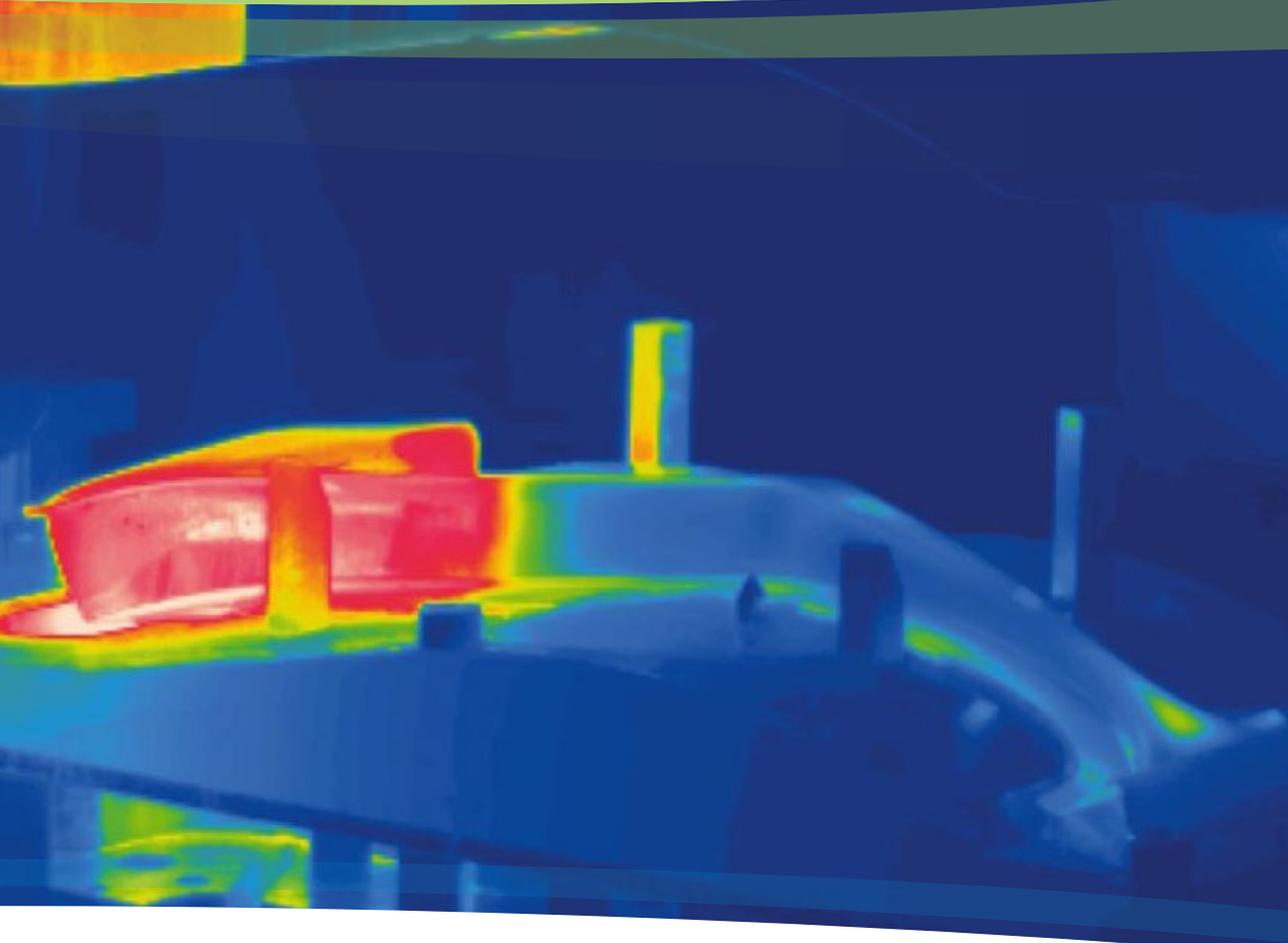


VDI

Zentrum
Ressourceneffizienz

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 5



Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Automobilbau

März 2014

Diese Kurzanalyse entstand im Auftrag der VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH und wurde durch die VDI Technologiezentrum GmbH erstellt.

Kurzanalyse Nr. 5: Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Automobilbau

Wir bedanken uns für die fachliche Unterstützung bei Herrn Sebastian Schrems, Oberingenieur und Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt.

Autor und fachlicher Ansprechpartner:

Oliver S. Kaiser, VDI Technologiezentrum GmbH

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Johannisstr. 5 - 6

10117 Berlin

Tel. +49 30-27 59 506-0

Fax +49 30-27 59 506-30

info@vdi-zre.de

www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © ThyssenKrupp AG, Tailored-Tempering

https://www.thyssenkrupp.com/de/presse/bilder.html&photo_id=1207

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

v2 05-2014

Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Automobilbau

Kurzanalyse

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	6
2. FALLBEISPIELE ZUR STEIGERUNG DER RESSOURCEN- EFFIZIENZ AUS SYSTEMISCHER SICHT IN PRODUZIERENDEN UNTERNEHMEN DES AUTOMOBILBAUS	9
2.1 Tailored Tempering bei Stahlblechen	14
2.2 Vereinfachter Lackierprozess	16
2.3 Upcycling von Gummierstoffen	17
2.4 Produktion von Automobilkarosserien	19
3. FAZIT	22
4. ANHANG	24
Abbildungsverzeichnis	24
Fußnotenverzeichnis	24

1 EINLEITUNG

Ressourceneffizienz findet beim Automobil nicht erst auf der Straße statt, sondern bereits bei der Herstellung. Diese Kurzanalyse schildert Fallbeispiele zur Steigerung der Ressourceneffizienz in den produzierenden Unternehmen des Automobilbaus.

Als wesentliche natürliche Ressourcen gelten erneuerbare und nicht erneuerbare Rohstoffe sowie Energie, Fläche und Wasser. Der direkte Ressourcenverbrauch wird durch den Einsatz etwa von Erzen zur Erzeugung von Aluminium und Stahl definiert. Der indirekte Ressourcenverbrauch wäre in diesem Beispiel durch den mit der Erzgewinnung verbundenen Verbrauch von Energie, Wasser oder der Entstehung von Abraum bestimmt. Der indirekte kann den direkten Ressourcenverbrauch durchaus um ein Mehrfaches übersteigen.¹

Volkswirtschaftlich wird als Ressourceneffizienz der Quotient aus ökonomischer Wertschöpfung und Rohstoffinput bezeichnet. Auf betrieblicher Ebene wird unter Ressourceneffizienz der Nutzen bezogen auf den hierfür erforderlichen Aufwand an natürlichen Ressourcen verstanden. Die Volkswagen AG definiert: „Ressourceneffizientes Handeln bedeutet für den Konzern, dass seine Produkte im Verlauf des gesamten Lebenszyklus so wenige natürliche Ressourcen (z. B. Boden, Wasser, Luft oder Rohstoffe) in Anspruch nehmen wie möglich.“² Bei den Strategien zur Ressourceneffizienzsteigerung wird häufig davon ausgegangen, dass eher die Wertschöpfung konstant gehalten und dabei der Rohstoffinput minimiert wird, als dass bei unverändertem Rohstoffinput die Wertschöpfung erhöht wird.³ Von dieser Konstellation wird auch in dieser

¹ Jörg Woidasky, Thomas Hirth: Ressourceneffizienz von heute bis übermorgen, in: Chemie Ingenieur Technik 2012, 84, No. 7, 969 – 976; http://www.matressource.de/fileadmin/redakteure/pdf/2012_CIT-Hirth.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

² Volkswagen Aktiengesellschaft: Ressourceneffizienz. Engagement aus Verantwortung. Hrsg. Konzernforschung Umwelt Produkt (K-EFUP), September 2013, S. 10. http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/ressourceneffizienz/ressourceneffizienz/_jcr_content/renditions/rendition.file/vw-re_broa4_130926_de.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

³ Jörg Woidasky, Thomas Hirth: Ressourceneffizienz von heute bis übermorgen, in: Chemie Ingenieur Technik 2012, 84, No. 7, 969 – 976; http://www.matressource.de/fileadmin/redakteure/pdf/2012_CIT-Hirth.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

Kurzanalyse ausgegangen.

