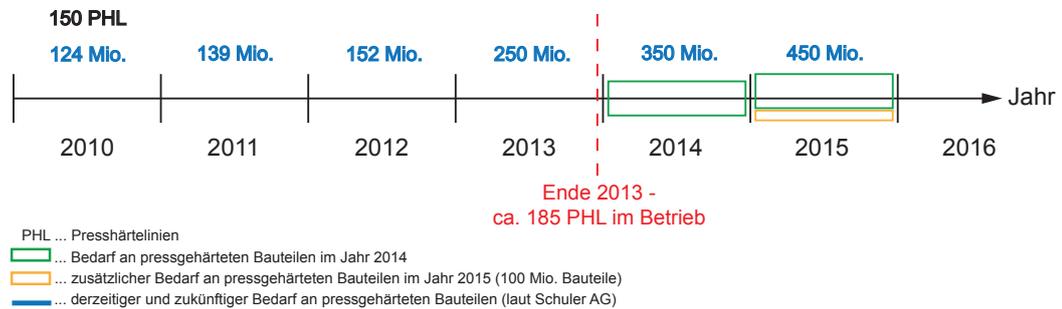


Abbildung 6.9: Bedarf an Presshärteanlagen und pressgehärteten Bauteilen bis 2015

Unter der Annahme voller Bedarfsdeckung müssten 185 Presshärteanlagen 350 Millionen pressgehärtete Bauteile im Jahr 2014 produzieren, Abbildung 6.9. Dies entspricht einem durchschnittlichen Produktionsausstoß von 1,892 Millionen Bauteilen pro Presshärteanlage. Im Jahr 2015 steigt der Bedarf, laut Prognose, um weitere 100 Millionen auf insgesamt 450 Millionen Bauteile. Daraus ergibt sich, unter der Annahme des gleichen durchschnittlichen Produktionsausstoßes ein Mehr-Bedarf von circa 53 Presshärteanlagen bis zum Jahr 2015.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Analyse der Erwärmungstechnologien für das Presshärten ergab, dass mittels induktiver Erwärmung deutlich höhere Wirkungsgrade in allen Betriebszuständen und Betreibermodellen erreicht werden können, im Vergleich zu konventionellen Rollenherdöfen. Die Gründe dafür sind die effizientere Erwärmung im Serien- und Teillast-Betrieb, sowie die geringeren Verluste im Halte- und Standby-Betrieb.

Die Betrachtung der Kosten ergab, dass die Anschaffungskosten für eine Induktionsanlage um mehr als 50 Prozent geringer sind als bei den betrachteten Rollenherdöfen. Die wesentlichen Nachteile sind aber die laufenden Betriebskosten, die bei der induktiven Erwärmung höher sind. Dies ist auf die derzeitigen Strom- und Erdgaspreise zurückzuführen. Trotz höherer Betriebskosten sind bei einem Betrachtungszeitraum von zehn Jahren die Gesamtkosten für die Induktionsanlage niedriger. Dies ergab die zusätzliche Betrachtung der Kosten für den Platzbedarf und der Kosten für Ersatzrollen bei konventionellen Erwärmungsanlagen. Des Weiteren ist die Platzersparnis beim Einsatz der induktiven Erwärmungstechnologie enorm. Der Platzbedarf liegt bei circa einem Drittel im Vergleich zu Rollenherdöfen.

Bei der Analyse der Branche „Erwärmungstechnologien für den Presshärteprozess“ konnte festgestellt werden, dass die Branche deutlich von einem Marktführer dominiert wird. Dies ist die Schwartz GmbH, deren Marktanteile bei über 70 Prozent liegen. Vor allem die Lieferanten und Abnehmer wirken stark auf die Branche ein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Lieferanten nicht von der Branche abhängig sind. Des Weiteren sind die Abnehmer kompletter Presshärtelinien große Automobilhersteller bzw. Zulieferer der Automobilindustrie, welche für harte Preisverhandlungen bekannt sind. Langfristig könnten derzeit eingesetzt Rollenherdöfen durchaus substituiert werden. Das größte Potenzial haben der MLK-Ofen, der Drehherdofen und die Induktionsanlage. Derzeit ist eine Bedrohung durch neue Konkurrenten für die Unternehmen innerhalb der Branche nicht gegeben. Insgesamt ist die derzeitige Wettbewerbssituation in der Branche hoch.

Um die induktive Erwärmungstechnologie in der Branche etablieren zu können, ist der Zugang zu den vorhandenen Vertriebskanälen von wesentlicher Bedeutung. Des Weiteren sind der Erstbetrieb beim Kunden und die langfristige Funktionsweise der Anlage die entscheidenden Kriterien für eine erfolgreiche Positionierung.

Der derzeitige Einsatz an pressgehärteten Bauteilen ist vielfältig. Im Rahmen der Recherche konnten insgesamt 19 unterschiedliche pressgehärtete Bauteile, in verschiedenen Aus-

führungsvarianten, identifiziert werden. Die tatsächliche Anzahl dürfte aber höher sein. Dies sind vor allem sicherheitsrelevante Bauteile der Automobilkarosserie, aber auch andere Bauteile wie z.B. die Torsionsstrebe einer Hinterachse.

Der Bedarf an Warmumformteilen ist in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen. Über den zukünftigen Bedarf sind sich die Experten uneinig. Am realistischsten ist die Prognose der Schuler AG. Diese schätzt den Bedarf im Jahr 2015 auf 450 Millionen Bauteile. Bezogen auf die weltweite PKW- Produktion werden derzeit 2,6 pressgehärtete Bauteile pro PKW verbaut. Im Jahr 2015 könnten es nach den Prognosen schon 6,7 Bauteile sein. Bei voller Bedarfsdeckung ergibt sich dadurch ein Mehr-Bedarf von circa 53 Presshärtelinien und dadurch auch an Erwärmungsanlagen bis zum Jahr 2015.

Der zukünftige Bedarf an Presshärtelinien zeigt, dass der Markt noch nicht gesättigt ist. Daraus resultiert ein vorhandenes Absatzpotenzial für die induktive Erwärmungsanlage des T&F.

Anhang A

Einsatz von pressgehärteten Bauteilen bei verschiedenen Fahrzeugmodellen

In den folgenden Abbildungen A.2, A.3 und A.4 werden die verwendeten Materialien und der Anteil an pressgehärteten Bauteilen bei verschiedenen Fahrzeugmodellen dargestellt. Darin sind die verwendeten Materialien nach dem Farbschlüssel der Abbildung A.1 dargestellt.

| Materials: corresponding metallurgical classes | | RGB colour code |
|--|---|---------------------|
| | Low Strength Steels: Mild steels | R 153, G 204, B 255 |
| Steels | High Strength Steels (HSS): High Strength Interstitial-free Steels (HSIF), Bake Hardening Steels (BH), High Strength Low Alloy Steels (HSLA) | R 051, G 102, B 255 |
| | Advanced High Strength Steels (AHSS): Dual Phase Steels (DP), Transformation Induced Plasticity Steels (TRIP) | R 255, G 153, B 204 |
| | Stainless steels: Austenitic stainless steels | R 051, G 051, B 153 |
| | Ultra High Strength Steels (UHSS): Complex Phase Steels (CP), Martensitic Steels (MS) | R 204, G 153, B 255 |
| | Press Hardened Steels (PHS) | R 128, G 000, B 128 |
| | | |
| Aluminium | Aluminium sheets: 7xxx series | R 051, G 204, B 153 |
| | Aluminium sheets: 6xxx series | R 000, G 255, B 000 |
| | Aluminium sheets: 5xxx series | R 204, G 255, B 204 |
| | Aluminium extrusion profiles | R 153, G 204, B 000 |
| | Cast aluminium | R 051, G 153, B 102 |
| | Magnesium | R 255, G 255, B 000 |
| Plastics | Fibre reinforced plastics | R 255, G 000, B 000 |
| | Duroplastics, including Sheet Molding Compound (SMC) | R 255, G 153, B 000 |
| | Thermoplastics | R 153, G 051, B 000 |
| | Other materials, namely: | R 192, G 192, B 192 |