Befördert wird das Streben nach Ressourceneffizienz durch steigende Rohstoffpreise, die die Unternehmensrentabilität gefährden. Weitere Motivatoren sind Rohstoffsicherheit im Sinne der anhaltenden Rohstoffverfügbarkeit und ökologische Aspekte wie der Klimaschutz und die Reduktion von Schadstoffen in die Umwelt.⁴ Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO fragte im Jahr 2010 Unternehmen des produzierenden Gewerbes, welche Unternehmensziele durch Ressourceneffizienz unterstützt würden. 87 Prozent der antwortenden Unternehmen nannten die Senkung von Kosten als vorrangiges Ziel, 82 Prozent den Ausbau von Wettbewerbsvorteilen. Die Unterstützung der Versorgungssicherheit wurde von 28 Prozent der Unternehmen angeführt. Im Mittelfeld lagen Image und Werbemöglichkeiten (53 Prozent) und Technologievorsprung/Innovativität (49 Prozent). Bei den Antworten der großen Unternehmen (mit mehr als 250 Beschäftigten) stand der Aspekt Technologievorsprung/Innovativität mit 75 Prozent gleich hinter den Kostensenkungspotenzialen.⁵

Vergleichbare Ergebnisse zeigte eine Umfrage der Fakultät Elektrotechnik/Wirtschaftsingenieurwesen an der FH Landshut im Jahr 2012 speziell in der Automobilbranche. Hier sehen 81 Prozent der Befragten an erster Stelle die Kostenersparnis auf jeden Fall als Vorteil und Motivator für zukünftige Ressourceneffizienzmaßnahmen.⁶

Laut einer Umfrage des VDI ZRE im Branchenumfeld Fahrzeugbau geben knapp 80 Prozent der Befragten an, dass das Potential der Ressourceneffizienz noch nicht ausgeschöpft wurde.⁷

⁴ Volkswagen Aktiengesellschaft: Ressourceneffizienz. Engagement aus Verantwortung. Hrsg. Konzernforschung Umwelt Produkt (K-EFUP), September 2013, S. 11. http://www.volkswagen.de/content/media/lib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/ressourceneffizienz/ressourceneffizienz/_jcr_content/renditions/rendition.file/vw-re_broa4_130926_de.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

⁵ Reiner Erhardt, Nico Pastewski: Relevanz der Ressourceneffizienz im produzierenden Gewerbe. Fraunhofer Verlag (2010); http://www.iao.fraunhofer.de/lang-de/images/iao-news/studie_relevanz_ressourceneffizienz.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

⁶ Carsten Röh: Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe, Fokus Automotive. Vortrag, 16.5.2013, http://www.muenchen.ihk.de/de/innovation/Anhaenge/02_roeh_materialeffizienz-fokus-automotive.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

⁷ VDI ZRE Umfrage, Oktober 2011, Identifizierung wesentlicher Hemmnisse und Motivatoren im Entscheidungsprozess von KMU bei der Inanspruchnahme öffentlicher Förderprogramme zur Steigerung der Ressourceneffizienz, S13. http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/28-11-2011_Broschuere_Web.pdf (aufgerufen am 18.12.2014)

Die Materialkosten stellen tatsächlich den größten Kostenblock im Fahrzeugbau dar. Im Jahr 2009 bezogen sich 70 Prozent der Kostenanteile am Umsatz im gesamten Fahrzeugbau auf Materialkosten, keine 20 Prozent waren Personalkosten.⁸ Der Anteil der Energiekosten an der Bruttowertschöpfung beträgt im Kraftwagenbau 4,4 Prozent.⁹ Das sind über 50 Prozent mehr als im allgemeinen Maschinenbau, dessen Energiekostenanteil an der Bruttowertschöpfung bei 2,8 Prozent liegt.¹⁰

So offensichtlich die Bedeutung der Ressourceneffizienz für die Unternehmen der Automobilindustrie ist, so gering scheint das Interesse an der Fahrzeugfertigung in der öffentlichen Wahrnehmung. Dies spiegelt sich auch im Aktionsplan CARS 2020 der Europäischen Kommission von 2012 wider, der sich auf Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-, Schadstoff- und Lärmemissionen der Pkw sowie Maßnahmen für mehr Straßenverkehrssicherheit konzentriert, einschließlich intelligenter Verkehrssysteme. Hinzu kommt der Ausbau der Infrastruktur für alternative Energieträger wie elektrischer Strom, Wasserstoff und Erdgas.¹¹ Alle Maßnahmen setzen also am Fahrzeugbetrieb an, keine an der Herstellung.

Dabei ist der Herstellungsprozess bereits heute für 15 bis 20 Prozent der Treibhausgasemissionen, die ein Auto über den gesamten Produktlebensweg verursacht, verantwortlich.¹² In energieeffizienten Fabriken könnten 20 bis 30 Prozent des Energieverbrauchs im Vergleich zum Stand der Technik eingespart werden.¹³ Lösungen zeigt etwa die

⁸ Carsten Röh: Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe, Fokus Automotive. Vortrag, 16.5.2013, http://www.muenchen.ihk.de/de/innovation/Anhaenge/02_roeh_materialeffizienz-fokus-automotive.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

⁹ Einfluss der Umwelt- und Klimapolitik auf die Energiekosten der Industrie – mit Fokus auf die EEG-Umlage. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, März 2011, S. 6, http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee-import/files/pdfs/allgemein/aplication/pdf/eeg_stromkosten_bf.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

¹⁰ Einfluss der Umwelt- und Klimapolitik auf die Energiekosten der Industrie – mit Fokus auf die EEG-Umlage. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, März 2011, S. 6, http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee-import/files/pdfs/allgemein/aplication/pdf/eeg_stromkosten_bf.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

¹¹ European Commission – IP/12/1187: CARS 2020: für eine starke, wettbewerbsfähige und nachhaltige europäische Automobilindustrie. europa.eu Press Release, 08.11.2012, http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-1187_de.htm (aufgerufen am 18.12.2013)

¹² Hinrich Helms et al.: Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Juni 2013, S. 45, http://www.ifeu.de/index.php?bereich=ver&seite=flottenversuch_elektromobilitaet (aufgerufen am 18.12.2013)

¹³ Mario Steinebach: Das Auto der Zukunft – energieeffizient produziert. Informationsdienst Wissenschaft, 20.01.2010, (aufgerufen am 18.12.2013)

Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“ (InnoCat) auf, die an einer Referenzfabrik zur Produktion der Zukunft arbeitet.¹⁴

2. FALLBEISPIELE ZUR STEIGERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ AUS SYSTEMISCHER SICHT IN PRODUZIERENDEN UNTERNEHMEN DES AUTOMOBILBAUS

Es gibt eine Fülle von Beispielen für Ressourceneffizienz in der Automobilproduktion. Ein Querschnittsthema stellt die Senkung des Frischwasserverbrauchs, etwa durch die Abwasseraufbereitung, dar. Die Ford Motor Company hat im Rahmen ihrer „Global Water Management Initiative“ seit dem Jahr 2000 ihren globalen absoluten Wasserverbrauch von 64 Milliarden Liter um auf 24 Milliarden Liter gesenkt. Für das Jahr 2015 sind im globalen Konzerndurchschnitt weniger als 4.000 Liter Wasser je produziertem Fahrzeug geplant.¹⁵ Im Audi-Werk Ingolstadt wurde die anfallende Menge an Abwasser je Fahrzeug zwischen 1988 und 2012 von fast 5.000 Litern auf 1.900 Liter verringert.¹⁶ BMW hat den Frischwasserverbrauch weltweit von 2006 bis 2012 um 30 Prozent reduziert.¹⁷ Für alle europäischen Hersteller gibt die European Automobile Manufacturers Association (ACEA) eine Senkung des Frischwasserverbrauchs von rund 6.000 Litern je produziertem Fahrzeug im Jahr 2005 auf 4.250 Liter im Jahr 2012 an, was einer Reduktion um 28,5 Prozent entspricht.¹⁸

Senkung des Wasserverbrauchs ist ein Querschnittsthema.

Viele Ressourceneffizienzmaßnahmen in Teilbereichen der

¹⁴ Stefanie Michel: Referenzfabrik zur Produktion der Zukunft. Automobil-Industrie online, 09.07.2013, <http://www.automobil-industrie.vogel.de/produktion/articles/410678/> (aufgerufen am 18.12.2013)

¹⁵ Ford-Werke GmbH: Ford hat seinen weltweiten Wasserverbrauch seit dem Jahr 2000 um rund 62 Prozent gesenkt. Pressemitteilung, 11.04.2013, <http://www.presseportal.de/pm/6955/2448380/ford-hat-seinen-weltweiten-wasserverbrauch-seit-dem-jahr-2000-um-rund-62-prozent-gesenkt-bild> (aufgerufen am 18.12.2013)

¹⁶ Volkswagen Aktiengesellschaft: Ressourceneffizienz. Engagement aus Verantwortung. Hrsg. Konzernforschung Umwelt Produkt (K-EFUP), September 2013, S. 29. http://www.volkswagen.de/content/media/lib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/ressourceneffizienz/ressourceneffizienz/_jcr_content/renditions/rendition.file/vw-re_broa4_130926_de.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

¹⁷ Konzernweiter Umweltschutz. BMW AG, 2012, http://www.bmwgroup.com/bmwgroup_prod/d/0_0_www_bmwgroup_com/verantwortung/svr_2012/umweltschutz.html (aufgerufen am 18.12.2013)

¹⁸ European Automobile Manufacturers Association: Automobile Industry Pocket Guide 2013, S. 46, http://www.acea.be/images/uploads/files/POCKET_GUIDE_13.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

Produktion werden meist erst nach der Konzeption des Produktionsprozesses hinzugefügt. Beispielhaft seien hier genannt:

Die Entsorgung von Lackpulver oder Schleifstäuben als Abfall ist teuer. Feinkörnige Produktionsreststoffe können jedoch energetisch genutzt werden. Beim Lackieren von Autoteilen entsteht viel Abfall, denn lediglich ein Bruchteil der Farbe landet auf der Autokarosserie, der Rest wird abgesaugt. Nur begrenzte Anteile dieser Restfarbe können wiederverwendet werden. Eine Anlage, die Forscher vom Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF in Magdeburg zusammen mit der MBG Metallbeschichtung Gerstungen GmbH entwickelt haben, verwertet alle brennbaren pulverförmigen Industrieabfälle thermisch. An einem Referenzstandort ließen sich 25 Prozent des Erdgases, das üblicherweise zum Heizen verwendet wird, einsparen – und zudem 100 Prozent der Entsorgungskosten.



Abb. 1: Pilotanlage zur energetischen Nutzung feinkörniger Produktionsreststoffe in Gerstungen (Quelle: Fraunhofer IFF)

Im Volkswagenwerk Emden verbrauchen 20 umgerüstete Lüftungsanlagen nur noch 20 Prozent der zuvor verbrauchten Energie. Für 1,4 Millionen Euro wurden neue, effiziente Motoren eingebaut und diese mit zusätzlicher Regelungstechnik versehen. Im Jahr werden 7,1 Millionen Kilowattstunden Strom weniger verbraucht, was die CO₂-Emission um 4.100 Tonnen reduziert.¹⁹

Für die Unterkonstruktionen von Fahrzeugsitzen werden verschiedene metallische Werkstoffe in Form von Blechen verarbeitet, die gestanzt und anschließend umgeformt werden. Damit das Umformen reproduzierbare Ergebnisse liefert, werden die Coils oder Blechteile gleichmäßig mit Verarbeitungsölen benetzt. Für ein neues Sitzmodell von BMW wäre der Bearbeitungsaufwand gestiegen.



Abb. 2: Die Blechteile einer solchen Frontsitz-Struktur werden ressourceneffizient umgeformt (Quelle: Auto-Medienportal.Net/Johnson Controls)

Denn die Bauteile müssen nach dem Stanzen umgeformt und somit nochmals mit Schmiermittel versehen werden. Marktübliche Anlagen weisen Nachteile auf, weil die starke Anlagenverschmutzung durch die intensive Bildung von

¹⁹ Emden VW-Werk gewinnt Umwelt-Preis. Osfriesen-Zeitung online, 24.10.2013, <http://www.oz-online.de/-news/artikel/116913/Emder-VW-Werk-gewinnt-Umwelt-Preis> (aufgerufen am 18.12.2013)

Sprühnebel Absaugungen erfordert.

In einer von der Firma Technotrans neu entwickelten Sprühbeölung wird Öl nicht mittels zugeführter Druckluft, sondern durch ein hochfrequent pulsierendes Ventil mit einer Einstoff-Düse zerstäubt. Dadurch entfällt der kostenintensive Einsatz von Druckluft an den Düsen selbst, denn die Druckluft versorgt nur noch eine Dosierkolbenpumpe für den reinen Transport des Schmiermediums und der Druck wirkt lediglich in einem abgeschlossenen System. Das reduziert im Vergleich zu herkömmlichen Anlagen die Sprühnebelbildung so weit, dass eine Absaugung nicht erforderlich ist. Alle Anforderungen an den Prozess konnten mit dieser ressourceneffizienten Minimalmengenschmierung erfüllt werden, so dass er bei der C. Rob. Hammerstein GmbH & Co. KG für die Serienproduktion des BMW-Sitzes angewandt wird.²⁰

Bei der Fertigung von Getrieben und Wellen müssen die Oberflächen im Schweißnahtbereich als Vorbereitung zum thermischen Fügen rückstandsfrei sauber sein. Diese Schweißvorbehandlung vor dem Fügeprozess erfolgt in der Regel als nasschemische Reinigung. Die Reinigungsanlagen nehmen viel Platz in Anspruch, die Teile müssen außerhalb der Produktionslinie gereinigt werden, und der Energiebedarf ist durch das Erwärmen der Bäder hoch. Eine Alternative bildet das Säubern mittels Laser. Im Fertigungsprozess zeigt das den Vorteil, dass die kompakten Laser linienintegriert eingesetzt sind und sie die Bauteile auf dem Fließband fortlaufend trocken und medienfrei im Schweißnahtbereich säubern.²¹

Diese Laserbehandlung eignet sich auch zum Entlacken und Entschichten sowie zum Klebe- und Lackiervorbehandeln. Das spart große Mengen an Strahlmitteln. Die abgetragenen Partikel lassen sich rückstandsfrei absaugen und sortenrein entsorgen. Der gezielte Abtrag reduziert das Abfallvolumen bei vielen Anwendungen um über 90

Energiebedarf von
Reinigungsanlagen
ist hoch.