Abbildung A.1: Farbschlüssel für die Materialien, Automotive Circle International [2012]

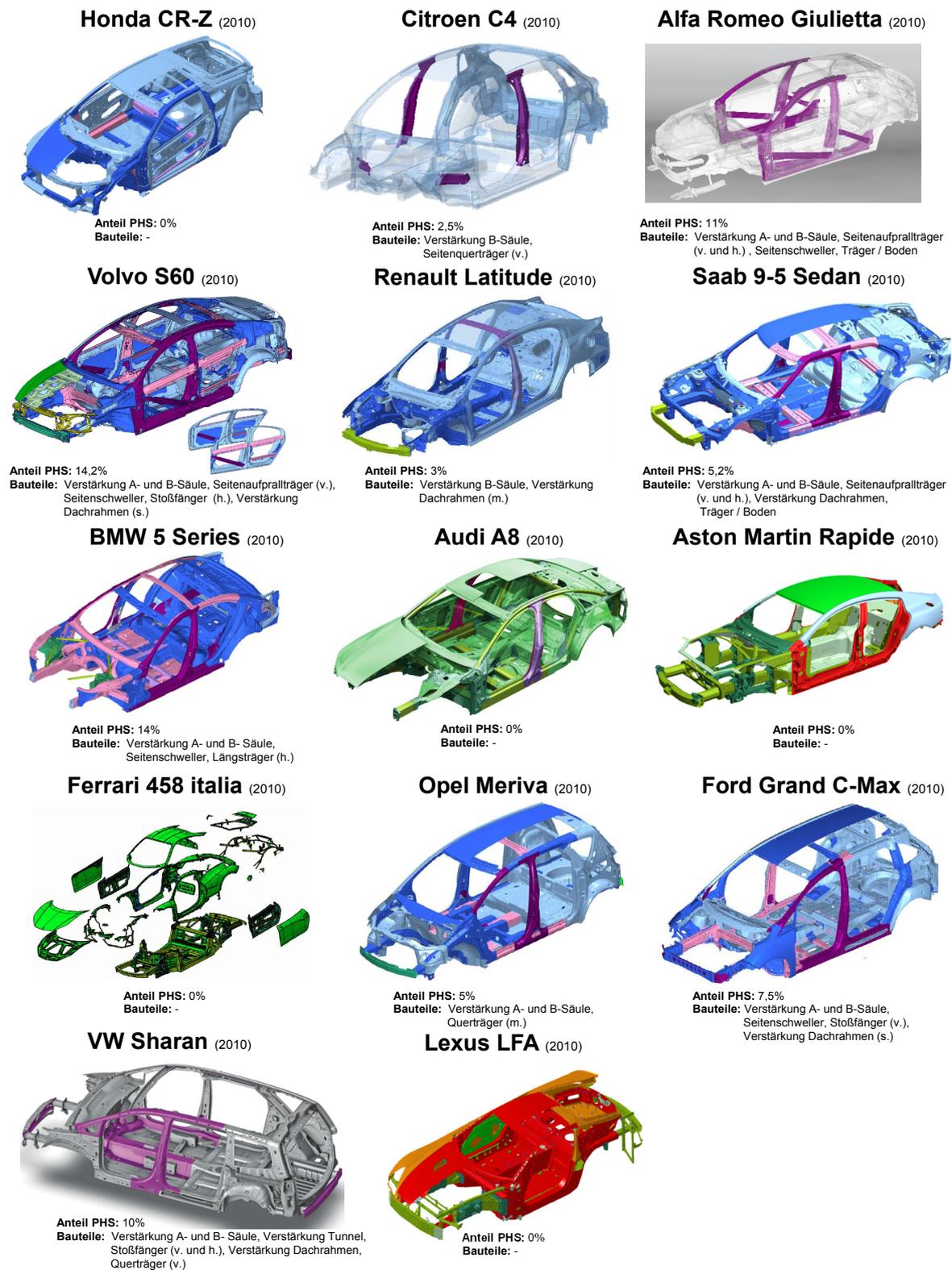
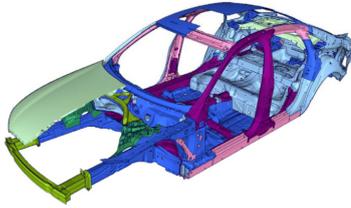


Abbildung A.2: Verwendete Materialien in verschiedenen Fahrzeugmodellen - 1, Automotive Circle International [2010]

Audi A6 Limousine (2011)



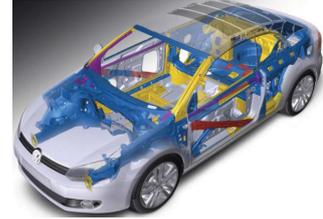
Anteil PHS: 11,3%
Bauteile: Verstärkung A- und B-Säule, Seitenschweller, Längsträger (m. und h.), Verstärkung Tunnel, Querträger (v. und m.)

Mercedes-Benz B-Class (2011)



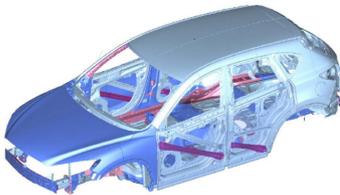
Anteil PHS: 3,5%
Bauteile: Verstärkung A-, B- und C-Säule, Querträger (v.)

VW Golf Cabriolet (2011)



Anteil PHS: 1,4%
Bauteile: Verstärkung A-Säule, Türverstärkung

Mazda CX-5 (2011)



Anteil PHS: 3%
Bauteile: Seitenaufprallträger (v. und h.), Verstärkung Stoßfänger (v. und h.)

Range Rover Evoque (2011)



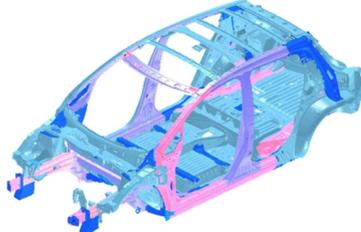
Anteil PHS: 0%
Bauteile: -

Opel Zafira Tourer (2011)



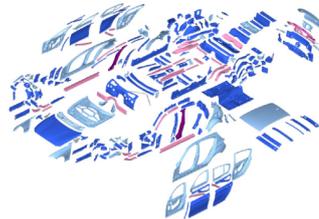
Anteil PHS: 3,6%
Bauteile: Verstärkung B-Säule, Seitenaufprallträger (v. und h.)

Nissan LEAF (2011)



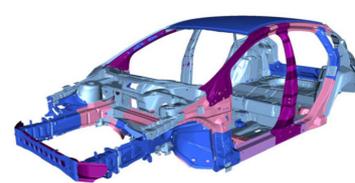
Anteil PHS: 0%
Bauteile: -

BMW 1 Series (2011)



Anteil PHS: 2%
Bauteile: Verstärkung B-Säule, Verstärkung Dachrahmen (h.)