²⁰ Christoph Roderig: Automobilzulieferer setzt auf sparsame Sprühbeölung. MaschinenMarkt online, 30.01.13, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/umformtechnik/articles/392840/> (aufgerufen am 18.12.2013)

²¹ Nachhaltig säubern mit gebündeltem Licht, in: Nachhaltige Produktion, Juni 2012, S. 52 - 54

Prozent und auch der Energieverbrauch sinkt im Vergleich zu konventionellen Verfahren um bis zu 87 Prozent.²²

Fahrerassistenzsysteme, die Wärmebildkameras verwenden, identifizieren Menschen und Tiere auch im Dunkeln und bei Nebel. In den Kameras sind Infrarot (IR)-durchlässige Linsen verbaut, die zum einen aus den teuren Materialien Germanium, Zinkselenid oder Zinksulfid bestehen, zum anderen aufwändig mechanisch bearbeitet werden müssen. Im Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg wurde ein Herstellungsverfahren entwickelt, das amorphes Chalkogenidglas in einem Presswerkzeug heißprägt. Dadurch entfällt auch die bei herkömmlich gefertigten Optiken notwendige Nachbearbeitung. Trotz des veränderten Herstellungsverfahrens verfügen die gepressten Linsen über eine gleich gute optische Abbildungsqualität wie klassisch polierte IR-Optiken.²³

Durch ein neues Herstellungsverfahren entfällt eine Nachbearbeitung von Optiken.

Beim letztgenannten Beispiel werden bei einer einzelnen Komponente sowohl das Material als auch das Fertigungsverfahren substituiert. Die funktionellen Eigenschaften des Halbfertigproduktes ändern sich dadurch nicht. Diese Modifikation der optischen Linse betrifft nur den Vorlieferanten eines Automobilzulieferers, das Endprodukt Fahrerassistenzsystem ist unverändert. Die systemische Betrachtungsweise bezieht sich hier also auf eine einzelne Komponente einer Baugruppe.

Geht es um die systemischen Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz in den produzierenden Unternehmen des Fahrzeugbaus, sollten Ressourceneffizienzmaßnahmen – wie generell auch Kostenoptimierungsmaßnahmen – bereits frühzeitig definiert werden, am besten in der Konzeptentwicklung, spätestens aber in der Design- bzw. Konstruktionsphase.²⁴ Nachfolgend sind einige Beispiele für systemische Ressourceneffizienzmaßnahmen genannt.

²² Nachhaltig säubern mit gebündeltem Licht, in: Nachhaltige Produktion, Juni 2012, S. 52 – 54

²³ IR-Linsen kostengünstig produzieren, in: Photonik 5/2012 (August 2012), S. 16

²⁴ Carsten Röh: Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe, Fokus Automotive. Vortrag, 16.05.2013, https://www.muenchen.ihk.de/de/innovation/Anhaenge/02_roeh_materialeffizienz-fokus-automotive.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

2.1 TAILORED TEMPERING BEI STAHLBLECHEN

Die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs stellt für Automobilhersteller eine wichtige - nicht nur politisch vorgegebene - Aufgabe dar. Ein physikalisch wirksamer Ansatz dafür ist ein möglichst geringes Fahrzeuggewicht. Dem gegenüber stehen steigende Anforderungen an die Sicherheit, die mit mehr Material und somit mehr Gewicht erkauft werden. Ein Weg, diesen Konflikt zu entschärfen, besteht darin, die Blechdecken oder Werkstoffgüten der Rohkarosserie stellenweise zu variieren - aus einem solchen Tailored Blank entstehen durch Tiefziehen Bauteile, die, je nach Einbauort in die Karosserie, unterschiedlichen Ansprüchen an ihre Belastbarkeit genügen. Die lokal verschiedenen Steifigkeiten der Karosserie entscheiden darüber, ob bei einem Aufprall kinetische Energie gezielt absorbiert oder in die Fahrgastzelle eingeleitet wird. Außerhalb eines Unfallszenarios können hohe lokale Steifigkeiten gegenüber den Steifigkeiten der Motor- und Fahrwerkslager genutzt werden, um die Geräuschübertragung in den Innenraum zu vermindern.²⁵

Tailored Tempering stellt ein neues Verfahren zum Umformen von Stahlblechen dar und wurde von der Thyssen-Krupp Umformtechnik GmbH entwickelt. Es ermöglicht lokal unterschiedliche Festigkeiten in einem Blech aus nur einer Stahlsorte, meist Mangan-Bor-Stahl. Erreicht wird das durch eine gezielte Temperaturführung in den nur partiell erwärmten Presswerkzeugen. Im Resultat entsteht ein Bauteil mit genau definierten Festigkeits- und Dehnungseigenschaften. Anstelle mehrerer zusammengeschweißter Bauteile mit sprunghaften Eigenschaftsänderungen entsteht ein einzelnes, nahtloses Bauteil mit fließenden Eigenschaftsübergängen.²⁶

Das Tailored Tempering weist gegenüber den geschweißten Tailored Blanks den Vorteil auf, dass sich sowohl funktionsoptimierte Bauteile designen lassen als auch

²⁵ Peter Kohoutek (Hrsg.): Der neue Audi A4. Vieweg, Wiesbaden, 2008

²⁶ Werkstoffe & Technologien, Tailored Tempering, ThyssenKrupp, ohne Datum, http://incar.thyssenkrupp.com/7_05_021_Tailored_Tempering.html?lang=de (aufgerufen am 18.12.2013)

Gewichtseinsparungen im Vergleich zu konventionell kaltumgeformten Bauteilen realisierbar sind. Die ThyssenKrupp Umformtechnik GmbH fertigt beispielsweise eine B-Säule für einen deutschen Automobilhersteller, deren Festigkeit in ihren oberen zwei Dritteln Insassen beim Aufprall schützt, wohingegen das untere Drittel dehnbar genug ist, um Energie abzubauen. Im Vergleich zu einem herkömmlichen Referenzbauteil zeigt die Komponente etwa 17 Prozent weniger Gewicht und spart dadurch 13 Prozent CO₂-Emissionen im Fahrbetrieb.²⁷

Beim Tailored Tempering handelt es sich um ein komplexes Verfahren, daher werden die Prozesse am Computer simuliert. Die Simulationssoftware muss Warmumform- und Abschreckprozesse realistisch abbilden und die endgültigen

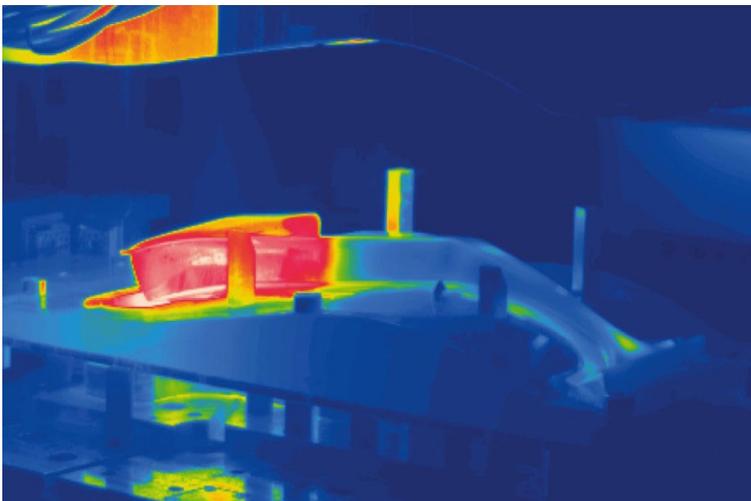


Abb. 3: Wärmebild-Aufnahme aus der Tailored-Tempering Produktion (Quelle: ThyssenKrupp AG)

Bauteileigenschaften zuverlässig vorhersagen. Seit 2012 befindet sich bei der Daimler AG eine Simulationssoftware im produktiven Einsatz und hilft, mit Tailored Tempering das Karosseriegewicht weiter zu senken.²⁸

²⁷ Durchbruch für Tailored Tempering, in: BLECH InForm, 4/2010, <http://www.bbr.de/file-server/henrich/files/2506.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

²⁸ Luca Meister: Schweizer Blech-Software optimiert Rohkarosserien. Maschinenmarkt.ch, 11.09.2013, http://www.maschinenmarkt.ch/konstruktion_cax/plm_cad_cam_fem_pps_erp/articles/417485/ (aufgerufen am 18.12.2013)

2.2 VEREINFACHTER LACKIERPROZESS

Im Lackierprozess soll der sogenannte Füller vor allem die Unebenheiten des Untergrundes ausgleichen und eine optimale Haftung für die nächste Lackschicht, den Basislack, sicherstellen. Volkswagen realisierte 2005 im Werk Puebla (Mexiko) erstmals eine füllerlose Lackierung sowie die Trockenabscheidung. Inzwischen bewährt sich der Verzicht auf Füller in vielen anderen Werken, etwa bei Mercedes Rastatt, BMW Oxford, PSA Poissy und Mazda in Japan.²⁹

Die Füllerfunktion wird in den Decklack integriert, dessen Schichtdicke dafür leicht erhöht wird. Da ein kompletter Prozessschritt entfällt, einschließlich der Trocknung und Abluftreinigung, wirkt sich dies positiv auf den Energieverbrauch, die Emissionen und den Wasserbedarf aus. Bei Volkswagen kommt in neuen Lackieranlagen nur noch Trockenabscheidung zum Einsatz, so dass die Luft innerhalb der Lackierkabine im Kreis geführt werden kann, was mit der konventionellen Technik der Nassauswaschung nicht möglich ist. Bis zu 80 Prozent der zugeführten Luftmenge in die Lackierkabine können durch die Trockenabscheidung im Kreis geführt werden. In der Summe sinkt durch die Umluftführung und den Wegfall des Füller-Prozessschrittes der Energieverbrauch um 20 Prozent. Hinzu kommt eine erhebliche Einsparung von Wasser, im Werk Taubaté (Brasilien) beispielsweise 30 Prozent.³⁰ Nebenbei reduziert der neue Prozess die Masse jedes Fahrzeugs um ein halbes Kilogramm. Das entspricht Einsparungen von 60 Kilogramm CO₂-Äquivalenten über den gesamten Lebenszyklus - von der Produktion über die Nutzung bis zur Verwertung - eines Fahrzeugs.³¹ Der füllerlose Lackierprozess bildet einen Teilaspekt des „Think Blue. Factory.“-Programms von Volkswagen, das in

Durch Umluftführung sinkt der Energieverbrauch um 20 Prozent.

²⁹ Immer mehr Autohersteller setzen auf füllerlose Lackierung. Journal für Oberflächentechnik online, 24.02.2010, <http://www.jot-oberflaeche.de/index.php?do=show/site=jot/alloc=110/id=11352> (aufgerufen am 18.12.2013)

³⁰ Volkswagen Aktiengesellschaft: Ressourceneffizienz. Engagement aus Verantwortung. Hrsg. Konzernforschung Umwelt Produkt (K-EFUP), September 2013, S. 22 f. http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/ressourceneffizienz/ressourceneffizienz/_jcr_content/renditions/rendition.file/vw-re_broa4_130926_de.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

³¹ Lackierprozess 2010. Volkswagen AG, 29.08.2011, <https://web.archive.org/web/20110829094910/http://www.volkswagen.de/de/Volkswagen/nachhaltigkeit/technologien/Produktion/Lackieren.html> (aufgerufen am 18.12.2013)

den ganzheitlichen „Think Blue.“-Ansatz zur ökologischen Nachhaltigkeit eingeordnet ist.³²

Das Umweltprogramm „Think Blue. Factory.“ hat zum Ziel die Umweltauswirkungen in der Produktion bis 2018 um 25 Prozent zu reduzieren. Anhand festgelegter Kennzahlen für Energie, Wasser, Abfall, CO₂- und Lösemittel-Emissionen soll diese Entwicklung genau nachverfolgt und an allen Standorten umgesetzt werden. Von zentraler Bedeutung sind dabei das Bündeln aller nachhaltigen Aktivitäten, das Nutzen des Wissens der Mitarbeiter vor Ort und der Austausch zwischen den Werken - von der Komponentenherstellung bis zur Fahrzeugfertigung.³³

2.3 UPCYCLING VON GUMMIRESTSTOFFEN

Drei Millionen Tonnen Altreifen fallen in Europa jährlich an. Im EU-Projekt TyGRE (High added value materials from waste Tyre Gasification Residues) wird seit 2011 erforscht, wie verhindert werden kann, dass diese lediglich auf Deponien gelagert, in Brennöfen der Zementindustrie verheizt oder zu Granulat und Gummimehl für den Einsatz in Straßenbelägen vermahlen werden. Verfahren zur Reifenverwertung sind Pyrolyse und Vergasung, beide Prozesse erzeugen einen Gasstrom, der zwar ebenfalls als Brennstoff, aber auch für chemische Reaktionen verwendet werden kann. Der Gesamtprozess erweist sich allerdings nur als wirtschaftlich, wenn das Nebenprodukt verwendet wird, ein kohlenstoffhaltiger Feststoff, der bisher als Füllstoff in Neureifen und als Aktivkohle getestet wurde.³⁴

Als Alternative wird an den Vergasungsprozess ein Schritt gekoppelt, in dem durch Plasmasynthese Siliziumkarbid produziert wird, das bei der Herstellung von Keramikmaterial

Neue Verfahren für ein Recycling von Gummireststoffen sind in Erprobung.

³² Nachhaltigkeitsbericht 2012. Volkswagen AG, April 2013, http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/publications/2013/04/Konzern_Nachhaltigkeitsbericht_2012.bin.html/binarystorageitem/file/VWAG_NHB_2012_d_online.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

³³ Nachhaltigkeitsbericht 2012. Volkswagen AG, April 2013, http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/publications/2013/07/Nachhaltigkeit_raft_Umweltbelastungen_runter.bin.html/binarystorageitem/file/tb_factory_broschuere_dt.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

³⁴ TyGRE – High added value materials from waste Tyre Gasification Residues. RWTH AVT, ohne Datum, <http://www.avt.rwth-aachen.de/AVT/index.php?id=876> (aufgerufen am 18.12.2013)

und in elektronischen Anwendungen seinen Einsatz findet. Am italienischen Institut für Neue Technologien, Energie und Umwelt (ENEA) entsteht derzeit ein Prototyp der Recyclinganlage, die anfangs 30 Kilogramm Altreifen pro Stunde verarbeiten soll.³⁵

Anstatt das Gummi aus Altreifen für den Einsatz in Straßenbelägen und Sportplatzböden zu vermahlen, kann Gummimehl nach einer Erfindung von Prof. Rainer Stich von der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig auch zu einem Abdichtungsprodukt für den Bau verarbeitet werden. Das erste wasserundurchlässige Abdichtungsprodukt auf Gummi- statt auf Bitumenbasis ist seit 2010 für die Verwendung als Bauwerksabdichtung von einer zertifizierten Prüfstelle durch ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis als Flüssigkunststoff zugelassen.³⁶

Bereits in der Produktion setzt die Firma Ruhr Compounds GmbH an, die Produktionsreste aus der Gummiverarbeitenden Industrie in Form von Elastomerpulvern in einem selbst entwickelten Verfahren zum Upcycling nutzt. Daraus wird der hochwertige Kunststoff EPMT (Elastomerpulver Modifizierte Thermoplaste) gewonnen.³⁷ Er spart Rohstoffkosten und ermöglicht es, aus recyceltem Gummi hochwertige Produkte wie Rad- und Spritzschutzkappen, Griffe oder Transportrollen herzustellen.³⁸ Dabei sind Härten von gummiartig-weich bis kunststoffartig-hart realisierbar. EPMT können auf marktüblichen Spritzguss- und Extrusionsanlagen verarbeitet werden und sind selbst rezyklierbar.³⁹

Durch Upcycling können hochwertige Kunststoffe gewonnen werden.