Ford Focus (2011)



Anteil PHS: 7%
Bauteile: Verstärkung A- und B-Säule, Stoßfänger (v.)

Hyundai i40 (2011)



Anteil PHS: 3,1%
Bauteile: Verstärkung B-Säule, Seitenaufprallträger (v. und h.) Seitenschweller, Verstärkung Dachrahmen (s.)

Abbildung A.3: Verwendete Materialien in verschiedenen Fahrzeugmodellen - 2, Automotive Circle International [2011]

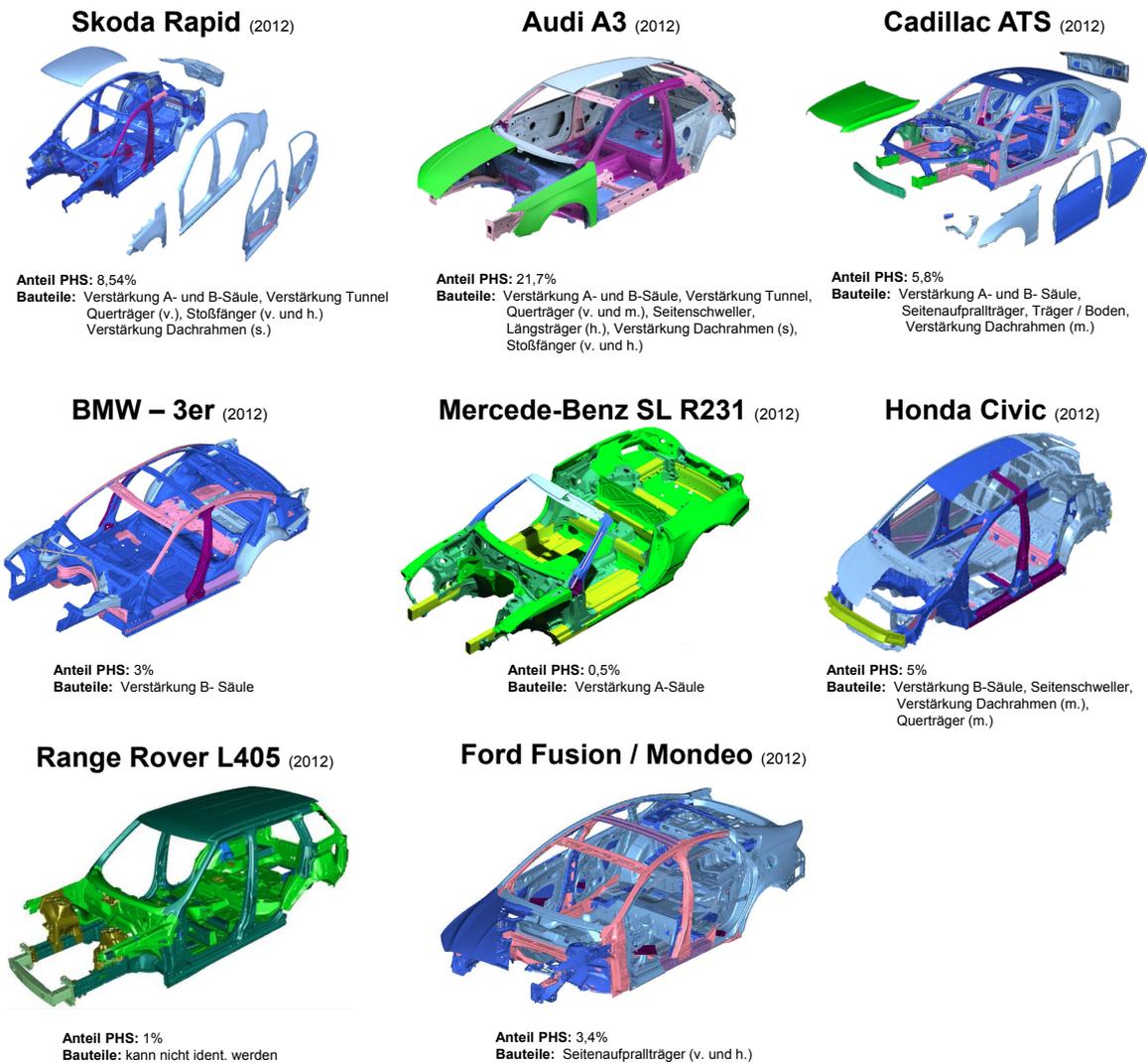


Abbildung A.4: Verwendete Materialien in verschiedenen Fahrzeugmodellen - 3, Automotive Circle International [2012]

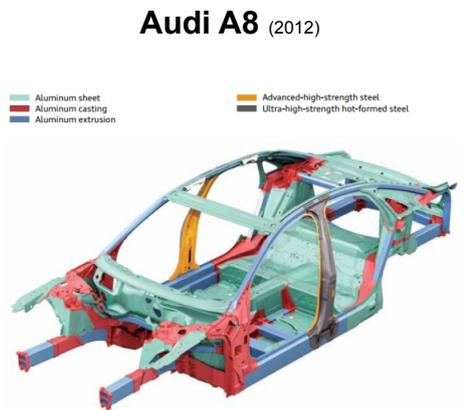
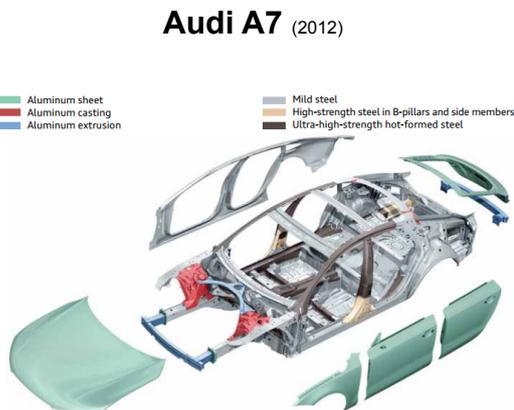
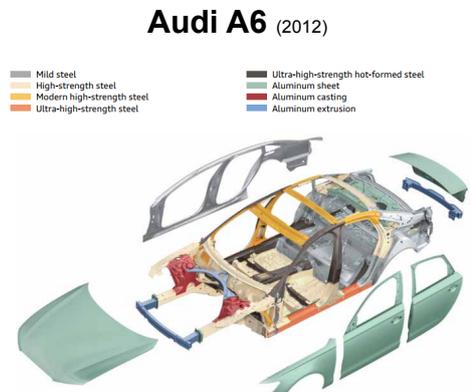
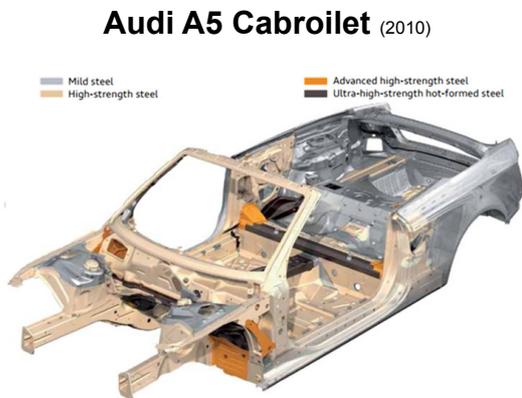
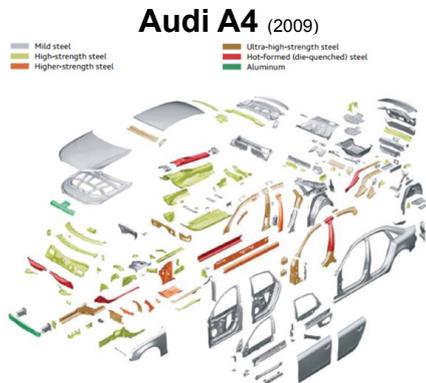