³⁵ Recycling Europe's three million tonnes of tyre waste. Phys.org, 14.06.2013, <http://phys.org/news/2013-06-recycling-europe-million-tonnes-tyre.html> (aufgerufen am 18.12.2013)

³⁶ Vom Autoreifen zum Abdichtungssystem, in: Einblicke. Forschungsmagazin 2013 der HTWK Leipzig, März 2013, S. 22, http://www.htwk-leipzig.de/fileadmin/prorektorw/downloads/EINBLICKE_2013_Forschungsmagazin_HTWK_Leipzig.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

³⁷ Verfahren zum Upcycling von Gummireststoffen. Chemie.de, 07.05.2013, <http://www.chemie.de/news/142978/verfahren-zum-upcycling-von-gummireststoffen.html> (aufgerufen am 18.12.2013)

³⁸ Fraunhofer Spinoff bei Gründungswettbewerb doppelt prämiert. Pressemitteilung, 10.10.2013, <http://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2012/ruhr-compounds.html> (abgerufen am 18.12.2013)

³⁹ Elastomerpulver Modifizierte Thermoplaste - EPMT. Ruhrcompounds, ohne Datum, http://ruhrcompounds.com/?page_id=5 (aufgerufen am 18.12.2013)

2.4 PRODUKTION VON AUTOMOBILKAROSSERIEN

In der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“ (InnoCaT)⁴⁰ haben mehr als 60 Partner in den Jahren 2010 bis 2013 in 30 Fachprojekten Konzepte für den Automobilbau der Zukunft erarbeitet. Im Fokus stand die Fertigung von Automobilkarosserien, einem Kernprozess der Automobilproduktion, deren Energie- und Materialverbrauch gesenkt werden sollte. Aus den fünf fachbezogenen Forschungsverbänden „Niedrigenergieproduktion“, „Presswerk“, „Ressourceneffizienter Werkzeugbau“, „Energie- und Ressourceneffizienter Karosseriebau“ sowie „Lackiererei“ ist als Gesamtergebnis das Modell einer Referenzfabrik entstanden. Die detaillierten Aussagen zu den Einsparungseffekten bei Ressourcen und Energie sind anhand der InnoCaT-Referenzfabrik mess- und belegbar. Diese Fabrik soll künftig als herstellerunabhängiger Benchmark für ein automobilbauendes Werk dienen.⁴¹ Von den fünf InnoCaT-Forschungsverbänden sollen aus zweien einige Teilprojektergebnisse aus dem Abschlussbericht näher betrachtet werden.

a) Performance Presswerk⁴²

Das Presswerk hat mit der Produktion von Umformteilen eine Schlüsselrolle innerhalb der Prozesskette zur Herstellung einer PKW-Karosserie inne. Hier muss der Einsatz der Ressource Blech optimiert werden, etwa durch Einsparungen in der Blechdicke, der Reduzierung der Ausfallmenge durch eine fortlaufende Prozessüberwachung und -regelung oder weniger Einsatzgewicht durch eine minimierte

⁴⁰ Bundesministerium für Bildung und Forschung; Meyer-Krahmer: „50 Prozent Energie-Einsparung ist möglich“. Pressemitteilung, 18.06.2009, http://www.bmbf.de/_media/press/pm_20090618-147.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

⁴¹ Volkswagen und Fraunhofer präsentieren Lösungen für die Produktion der Zukunft. Presseinformation Fraunhofer IWU, 05.07.2013, http://www.iwu.fraunhofer.de/de/presse_und_medien/presse_2013-05-07.html (aufgerufen am 18.12.2013)

⁴² Ergebnisse Innovationsallianz Green Carbody Technologies. Hrsg.: Reimund Neugebauer, Fraunhofer IWU, Februar 2013, S. 29 ff., <http://www.greencarbody.de/csdata/epaper/1/de/51307fd9b049b/epaper/ausgabe.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

Ankonstruktion. Bauteil- als auch Fertigungskonzepte kamen auf den Prüfstand. Die Substitution energieintensiver Fügevorgänge durch einen kombinierten Umform- und Fügevorgang in der Presse wurde ebenfalls untersucht.

In der komplexen Produktion kommen übergeordnete Aspekte zur Geltung, wie etwa die Steigerung der Prozessstabilität durch Prozessüberwachung und Prozessregelung. Fehler müssen vermieden, fehlerhafte Teile sicher erkannt und aussortiert werden, bevor sie unbeabsichtigt zur Montage weitergeleitet werden. Das Problem zeigt sich darin, dass in bestehenden Werken die lückenlose Überwachung der Fertigung nicht zu realisieren ist, weil Überwachungskonzepte fehlen, die dies im Takt der Produktion übernehmen.

Als Lösung bietet sich die 100-Prozent-In-Line-Überwachung der Produktion an, bei der der Bauteilzustand durch Ermittlung von Werkstoff-Kennwerten in den Werkzeugen oder durch optische Messtechnik überwacht wird. Da die Ergebnisse sofort vorliegen, können vor dem Umformvorgang bereits Abweichungen im Werkstoffverhalten erkannt werden, die ansonsten später Teilefehler bewirken würden. Die optische Messtechnik erkennt typische Umformfehler prozesssicher. Pro Referenzkarosse kann der Primärenergieeinsatz um 36,1 Kilowattstunden gesenkt werden. Darüber hinaus werden 3,8 Kilogramm weniger Stahlblech benötigt. Die Ausschussquote ist durch ein frühzeitiges und gesteuertes Eingreifen bei Schwankungen der Werkstoffparameter um etwa 50 Prozent reduziert.

Ein weiterer Ansatz bestand in der Reduzierung erforderlicher Ressourcen durch die Verfahrensintegration von Umform- und Fügeoperationen. Dazu mussten neue Fertigungsstrategien konzipiert werden, wobei eine Reserveradmulde als Strukturbauteil und eine Frontklappe als flächiges Bauteil Demonstrationsobjekte darstellten.

Bei der Frontklappe erfolgt die Umformung des Stütz- und Innenteils aus einer gemeinsamen Platine mit anschließendem Fügevorgang in der Pressenlinie. Bei der Reserveradmulde werden die beiden seitlichen Deckteile erst

nach dem Umformprozess in die Pressenlinie eingeschleust und dann gefügt. Das Teilehandling innerhalb der niedrigen Taktzeit war dabei maßgebend. Diese Prozessänderung spart pro Referenzkarosse 47,7 Kilowattstunden Energie und fünf Kilogramm Stahlblech.

b) Energie- und ressourceneffizienter Karosseriebau im Lebenszyklus⁴³

Im bereits heute hoch automatisierten Karosseriebau werden Karosserieeinzelteile zu Baugruppen gefügt und neben verschiedenen Füge-technologien auch eine Vielzahl unterschiedlicher Handlings-, Positionierungs- und Spanntechnologien realisiert. Sowohl bei der Planung von Karosseriebauanlagen als auch während ihres Betriebes war der Aspekt des Energieverbrauchs für Automobilhersteller weitgehend irrelevant. Im Vordergrund des Interesses standen geringe Taktzeiten und eine finanziell zu begrenzen- de Investition. Die Analyse im Teilprojekt hat erstmals den Ressourceneinsatz im Return of Invest quantifiziert.

Um diesen Return of Invest ausschöpfen zu können, sind Methoden zur energetischen Bilanzierung von Füge-technologien entwickelt worden, die bereits während der An- lagenplanung starten. Dabei war das konzeptionelle Problem zu erkennen, dass die thermischen Fügeverfahren für hoch- und höchstfeste Stähle sowie Materialmix mehr Energie als bei klassischen Stählen verbrauchen. Daher kommen kalte Füge-technologien in den Fokus; Schweißverfahren müs- sen also durch mechanische Verfahren ersetzt werden, die auf plastischer Umformung basieren. Insgesamt betrachtet besteht hier noch Entwicklungsbedarf, da bei hoch- und höchstfesten Stahlwerkstoffen die mechanischen Füge- verfahren bislang nur eingeschränkt einsetzbar sind, weil die Härte der Bleche größer als die der einzupressenden Niet- elemente ist.

In ersten Schritten wurde die Füge-technologie durch meh-

Es besteht noch Entwicklungsbedarf bei mechanischen Umformverfahren.

⁴³ Ergebnisse Innovationsallianz Green Carbody Technologies. Hrsg.: Reimund Neugebauer, Fraunhofer IWU, Februar 2013, S. 62 ff., <http://www.greencarbody.de/csdata/epaper/1/de/51307fd9b049b/epaper/ausgabe.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

rere Maßnahmen geändert: So wurden die Einstanzmuttern an den veränderten Setzprozess beim Hochgeschwindigkeitsfügen angepasst und der Hochgeschwindigkeitsantrieb weiterentwickelt. Die Stanzmuttergeometrie spielte eine Rolle, ebenso die geeignete Elementzuführung bis zum Antriebssystem auf Basis einer beschleunigten Zahnstange. In zwei bis drei Jahren könnten die ressourceneffizienten Technologien im Automobilbau serienreif sein. Die Übertragung der Erkenntnisse vom Verarbeiten von Stanzmuttern auf andere mechanische Fügeverfahren mit Schneidanteil wird angestrebt.

3 FAZIT

Die Steigerung der Ressourceneffizienz ist bei OEMs und Zulieferern Bestandteil des unternehmerischen Handelns. Das zeigt etwa die breit aufgestellte Innovationsallianz "Green Carbody Technologies", in die die beteiligten Unternehmen 30 Millionen Euro in Verbundprojekte mit Forschungsinstituten investierten. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützte diese Initiative mit 15 Millionen Euro. Allein aus Kosten- und Wettbewerbsgründen liegt Ressourceneffizienz im Fokus der Unternehmen. Allerdings gibt es viele Wege zum Ziel, sowohl Einzelmaßnahmen als auch systemische Ansätze.

Einzelmaßnahmen können durchaus erfolgreich sein, wenn sie geeignet koordiniert werden. Die Senkung des Frischwasserverbrauchs in der Automobilindustrie ist dafür ein gutes Beispiel.

Komplexe systemische Ansätze müssen bereits frühzeitig in der Konzeptionsphase von Produkt und Produktion starten, idealerweise mit einer Bestandsaufnahme. Das Potenzial verschiedener Maßnahmen kann durchaus überraschen: So bringt die in Kapitel 2 beschriebene technisch herausfordernde Umstellung auf kalte Fügeverfahren eine Elektroenergieerduzierung von 0,5 Kilowattstunden je Referenzkarosse. Die auf den ersten Blick eher nebensächliche Minimierung des Energieeinsatzes zur Kühlung von

Schaltanlagen in der Produktion bewirkt mit 6,3 Kilowattstunden die zwölffache Elektroenergieerzeugung je Referenzkarosserie. Das bedeutet, dass neben den systemischen Ansätzen auch einfache Maßnahmen im Produktionsprozess die Ressourceneffizienz positiv beeinflussen.

Das aufkeimende Konzept der Industrie 4.0 kann der Ressourceneffizienz in Zukunft dienlich sein, weil Maschinen, Werkstücke und Bauteile Informationen in Echtzeit austauschen werden. Das erhöht die Transparenz für den Gesamtprozess und bedingt eine Planung von Anfang an, um mit integrierter, intelligenter Software die Produktionsprozesse entlang der Wertschöpfungskette zu vernetzen. In den Planungsprozess lassen sich Ressourceneffizienzmaßnahmen und ihr Monitoring gut integrieren.

6. ANHANG

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1:** Pilotanlage zur energetischen Nutzung feinkörniger Produktionsreststoffe in Gerstungen (Quelle: Fraunhofer IFF)
- Abb. 2:** Die Blechteile einer solchen Frontsitz-Struktur werden ressourceneffizient umgeformt (Quelle: Auto-Medienportal.Net/Johnson Controls)
- Abb. 3:** Wärmebild-Aufnahme aus der Tailored-Tempering Produktion (Quelle: ThyssenKrupp AG), https://www.thyssenkrupp.com/de/presse/bilder.html&photo_id=1207

Fußnotenverzeichnis

- ¹ Jörg Woidasky, Thomas Hirth: Ressourceneffizienz von heute bis übermorgen, in: Chemie Ingenieur Technik 2012, 84, No. 7, 969 – 976; http://www.matressource.de/fileadmin/redakteure/pdf/2012_CIT-Hirth.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ² Aktiengesellschaft: Ressourceneffizienz. Engagement aus Verantwortung. Hrsg. Konzernforschung Umwelt Produkt (K-EFUP), September 2013, S. 10. http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/ressourceneffizienz/ressourceneffizienz/_jcr_content/renditions/rendition.file/vw-re_broa4_130926_de.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³ Jörg Woidasky, Thomas Hirth: Ressourceneffizienz von heute bis übermorgen, in: Chemie Ingenieur Technik 2012, 84, No. 7, 969 – 976; http://www.matressource.de/fileadmin/redakteure/pdf/2012_CIT-Hirth.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁴ Volkswagen Aktiengesellschaft: Ressourceneffizienz. Engagement aus Verantwortung. Hrsg. Konzernforschung Umwelt Produkt (K-EFUP), September 2013, S. 11. http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/ressourceneffizienz/ressourceneffizienz/_jcr_content/renditions/rendition.file/vw-re_broa4_130926_de.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁵ Reiner Erhardt, Nico Pastewski: Relevanz der Ressourceneffizienz im produzierenden Gewerbe. Fraunhofer Verlag (2010); http://www.iao.fraunhofer.de/lang-de/images/iao-news/studie_relevanz_ressourceneffizienz.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁶ Carsten Röh: Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe, Fokus Automotive. Vortrag, 16.5.2013, http://www.muenchen.ihk.de/de/innovation/Anhaenge/02_roeh_materialeffizienz-fokus-automotive.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁷ Carsten Röh: Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe, Fokus Automotive. Vortrag, 16.5.2013, http://www.muenchen.ihk.de/de/innovation/Anhaenge/02_roeh_materialeffizienz-fokus-automotive.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁸ Einfluss der Umwelt- und Klimapolitik auf die Energiekosten der Industrie – mit Fokus auf die EEG-Umlage. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, März 2011, S. 6, http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eeg_stromkosten_bf.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