Abbildung A.5: Einsatz von Pressgehärtete Bauteilen in Fahrzeugmodellen der Audi AG, Audi AG [2011]

Anhang B

Anfrage an die Ofenhersteller



Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion
Member of Frank Stronach Institute



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck
Institutsvorstand

Tel: +43(0)316/873-9440
Fax: +43(0)316/873-9442

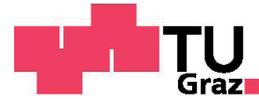
Inffeldgasse 11/I
A-8010 Graz

DVR: 008 1833 UID: ATU 574 77 929

Anfrage

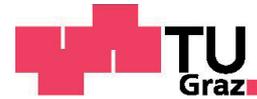
Rollenherd- Platinenofen

direktes Presshärten



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Ausgangssituation | 3 |
| 2 | Anforderungen an die Ofenanlage | 3 |
| 2.1 | Allgemeine Daten | 3 |
| 2.2 | Materialdaten | 3 |
| 2.3 | Abmessungen..... | 4 |
| 2.4 | Temperaturen..... | 4 |
| 2.5 | Ofenpositionierung..... | 4 |
| 3 | Geforderte Angaben | 5 |
| 3.1 | Erwärmungsanlage / Abmessungen..... | 5 |
| 3.2 | Ofen- Regelkonzept | 5 |
| 3.3 | Platinentransport | 6 |
| 3.4 | Messsystem | 6 |
| 3.5 | Isolierung | 6 |
| 3.6 | Verluste | 6 |
| 3.7 | Kosten / Aufwand..... | 6 |
| 3.8 | Sonstige | 7 |
| 4 | Kontaktdaten | 7 |



1 Ausgangssituation

Im Auftrag eines TIER1-Zulieferers der Automobilindustrie soll die Entscheidungsgrundlage für die Auswahl einer geeigneten Erwärmanlage erarbeitet werden. Da es sich bei der geplanten Anlage um eine Pilotanlage handelt, sollen bei der Ofenauswahl, nicht nur Standardvarianten sondern auch alternative Erwärmungskonzepte, bei nachgewiesener Prozessfähigkeit, in Betracht gezogen werden.

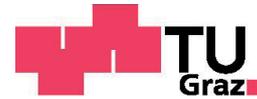
2 Anforderungen an die Ofenanlage

2.1 Allgemeine Daten

- Mehrfachfertigung: 1 Doppelteil / Hub
- Zyklus Platinen-Beschickung: ≤ 16 Sekunden
- Massendurchsatz: 7200 kg / h
- Ofen-Auslastung: 16 Std. / Tag (zweischichtig)
- entsprechen 80 Std. / Woche
- Nichtnutzung der Anlage von Freitags 22:00 Uhr bis Montags 6:00 Uhr (Schichtbeginn)

2.2 Materialdaten

- Werkstoffbezeichnung: 22MnB5 / 1.5528
- Werkstoffeigenschaften:
 - Dichte ρ : 7848,2 kg/m³
 - Wärmekapazität c_p : ca. 650 J/kgK
 - Wärmeleitfähigkeit λ : ca. 30 W/mK
- Zum Einsatz kommende Werkstoff-Beschichtungen:
Feueraluminierung AS, VOEST-Zn-Schicht, x-tec® (NANO-X GmbH)



2.3 Abmessungen

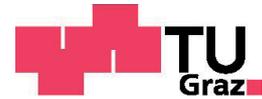
- Platinen – Abmessungen bzw. Daten
 - Länge: 1700 mm
 - Breite: 800 mm
 - Stärke: 1,5 mm

2.4 Temperaturen

- Materialtemperaturen:
 - Einlegetemperatur: 20 °C
 - Entnahmetemperatur: 930 ± 15 °C
- weitere Temperaturen:
 - Temperaturabweichungen in der Platine ± 10 K
- Qualität:
 - max. Temperaturüberschreitung: 950 + 20 °C

2.5 Ofenpositionierung

- Positioniergenauigkeit an der Entnahmeposition zur Warmformpresse ± 2 mm
- Zeit vom Ofenauslauf bis zur Entnahmeposition $t < 2$ s



3 Geforderte Angaben

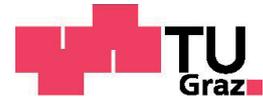
Bitte gehen Sie, bei der Erstellung Ihres Angebotes, auf folgende Punkte detailliert ein.

3.1 Erwärmungsanlage / Abmessungen

- Außen:
 - Länge: mm
 - Breite: mm
 - Höhe: mm
- Innen:
 - Länge: mm
 - Breite: mm
 - Höhe: mm
- Einlauf:
 - Länge: mm
 - Breite: mm
- Auslauf:
 - Länge: mm
 - Breite: mm

3.2 Ofen- Regelkonzept

- Temperaturbereich: von bis °C
- Anzahl der Temperaturregelzonen: Stk.
- Verwendete Heiztechnik:
- Partielle Erwärmung des Bauteils möglich :
- Verlauf und Beeinflussbarkeit der Erwärmungskurve:



3.3 Platinentransport

- Welche Fördereinrichtungen:
- Teilelagekontrolle: ja / nein
- Wird die Bauteilausdehnung berücksichtigt (Transfersystem):

3.4 Messsystem

- Erfasste Prozessparameter:
- Auswertung und Visualisierung der Prozessparameter:

3.5 Isolierung

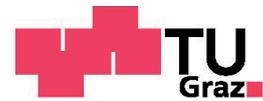
- Innen:
- Außen:

3.6 Verluste

- Volllast – Betrieb:
- Teillast – Betrieb:
- Stand by – Betrieb:

3.7 Kosten / Aufwand

- Angebotskosten / Lieferzeit
- Wartungskosten: € / Jahr
- Betriebskosten: € / Jahr
- Instandhaltungskosten: € / Jahr
- Aufwand für Wartungsarbeiten:



3.8 Sonstige

- Sicherheitsmaßnahmen für Inbetriebnahme:
- Sichtfenster (visuelle Prüfung):

4 Kontaktdaten

Fabian Meklin

Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion

Inffeldgasse 11/1

A-8010 Graz

E-Mail: fabian.meklin@tugraz.at

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Offenlegungs- und Patentschrift für das Presshärten | 3 |
| 2.2 | Fertigung im Folgeverbundwerkzeug | 4 |
| 2.3 | Eigenschaften der Werkstoffe MBW und MBK | 5 |
| 2.4 | Temperaturverlauf beim direkten Presshärten | 6 |
| 2.5 | Direktes Presshärten | 6 |
| 2.6 | ZTU Diagramm - 22MnB5 | 7 |
| 2.7 | Indirektes Presshärten | 8 |
| 2.8 | Vergleich: direktes und indirektes Presshärten | 8 |
| 2.9 | Kathodische Schutzwirkung von Zink | 12 |
| 2.10 | AlSi- beschichteter 22MnB5 im Anlieferungszustand | 12 |
| 2.11 | Phasenumwandlung des AlSi beschichteten 22MnB5 | 13 |
| 2.12 | Kombinierte Induktionsanlage | 14 |
| 2.13 | Phasenverteilung in der AlSi- Beschichtung | 14 |
| 2.14 | GammaProtect® - Schutzschicht | 16 |
| 2.15 | Anwendungsbereiche von TWB | 17 |
| 2.16 | Pressgehärtete B-Säule als TWB | 17 |
| 2.17 | Schematischer Aufbau eines Mantelstrahlrohr - Brenners | 19 |
| 2.18 | Keramisches Flammrohr SICAFLEX® und Strahlrohr REKUMAT® C | 20 |
| 2.19 | Elektrische Widerstandsheizung eines Rollenherdofens | 21 |
| 2.20 | Rollenherdofen mit Hybrid-Beheizung | 21 |
| 2.21 | Rollenherdofen für das direkte Presshärten | 22 |
| 2.22 | Modularer Aufbau eines Rollenherdofens | 23 |
| 2.23 | Entnahme von Auslaufmodul mittels eines Feeders | 23 |
| 2.24 | Thermochemischer Angriff auf Rollen | 24 |
| 2.25 | Thermochemischer Angriff auf un- und beschichtete keramische Rollen | 25 |
| 2.26 | Anwachsungen bei nichtoxidischen aluphoben Keramikrollen | 25 |
| 2.27 | Antrieb - Rollenherdofen | 26 |
| 2.28 | "Doppel-Decker Rollenherdofen" | 26 |
| 2.29 | „HotPHASE“ - Zwei Etagen Rollenherdofen | 27 |
| 2.30 | Hubbalkenofen | 28 |
| 2.31 | Stromdichteabnahme im Metallzylinder (Skin-Effekt) | 29 |
| 2.32 | Längsfeld-, Querfeld- und Flächen-Induktor | 30 |
| 2.33 | Induktiver Erwärmungsprozess - Pilotanlage (unbesch. Material) | 31 |
| 2.34 | Induktiver Erwärmungsprozess - Pilotanlage (besch. Material) | 31 |
| 2.35 | Pilotanlage des Instituts T&F | 32 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.36 | Induktiver Erwärmungsprozess - Serienanlage (besch. Material) | 32 |
| 2.37 | Presshärteleinie mit Drehherdofen | 33 |
| 2.38 | Funktionsschema eines MLK-Ofens | 34 |
| 2.39 | MLK-Ofen | 35 |
| 2.40 | Aufheiz- und Abkühlkurve bei der Kontakterwärmung | 35 |
| 2.41 | Prinzip der Kontakterwärmung | 36 |
| 2.42 | Pilot-Anlage zur Kontakterwärmung | 36 |
| 2.43 | Wirbelschichtofen | 37 |
| 2.44 | Unterschiedliche Gefügeausbildung durch „Tailored Tempering“ | 39 |
| 2.45 | Partielles Presshärten mit „HotPHASE“ | 40 |
| 2.46 | Die fünf Wettbewerbskräfte | 41 |
| 2.47 | Quellen von Felddaten | 46 |
| 4.1 | Sankey-Diagramm eines Rollenherdofens im SB | 53 |
| 4.2 | Sankey-Diagramm eines Rollenherdofens im SSB | 53 |
| 4.3 | Strompreise verschiedener Endverbraucher | 63 |
| 4.4 | Weltweite Industriestrompreise im Vergleich | 65 |
| 4.5 | Vergleich des Platzbedarfes der Erwärmungsanlagen | 66 |
| 5.1 | Unternehmen in der Branche | 68 |
| 5.2 | Lieferanten der Branche | 69 |
| 5.3 | Potenzielle neue Konkurrenten | 70 |
| 5.4 | Abnehmer der Branche | 71 |
| 5.5 | Substitutionsprodukte | 73 |
| 5.6 | Wettbewerbskräfte innerhalb der Branche | 74 |
| 6.1 | Pressgehärtete Bauteile im neuen VW Golf VII | 75 |
| 6.2 | Bauteilspektrum im PKW - 1 | 76 |
| 6.3 | Bauteilspektrum im PKW - 2 | 77 |
| 6.4 | Zunahme des Anteils an pressgehärteten Bauteilen bei der Volvo AB | 78 |
| 6.5 | Prognose des Bedarfs an Warmumformteilen | 79 |
| 6.6 | Produktionszahlen von Fahrzeugen bis 2011 und Trend bis 2022 | 79 |
| 6.7 | Prognose der zukünftigen Fahrzeugproduktion bis 2022 | 80 |
| 6.8 | Prognose - Anzahl pressgehärteter Bauteile pro PKW | 80 |
| 6.9 | Bedarf an Presshärteleinien und pressgehärteten Bauteilen bis 2015 | 81 |
| A.1 | Farbschlüssel für die Materialien | 84 |
| A.2 | Verwendete Materialien in verschiedenen Fahrzeugmodellen - 1 | 85 |
| A.3 | Verwendete Materialien in verschiedenen Fahrzeugmodellen - 2 | 86 |
| A.4 | Verwendete Materialien in verschiedenen Fahrzeugmodellen - 3 | 87 |
| A.5 | Einsatz von Pressgehärtete Bauteilen in Fahrzeugmodellen der Audi AG | 88 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Herstellerbezeichnungen für presshärtbare Stähle | 9 |
| 2.2 | Chemische Zusammensetzung borlegierter Vergütungsstähle verschiedener Hersteller | 10 |
| 2.3 | Mechanische Eigenschaften der Stahlgüten im Anlieferungszustand und nach der Warmumformung | 10 |
| 2.4 | Einsatzmöglichkeiten verschiedener Produkte der Stahlhersteller | 10 |
| 2.5 | Vergleich der x-tec® - Beschichtungen | 15 |
| 2.6 | Auszug aus einem Lastenheft für einen Rollenherdofen, Volkswagen AG . . | 38 |
| 2.7 | Kategorien von Rohdaten | 46 |
| 4.1 | Spezifische Wärmekapazität des Materials 22MnB5 | 51 |
| 4.2 | Mittlere spezifische Wärmekapazität | 51 |
| 4.3 | Wirkungsgrade und Verluste bei unterschiedlichen Betriebszuständen . . . | 60 |
| 4.4 | Festgelegte Betriebszeiten bei unterschiedlichen Betreibermodellen | 61 |
| 4.5 | Vergleich der Wirkungsgrade - Betrachtung eines Produktionstages | 61 |
| 4.6 | Vergleich der Wirkungsgrade - Betrachtung eines Produktionsjahres | 61 |
| 4.7 | Vergleich der Anschaffungskosten für die Erwärmungsanlagen | 63 |
| 4.8 | Vergleich der Betriebskosten bei unterschiedlichen Betreibermodellen . . . | 64 |
| 4.9 | Vergleich der Gesamtkosten | 64 |

Literaturverzeichnis

- Automotive Circle International, editor (2007). *EuroCarBody2007- 9th International Car Body Benchmarking Platform*, Bad Nauheim. F. Ebner.
- Automotive Circle International, editor (2010). *EuroCarBody2010 - 12th International Car Body Benchmarking Conference*, Bad Nauheim. Vincentz Network GmbH & Co. KG.
- Automotive Circle International, editor (2011). *EuroCarBody2011 - 13th Global Car Body Benchmarking Conference*, Bad Nauheim. Vincentz Network GmbH & Co. KG.
- Automotive Circle International, editor (2012). *EuroCarBody2012 - 14th Global Car Body Benchmarking Conference*, Bad Nauheim. Vincentz Network GmbH & Co. KG.
- Berglund, G. (2008). *The history of hardening of boron steel in Northern Sweden*. In Steinhoff et al. [2008].
- Ebner, R. J. (2011). *HotPHASE - Press Hardening Automotive Solutions by EBNER*. In Steinhoff et al. [2011].
- EP 2497840A1 (2012). *Ofenpatent zum partiellen Erwärmen von Stahlblechteilen*. Online: <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20120912/patents/EP2497840NWA1/document.pdf>; zuletzt besucht Februar 2013.
- Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., editor (2010). *Bauteile der Zukunft - Methoden und Prozesse: Tagungsband T31 des 30. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung am 2. und 3. März 2010 in Bad Boll*, Hanover. Meisenbach Verlag.
- H. Lehmann, R. S. (2008). *Rollenherdöfen für das Presshärten*. In Merklein [2008].
- H. Schumann, H. O. (2007). *Metallografie*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 14. Auflage 2005, 1. Nachdruck 2007 edition. ISBN 978-3-527-30679-4.
- Hund, R. (2011). *Continuous Improvement of Hot Forming Technology*. In Steinhoff et al. [2011].
- ICAM, editor (2005). *Proceedings of the International Conference on Agility*, Finland. Helsinki University of Technology.
- IDDRG, editor (2004). *Proceedings of the 23th International Deep Drawing Research Group Congress IDDRG*, Sindelfingen, Deutschland. IDDRG Conference.

- International Institution for Production Engineering Research -CIRP, editor (2009). *59th CIRP General Assembly*, Boston. Elsevier.
- J. Fasholz, G. O. (1991). *Induktive Erwärmung - Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. RWE Energie AG, Essen, 4. vollständig überarbeitete Auflage edition.
- K. Karbasian, A. T. (2010). *A review on hot stamping*. Journal of Materials Processing Technology, 210(15).
- K. Mori, D. I. (2009). *Prevention of oxidation in hotstamping of quenchable steel sheet by oxidation preventive oil*. In International Institution for Production Engineering Research -CIRP [2009].
- Kolleck, R., editor (2010). *IDDRG 50th Anniversary Conference - Tools and Technologies for the Processing of Ultra High Strength Steels*, Graz, Österreich. Verlag der Technischen Universität Graz.
- Kolleck, R., editor (2011). *TTP 2011 - Tools and Technologies for Processing Ultra High Strength Materials*, Graz. Verlag der Technischen Universität Graz.
- Kolleck, R., Veit, R., M.Merklein, Lechler, J. and M.Geiger (2009). *Investigation on induction heating for hot stamping of boron alloyed steels*. In International Institution for Production Engineering Research -CIRP [2009].
- Köyer, M., Horstmann, J., Sikora, S., Wuttke, T., Zaspel, I. and Lenze, F.-J. (2010). *Oberflächenveredelung für die Warmumformung - Serienprodukte und Neuentwicklungen*. In Merklein [2010].
- Lange, K. (2002). *Umformtechnik - Grundlagen*. Springer Verlag, Berlin, 2.Auflage edition. ISBN 3-540-43686-3.
- Lehmann, H. (2009). *Neueste Entwicklungen im Bereich Wärmebehandlung von Bauteilen für das Presshärten*. In M. Merklein [2009].
- Lehmann, H. (2010). *Roller Hearth Furnaces for Hot-Form Hardening*. In Kolleck [2010].
- Lehmann, H. (2011). *Aktuelle Entwicklungen bei Schwartz Öfen für das Press-Härten*. In Merklein [2011].
- M. Merklein, M. G., editor (2007). *2. Erlanger Workshop Warmblechumformung*, Erlangen. Meisenbach Verlag.
- M. Merklein, M. G., editor (2009). *4. Erlanger Workshop Warmblechumformung*, Erlangen. Meisenbach Verlag.
- M. Schupfer, K. S. (2011). *Market Development and Technological Perspectives in Presshardening of UHSS*. In Steinhoff et al. [2011].
- M. Spittel, T. S. (2009). *Steel symbol/number: 22MnB5/I.5528*. Online: http://www.springermaterials.com/pdfs/10.1007/978-3-540-44760-3_146.pdf; zuletzt besucht Oktober 2012.
- Merklein, M., editor (2008). *3. Erlanger Workshop Warmblechumformung*, Erlangen. Meisenbach Verlag.

- Merklein, M., editor (2010). *5. Erlanger Workshop Warmblechumformung*, Erlangen. Meisenbach Verlag.
- Merklein, M., editor (2011). *6. Erlanger Workshop Warmblechumformung*, Erlangen. Meisenbach Verlag.
- Naderi, M., Durrenberger, L., Molinari, A. and Bleck, W. (2007). *Constitutive relationships for 22MnB5 boron steel deformed isothermally at high temperatures*. *Materials Science and Engineering*, 478(1-2).
- Naderi, M. (2007). *Hot Stamping of Ultra High Strength Steels*. PhD thesis, Fakultät für Georeourcen und Materialtechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- Overrath, J., Lenze, F.-J. and Sikora, S. (2010). *Aktuelle Entwicklung der Warmumformung im automobilen Fahrzeugbau*. In Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. [2010].
- P. Dick, T. S. (2008). *Warmumformung bei Daimler - Ein heiß diskutiertes Thema*. In Merklein [2008].
- Paar, U., Becker, H. and Alsmann, M. (2008). *Press-hardened components from Kassel - chances and challenges*. In Steinhoff et al. [2008].
- Pfeifer, H., Nacke, B. and Beneke, F. (2011). *Praxishandbuch Thermoprozesstechnik, Band II: Prozesse - Komponenten - Sicherheit*. Vulkan Verlag, Essen, 2.Auflage edition. ISBN 978-3-8027-2948-5.
- Ploshikhin, V., Prihodovsky, A., Kaiser, J., Lindner, H., Lengsdorf, C. and Roll, K. (2011). *New heating technology for the furnace-free presshardening process*. In Kolleck [2011].
- Porter, M. (2008). *Wettbewerbsstrategie - Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten*. Campus Verlag GmbH, Frankfurt / New York, 11.Auflage edition. ISBN 978-3-593-38710-9.
- R. Kolleck, J.-A. F. (2004). *Manufacturing methods for safety and structure body parts for lightweight body design*. In IDDRG [2004].
- R. Kolleck, S. P. (2005). *Technology update - Forming technology and vehicle safety*. In ICAM [2005].
- Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R. and Black, M. (2003). *Handbook of Induction Heating*. Marcel Dekker AG, New York. ISBN 0-8247-0848-2.
- Schuler AG (2012). *Formhärten mit PCH - Schnell, flexibel, kosteneffektiv*, Broschüre.
- Stahl-Informations-Zentrum (2011). *Heißes Eisen: warmumgeformte Stähle*. Online: http://www.stahl-info.de/medieninformationen/Archiv/pm_heisses_eisen_warmumgeformte_staehle.asp; zuletzt besucht Februar 2013.
- Stahl-Informations-Zentrum (2012). *Gewichtsspirale umgekehrt*. Online: http://www.stahl-info.de/medieninformationen/pm_gewichtsspirale_umgekehrt.asp; zuletzt besucht Februar 2013.

- Steinhoff, K., Oldenburg, M. and Prakash, B., editors (2008). *CHS² - 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel*, Kassel. GRIPS media.
- Steinhoff, K., Oldenburg, M. and Prakash, B., editors (2011). *CHS² - 3rd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel*, Kassel. Verlag Wissenschaftliche Scripten.
- T. Laumann, M. P. (2007). *Potential verzinkter Warmumformteile für den Einsatz in der Rohkarosserie*. In M. Merklein [2007].
- Veit, R., Hoffmann, H., Kolleck, R., Brugger, P., Thomas, I. and Sikora, S. (2011a). *Phase Formation of Al/Si-Coatings during Induction Heating of Boron Alloyed Steel Sheets*. In Kolleck [2011].
- Veit, R., Kolleck, R., Gasser, C. and Wilfinger, G. (2011b). *Development of a Close-to-production Prototype of an Induction Heating Device for Hot Stamping of Boron Alloyed Steels*. In Wieland [2011].
- VIKTORIA TREUHAND GMBH (2012). *Schwartz Gmbh - Jahresabschluss zum Geschäftsjahr 01.01.2011 bis zum 31.12.2012*, Jahresabschluss.
- Wieland, H., editor (2011). *3rd International Conference on Steels in Cars and Trucks*, Düsseldorf. Verlag Stahleisen GmbH.

Online Ressourcen

- L. Polk & Co. (2012). *Polk Issues Global Auto Forecast for 2012: 77.7 million in New Vehicle Sales, up 6.7% from 2011*. Online: https://www.polk.com/company/news/polk_issues_global_automotive_forecast_for_2012_77.7_million_in_new_vehicle; zuletzt besucht Februar 2013.
- ArcelorMittal (2012). *Geschweißte Platinen mit verschiedenen Blechdicken und/oder Stahlgüten: Tailored Blanks*. Online: http://www.arcelormittal.com/automotive/saturnus/sheets/catalogue.pl?id_sheet=S3&header=&language=DE; zuletzt besucht Februar 2013.
- ArcelorMittal (2013a). *Härtbare Borstähle*. Online: http://www.arcelormittal.com/industry/prd_web/new_web_details.pl?code=A54&langlist=DE; zuletzt besucht März 2013.
- ArcelorMittal (2013b). *Warmumformstähle - Usibor®*. Online: http://www.arcelormittal.com/fce/saturnus/sheets/catalogue.pl?language=DE&id_sheet=E&fn=; zuletzt besucht März 2013.
- Arepo Consult (2013). *Strompreise in Deutschland im Vergleich*. Online: http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/AEE_Strompreis_in_Deutschland_im_Vergleich_Apr12.jpg; zuletzt besucht März 2013.
- A.T. Kearney (2012). *Mega trends in the automotive industry and its consequences for global players*. Online: <http://www.atkearney.at/content/misc/wrapper>.

php/id/50561/name/pdf_42610d_2012-10_vortrag_tu_graz_v4_print_1353322790c2b8.pdf; zuletzt besucht Februar 2013.

Audi AG (2011). *Audi Collision Frame Technology Guide*. Online: http://audicollisionrepair.com/media/CollisionFrame_v9.pdf; zuletzt besucht Februar 2013.

Benteler Automobiltechnik GmbH (2010). *Verfahren und Fertigungsanlage zur Herstellung von Kraftfahrzeugbauteilen (DE 102010027179)*. Online: <http://www.freepatentsonline.com/DE102010027179.html>; zuletzt besucht Februar 2013.

Benteler Automobiltechnik GmbH (2012). *Method and production plant for making components for a motor vehicle (US 2012/0174406 A1)*. Online: <http://www.google.com/patents/US20120174406?dq=method+and+production+plant+for+making+components+for+a+motor+vehicle&hl=de&sa=X&ei=Fa0kUaK00424hAeGw4GYBQ&ved=0CDcQ6AEwAA>; zuletzt besucht Februar 2013.

Bundesnetzagentur (2013). *Evaluierungsbericht der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen zur Ausgleichsverordnung*. Online: http://bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/klima_und_energie/120612_bund_klima_energie_strompreise_energie_hintergrund.pdf; zuletzt besucht März 2013.

Elster GmbH (2011). *Segmentflamrohr SICAFLEX®*. Online: http://www.lbe-online.de/fileadmin/kromschroeder/LBE_online/Produkte/ECOMAX/ECOMAX_Brenner_PDFs/pb_sicaflex_d_01.pdf; zuletzt besucht September 2012.

EP 2143808A1 (2010). *Partielles Warmformen und Härten mittels Infrarotlampenerwärmung*. Online: <https://data.epo.org/publication-server/getpdf.jsp?pn=2143808&ki=A1&cc=EP>; zuletzt besucht Februar 2013.

EP 2497840A1 (2012). *Ofenpatent zum partiellen Erwärmen von Stahlblechteilen*. Online: <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20120912/patents/EP2497840NWA1/document.pdf>; zuletzt besucht Februar 2013.

EP 2548975A1 (2013). *Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines gehärteten metallischen Bauteils mit mindestens zwei Bereichen unterschiedlicher Duktilität*. Online: <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20130123/patents/EP2548975NWA1/document.pdf>; zuletzt besucht Februar 2013.

EUROSTAT (2013a). *Gaspreise für industrielle Verbraucher*. Online: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=de&pcode=ten00112&plugin=1>; zuletzt besucht März 2013.

EUROSTAT (2013b). *Strompreise für industrielle Verbraucher*. Online: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=de&pcode=ten00114>; zuletzt besucht März 2013.

- FK Industrieofenbau + Schutzgastechnik GmbH (2009). *Neue Hubbalkenöfen zum zunderarmen Erwärmen mit elektrischer Beheizung, Gas- oder Ölfueuerung*. Online: http://www.industrieofen-schutzgas.de/downloads/oefen/hubbalkenoefen/fachbericht1_de.pdf; zuletzt besucht September 2012.
- Gödicke, S. (2012). *Multifunktionale Schicht schützt Stähle im Warmumformprozess - Nano-Schicht verhindert, dass es Zunder gibt*. Online: <http://www.industrieanzeiger.de/home/-/article/12503/28806927/Nano-Schicht-verhindert>; zuletzt besucht August 2012.
- Gestamp HardTech AB (2012). *Focus on safety...* Online: http://www.hardtech.gestamp.com/web/extweb_eng_1.nsf/0/1F2F728EFB4AA486C12572BA003095AC?OpenDocument; zuletzt besucht Juli 2012.
- Goedicke, S., Paar, U. and Sepeur, S. (2012). *Verfahren zum korrosionsschutz von karosserie-, fahrwerks-, motorbauteilen oder abgasanlagen (EP 2178987 B1)*. Online: <http://www.google.com/patents/EP2178987B1?cl=de>; zuletzt besucht März 2013.
- Hoesch Hohenlimburg GmbH (2006). *Warmgewalzter Bandstahl. Hohenlimburger Mittelband*. Online: [http://www.hoesch-hohenlimburg.de/projekt/web2006/hho/hhowebcms.nsf/\\$A11/5FBA8E2A70F31505C12570F5004AB5F2/\\$FILE/Warmbandd.pdf](http://www.hoesch-hohenlimburg.de/projekt/web2006/hho/hhowebcms.nsf/$A11/5FBA8E2A70F31505C12570F5004AB5F2/$FILE/Warmbandd.pdf); zuletzt besucht Juli 2012.
- Hoesch Hohenlimburg GmbH (2011). *Sonderbaustähle - Borstähle (auszugsweise)*. Online: http://www.hoesch-hohenlimburg.de/projekt/web2006/hho/hhowebcms.nsf/www/de_borlegiert.html; zuletzt besucht März 2013.
- IBS Industrie-Brenner-Systeme GmbH (2013). *Rekuperatorbrenner REKUFIRE®*. Online: http://www.ibs-brenner.de/4media/download/IBS_Recufire-DE_GB.pdf; zuletzt besucht Februar 2013.
- Misholi, A. (2010). *Zunder*. Online: <http://www.techniklexikon.net/d/zunder/zunder.htm>; zuletzt besucht August 2012.
- OICA (2012). *Production Statistics*. Online: <http://oica.net/category/production-statistics/>; zuletzt besucht Februar 2013.
- Ploshikhin, V., Lengsdorf, C., Prihodovsky, A., Kaiser, J. and Bleier, H. (2012). *Flex-WB - Passgenaue Bauteileigenschaften durch flexible Wärmebehandlung*. Online: http://www.forschungsprojekt-flexible-waermebehandlung.de/download/FlexWB_Projektergebnisse_November_2012.pdf; zuletzt besucht Februar 2013.
- PwC - PricewaterhouseCoopers International Limited (2011). *Automobilbranche steht vor Rekordjahr*. Online: <http://www.pwc.de/de/automobilindustrie/automobilbranche-steht-vor-rekordjahr.jhtml>; zuletzt besucht Februar 2013.
- Salzgitter Flachstahl GmbH (2007). *Borlegierte Vergütungsstähle*. Online: http://www.salzgitter-flachstahl.de/de/Produkte/warmgewalzte_

- produkte/stahlsorten/Borlegierte_Verguetungsstaehle/; zuletzt besucht Juli 2012.
- Salzgitter Flachstahl GmbH (2013). *22MnB5 Vergütungsstahl, borlegiert*. Online: http://www.salzgitter-flachstahl.de/MDB/downloadcenter/Lieferprogramm_Kaltgewalztes_Feinblech/Borlegierte_Verguetungsstaehle/22MnB5_Stand_01_13_; zuletzt besucht März 2013.
- Schuler AG (2009a). *Formhärten von Schuler - leichter, härter, sicherer*. Online: http://www.schulergroup.com/technologien/produkte/formhaerten_technologie/index.html; zuletzt besucht September 2012.
- Schuler AG (2009b). *Höhere Effizienz bei der Warmumformung: Neuer Drehherdofen von Schuler sorgt für Prozesssicherheit und sinkende Kosten*. Online: http://www.schulergroup.com/unternehmen/presse/pressemeldungen/tab/archiv/2009/2009_01_15_warmumformung_drehherdofen/index.html; zuletzt besucht September 2012.
- Schuler AG (2011). *Bedarf an Warmumformteilen in der Automobilindustrie*. Online: http://www.stahl-info.de/medieninformationen/Bilder/Bilder_2011/2011_05_31_Bild1_Automobiler_Leichtbau_mit_Stahl_Heisses_Eisen_Warmumgeformte_Staehle.jpg; zuletzt besucht März 2013.
- SECO/WARWICK GmbH (2012). *Innovative Wärmebehandlungsanlagen*. Online: http://www.industrieofen-schutzgas.de/downloads/oefen/hubbalkenoefen/fachbericht1_de.pdf; zuletzt besucht September 2012.
- Stahl-Informations-Zentrum / Volkswagen AG (2012). *Gewichtsspirale umgekehrt*. Online: http://www.stahl-info.de/medieninformationen/Bilder/Bilder_2011/2011_05_31_Bild1_Automobiler_Leichtbau_mit_Stahl_Heisses_Eisen_Warmumgeformte_Staehle.jpg; zuletzt besucht Februar 2013.
- ThyssenKrupp AG (2008). *techforum Heft 1 - 2008*. Online: http://www.thyssenkrupp.com/documents/Publikationen/Techforum/techforum_1_2008_de.pdf; zuletzt besucht Februar 2013.
- ThyssenKrupp AG (2009). *Tailored Blanks - Optimierte Bauteile aus Stahlblech*. Online: <http://www.tailored-blanks.com/produkte/tailored-products/thyssenkrupp-tailored-blanks.html>; zuletzt besucht Februar 2013.
- ThyssenKrupp AG (2012a). *Entwicklungen und Potenziale für den Werkstoff Stahl im Automobilleichtbau*. Online: http://www.acs-innovations.de/acswp/wp-content/uploads/2012/12/20121025_LKE_Jahresveranstaltung_ACS_KFE_Druckversion-Kompatibilit%C3%A4tsmodus.pdf; zuletzt besucht März 2013.
- ThyssenKrupp AG (2012b). *techforum Heft 1/2012*. Online: http://www.thyssenkrupp.com/documents/Publikationen/Techforum/techforum_1_12_de.pdf; zuletzt besucht Februar 2013.
- ThyssenKrupp Steel AG (2008). *Schmelztauchveredelndes Feinblech. Hot-dip coa-*

- ted sheet*. Online: http://incar.thyssenkrupp.com/download/Broschueren/SVF_de_en.pdf; zuletzt besucht August 2012.
- ThyssenKrupp Steel AG (2009). *Mangan-Bor-Stähle MBW zum Warmformhärten. Für höchste Festigkeiten*. Online: http://incar.thyssenkrupp.com/download/Broschueren/Mangan_Bor_Staehle_zum_Warmumformhaerten.pdf; zuletzt besucht Juli 2012.
- ThyssenKrupp Steel AG (2012). *Mangan-Bor-Stähle: MBW*. Online: http://incar.thyssenkrupp.com/7_01_020_Mangan_Bor.html?lang=de; zuletzt besucht August 2012.
- ThyssenKruppAG (2013). *Für jede Anwendung der richtige Werkstoff*. Online: http://incar.thyssenkrupp.com/7_01_000_Werkstoffe.html?lang=de; zuletzt besucht Februar 2013.
- VDI Wissensforum GmbH (2012). *Innovative Leichtbaukonzepte für Automobile*. Online: <http://www.vdi-wissensforum.de/uploads/media/wf-2012-03-30-Leichtbau.pdf>; zuletzt besucht März 2013.
- VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. (2013). *Kostenverteilung in der Energiewende - Sicht der energieintensiven Industrien*. Online: http://www.energiestage-niedersachsen.de/fileadmin/uploads/net2012/Fachforum3/Annette_Loske_-_Fachforum_3.pdf; zuletzt besucht März 2013.
- voestalpine AG (2012). *voestalpine mit Zukunftsprodukt phs-ultraform auf der Überholspur*. Online: <http://www.voestalpine.com/group/static/sites/default/downloads/de/presse/2012-03-01-voestalpine-mit-zukunftsprojekt-phs-ultraform-auf-der\discretionary{-}{-}{-}-ueberholspur.pdf>; zuletzt besucht Jänner 2013.
- Volkswagen AG (2009). *Leichtbau reduziert Emissionen*. Online: <http://geschaeftsbericht2009.volkswagenag.com/lagebericht/wertsteigerndefaktoren/forschungundentwicklung/leichtbau.html>; zuletzt besucht März 2013.
- W. HALDENWANGER Technische Keramik GmbH & Co. KG (2012). *Keramik im Ofenbau*. Online: http://www.buntenkoetter-btk.de/pdfs/prod_ofenbau.pdf?rubrik=Ofenbau; zuletzt besucht September 2012.
- WMU GmbH (2012). *Beispiel Rollenherdofen VKR 25800g*. Online: http://www.wmu-gmbh.de/html/beispiel_rollenherdofen_vkr_25.html; zuletzt besucht September 2012.
- WS Wärmeprozess-technik GmbH (2013). *SiSiC Strahlrohre für die indirekte Beheizung*. Online: http://www.flox.com/documents/de_Strahlrohre.pdf; zuletzt besucht Februar 2013.