- ⁹ Einfluss der Umwelt- und Klimapolitik auf die Energiekosten der Industrie – mit Fokus auf die EEG-Umlage. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, März 2011, S. 6, http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eeg_stromkosten_bf.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹⁰ European Commission – IP/12/1187: CARS 2020: für eine starke, wettbewerbsfähige und nachhaltige europäische Automobilindustrie. europa.eu Press Release, 08.11.2012, http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-1187_de.htm (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹¹ Hinrich Helms et al.: Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Juni 2013, S. 45, http://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/Flottenversuch%20Elektromobilitaet_Endbericht%20ifeu_final.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹² Mario Steinebach: Das Auto der Zukunft – energieeffizient produziert. Informationsdienst Wissenschaft, 20.01.2010, <http://idw-online.de/pages/de/news352095> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹³ Stefanie Michel: Referenzfabrik zur Produktion der Zukunft. Automobil-Industrie online, 09.07.2013, <http://www.automobil-industrie.vogel.de/produktion/articles/410678/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹⁴ Ford-Werke GmbH: Ford hat seinen weltweiten Wasserverbrauch seit dem Jahr 2000 um rund 62 Prozent gesenkt. Pressemitteilung, 11.04.2013, <http://www.presseportal.de/pm/6955/2448380/ford-hat-seinen-weltweiten-wasserverbrauch-seit-dem-jahr-2000-um-rund-62-prozent-gesenkt-bild> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹⁵ Volkswagen Aktiengesellschaft: Ressourceneffizienz. Engagement aus Verantwortung. Hrsg. Konzernforschung Umwelt Produkt (K-EFUP), September 2013, S. 29. http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/ressourceneffizienz/ressourceneffizienz/_jcr_content/renditions/rendition.file/vw-re_broa4_130926_de.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹⁶ Konzernweiter Umweltschutz. BMW AG, 2012, http://www.bmwgroup.com/bmwgroup_prod/d/0_0_www_bmwgroup_com/verantwortung/svr_2012/umweltschutz.html (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹⁷ European Automobile Manufacturers Association: Automobile Industry Pocket Guide 2013, S. 46. http://www.acea.be/images/uploads/files/POCKET_GUIDE_13.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹⁸ Heizen mit Abfällen aus Lack und Kunststoff. Forschung Kompakt, 01.03.2013, <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2013/Maerz/heizen-mit-abfaellen-aus-lack-und-kunststoff.html> (abgerufen am 18.12.2013)
- ¹⁹ Emden VW-Werk gewinnt Umwelt-Preis. Osfriesen-Zeitung online, 24.10.2013, <http://www.oz-online.de/-news/artikel/116913/Emden-VW-Werk-gewinnt-Umwelt-Preis> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²⁰ Christoph Roderig: Automobilzulieferer setzt auf sparsame Sprühbeölung. MaschinenMarkt online, 30.01.13, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanaele/produktion/umformtechnik/articles/392840/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²¹ Nachhaltig säubern mit gebündeltem Licht, in: Nachhaltige Produktion, Juni 2012, S. 52 – 54
- ²² N.N.: Nachhaltig säubern mit gebündeltem Licht, in: Nachhaltige Produktion, Juni 2012, S. 52 – 54
- ²³ IR-Linsen kostengünstig produzieren, in: Photonik 5/2012 (August 2012), S. 16
- ²⁴ Carsten Röh: Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe, Fokus Automotive. Vortrag, 16.05.2013, http://www.muenchen.ihk.de/de/innovation/Anhaenge/02_roeh_materialeffizienz-fokus-automotive.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²⁵ Peter Kohoutek (Hrsg.): Der neue Audi A4. Vieweg, Wiesbaden, 2008
- ²⁶ Werkstoffe & Technologien, Tailored Tempering. ThyssenKrupp, ohne Datum, http://incar.thyssenkrupp.com/7_05_021_Tailored_Tempering.html?lang=de (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²⁷ Durchbruch für Tailored Tempering, in: BLECH InForm, 4/2010, <http://www.bbr.de/files/server/henrich/files/2506.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

- ²⁸ Luca Meister: Schweizer Blech-Software optimiert Rohkarosserien. Maschinenmarkt.ch, 11.09.2013, http://www.maschinenmarkt.ch/konstruktion_cax/plm_cad_cam_fem_pps_erp/articles/417485/ (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²⁹ Immer mehr Autohersteller setzen auf füllerlose Lackierung. Journal für Oberflächen technik online, 24.02.2010, <http://www.jot-oberflaeche.de/index.php;do=show/site=jot/aloc=110/id=11352> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³⁰ Volkswagen Aktiengesellschaft: Ressourceneffizienz. Engagement aus Verantwortung. Hrsg. Konzernforschung Umwelt Produkt (K-EFUP), September 2013, S. 22 f. http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/ressourceneffizienz/ressourceneffizienz/_jcr_content/renditions/rendition.file/vw-re_broa4_130926_de.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³¹ Lackierprozess 2010. Volkswagen AG, 29.08.2011, <https://web.archive.org/web/20110829094910/http://www.volkswagen.de/de/Volkswagen/nachhaltigkeit/technologie/Produktion/Lackieren.html> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³² Nachhaltigkeitsbericht 2012. Volkswagen AG, April 2013, http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/publications/2013/04/Konzern_Nachhaltigkeitsbericht_2012.bin.html/binarystorageitem/file/VWAG_NHB_2012_d_online.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³³ http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/publications/2013/07/Nachhaltigkeit_raf_Umweltbelastungen_runter.bin.html/binarystorageitem/file/tb_fac_tory_broschuere_dt.pdf
- ³⁴ TyGRe – High added value materials from waste Tyre Gasification Residues. RWTH AVT, ohne Datum, <http://www.avt.rwth-aachen.de/AVT/index.php?id=876> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³⁵ Recycling Europe's three million tonnes of tyre waste. Phys.org, 14.06.2013, <http://phys.org/news/2013-06-recycling-europe-million-tonnes-tyre.html> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³⁶ Vom Autoreifen zum Abdichtungssystem, in: Einblicke. Forschungsmagazin 2013 der HTWK Leipzig, März 2013, S. 22, http://www.htwk-leipzig.de/fileadmin/prorektorw/downloads/EINBLICKE_2013_Forschungsmagazin_HTWK_Leipzig.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³⁷ Verfahren zum Upcycling von Gummireststoffen. Chemie.de, 07.05.2013, <http://www.chemie.de/news/142978/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³⁸ Fraunhofer Spin-off bei Gründungswettbewerb doppelt prämiert. Pressemitteilung, 10.10.2013, <http://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2012/ruhrcompounds.html> (abgerufen am 18.12.2013)
- ³⁹ Elastomerpulver Modifizierte Thermoplaste – EPMT. Ruhrcompounds, ohne Datum, http://ruhrcompounds.com/?page_id=5 (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁴⁰ Bundesministerium für Bildung und Forschung: Meyer-Krahmer: „50 Prozent Energie-Einsparung ist möglich“. Pressemitteilung, 18.06.2009, http://www.bmbf.de/_media/press/pm_20090618-147.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁴¹ Volkswagen und Fraunhofer präsentieren Lösungen für die Produktion der Zukunft. Presse information Fraunhofer IWU, 05.07.2013, http://www.iwu.fraunhofer.de/de/presse_und_m_dien/presse_2013-05-07.html (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁴² Ergebnisse Innovationsallianz Green Carbody Technologies. Hrsg.: Reimund Neugebauer, Fraunhofer IWU, Februar 2013, S. 29 ff., <http://www.greencarbody.de/csdata/epaper/1/de/51307fd9b049b/epaper/ausgabe.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁴³ Ergebnisse Innovationsallianz Green Carbody Technologies. Hrsg.: Reimund Neugebauer, Fraunhofer IWU, Februar 2013, S. 62 ff., <http://www.greencarbody.de/csdata/epaper/1/de/51307fd9b049b/epaper/ausgabe.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Johannisstr. 5-6
10117 Berlin
Tel. +49 30-27 59 506-0
Fax +49 30-27 59 506-30
info@vdi-zre.de
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE