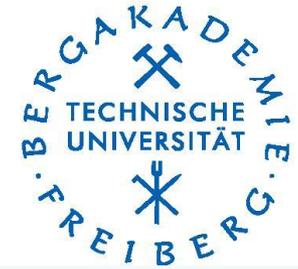




IMB-RM



Zukunftstechnologien

Trends in der Entwicklung technischer Gebrauchsgüter und Konsequenzen für das Recycling

Dr.-Ing. H.-G. Jäckel IMB/RM



Motivation:

- Charakterisierung spezieller Entwicklungstendenzen in den verschiedenen Technologiefeldern (insbes. Leichtbauverbunde d. Automobilität)
- Abschätzung der Konsequenzen für die Betreiber konventioneller Schrottaufbereitungsanlagen
- Überlegungen bezüglich der strategischen Ausrichtung der Schrottaufbereitung (langfristigen Orientierung auf neue FuE-Arbeitsfelder)
- FuE-Voraussetzungen zur Verbesserung der Zukunftsfähigkeit der Schrottaufbereitung (z.B. Materialbeschaffung/Sammlung/Logistik; Nachrüstung der Versuchstechnik/-anlagen; Rolle der Technika)

Beispiele für Entwicklungstrends:

→ im Fahrzeugbau

- Konventionelle Fahrzeuge (Leichtbauaspekte)
- Elektrofahrzeuge (E-Motoren/Generatoren; Ni-Mh-/Li-Ion-/Li-Polymer-Akkus)
- Brennstoffzellenfahrzeuge (Brennstoffzellen)

→ in der Informations-/Kommunikationstechnik

- Computer/Laptops/Tablets
- Phablets/Smartphones/Handys u.a.)
- Leistungselektronik im Fahrzeugbau

→ in der Energie-/Elektrotechnik

- Photovoltaik-Module (polykristallines Si; CDS-Dünnschichtmodule)
- Windkraftanlagen (WKA)
- Technische Gebrauchsgüter (netzunabhängig)

→ Sondertechniken (3D-Druck Metalle/Kunststoffe)

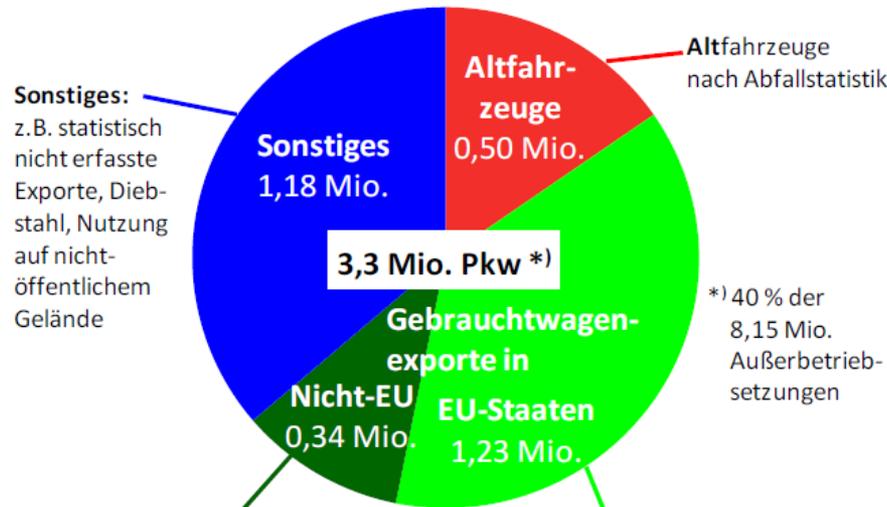
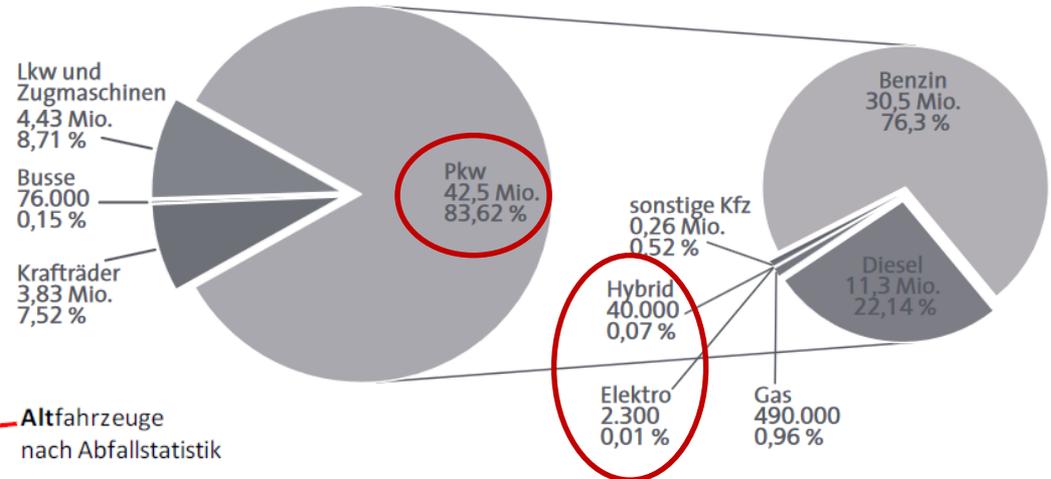
Trends im Fahrzeugbau – konventionelle Fahrzeuge

a) Fahrzeugbestand (D 2011)

([5] TAB-Arbeitsbericht 2012: Konzepte der E-Mobilität)

d.h.:

→ ca. 8 % des Bestandes werden jährlich stillgelegt !



Altfahrzeuge nach Abfallstatistik

*) 40 % der 8,15 Mio. Außerbetriebsetzungen

Gebrauchtwagen:

Export in Nicht-EU-Staaten nach Außenhandelsstatistik, u.a.

- Westafrika	134 000
- Ex-Sowjetunion (GUS)	94 000

Gebrauchtwagen: Export in EU-Staaten

a) Wiederanmeldungen in EU für 20 MS, u.a.

- Polen	488 000
- Rumänien	191 000
- Frankreich	92 000
- Tschechien	89 000

b) Außenhandelsstatistik für 7 MS

b) Verbleib stillgelegter Fahrzeuge (D 2013)

([2] UBA-Bericht: Altfahrzeugverwertungsquote in D 2013)

d.h.:

→ nur ca. 15 % der Jahresmenge stehen wirklich zum Recycling an !

Trends im Fahrzeugbau – konventionelle Fahrzeuge (Leichtbaukonzepte)

gleichzeitig:

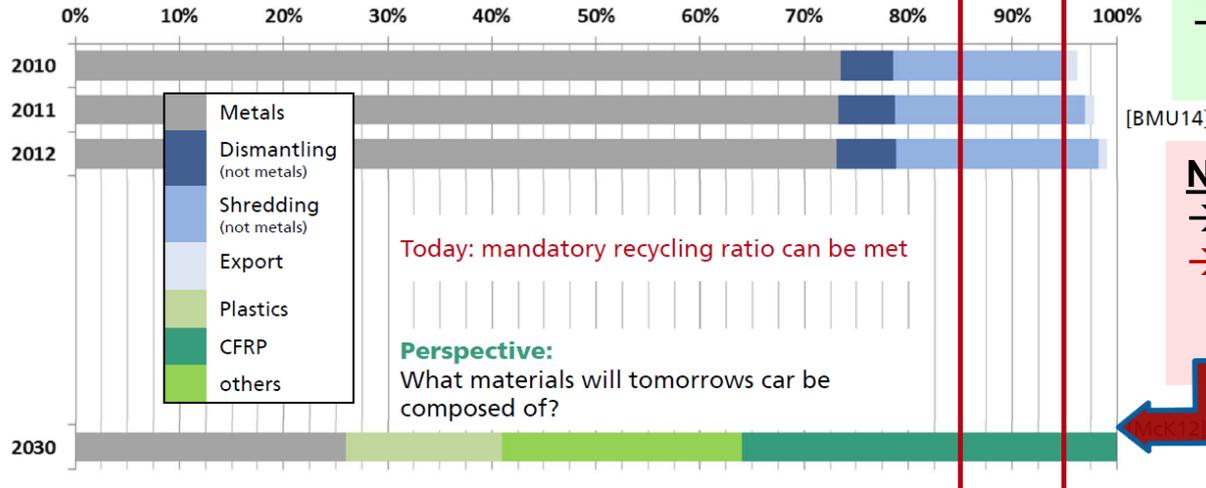
- d) **Reduzierung der Metallinhalte**
 (mit Substitution der schweren Metalle, St, Pb durch Leichtmetalle, Kst, Verbunde)

[2] VKE-Studie 2004 Altfahrzeugrecyclingpotentiale

Baujahr	1960-75	1976-80	1981-85	1986-90	1991-95	1996-20
Eisen/Stahl	78,0 %	78,0 %	73,0 %	67,5 %	62,4 %	57,5 %
NE-Metalle	2,4 %	2,4 %	4,3 %	6,1 %	8,0 %	10,0 %
Kunststoffe	2,3 %	2,3 %	3,6 %	4,9 %	6,2 %	7,5 %
Textilien/Verbund	2,9 %	2,9 %	4,0 %	5,1 %	6,2 %	7,3 %
Reifen/Gummi	3,7 %	3,7 %	3,8 %	3,8 %	3,9 %	3,9 %
Glas	2,4 %	2,4 %	3,1 %	3,8 %	4,5 %	5,2 %
Betriebsflüssigkeit	2,9 %	2,9 %	2,9 %	2,8 %	2,7 %	2,6 %
Sonstiges	5,4 %	5,4 %	5,3 %	6,0 %	6,1 %	6,0 %

Recycling of End-of-Life vehicles

Which materials of a discarded car can be recycled?



Vorteile:

→ ggf. Anstieg der Wert-
haltigkeit (PGM, SEE)

Nachteile:

→ deutlich weniger Stahlprodukt
 → VW-Quote nur durch stoffl.
 Verwertung der FV-Kst.
 realisierbar !!

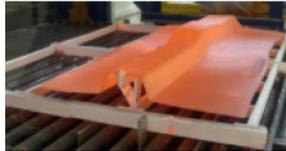
[6] Wölling Fh-ICT 2015: Design to Recycling - Challenges for tomorrow's recycling strategies

Trends im Fahrzeugbau – konventionelle Fahrzeuge (Leichtbaukonzepte)

e) Wettbewerb der Leichtbau- lösungen: **Al, Mg + Stahl**

- Stahl/NE-Verbunde (Tailored Blanks)
- Stahl/Kst-Verbunde
- Stahl/CFK bzw. NE/CFK-Verbunde
- geschäumte/St-faserverstärkte NE-Metalle
- faserverstärkte Keramiken

[4] Hoffmann/Thyssenblech; 2011: Stahlleichtbaulösungen im Fahrzeugbau

Höchstfeste Güten	Warmumformung	T ³ ® - Profilierungstechnik
<ul style="list-style-type: none"> ↻ Neue Werkstoffe für die Kaltumformung • Neue Stahlfamilie TPN[®] mit hoher Festigkeit und hohem Dehnungsvermögen 	<ul style="list-style-type: none"> ↻ 3-Säulen-Strategie: <ul style="list-style-type: none"> • Werkstoff: Neue Mangan-Bor-Stähle: MBW[®] 1900 • Oberfläche: Kathodischer Korrosionsschutz • Prozess: Tailored Tempering 	<ul style="list-style-type: none"> ↻ Umformen, Schweißen, Flansch abstellen, Lochen in einem Prozess • Hohes Leichtbaupotenzial bei attraktiven Kosten • Serienfähig 



1998

ULSAB

- Kostenneutrale Gewichtsreduktion von 25% durch Einsatz höher- und hochfester Stähle



2003

NSB[®] NewSteelBody

- Intelligente Kombination aus innovativer Profil- und Schalenbauweise
- 24% Gewichtsreduktion



2009

InCar[®]

- Innovatives Baukastensystem mit über 30 Lösungen für Karosserie, Fahrwerk und Antrieb



Aktuell

Future Steel Vehicle

- Zusammenarbeit der größten Stahlhersteller
- Extremer Stahlleichtbau für E-Fahrzeug

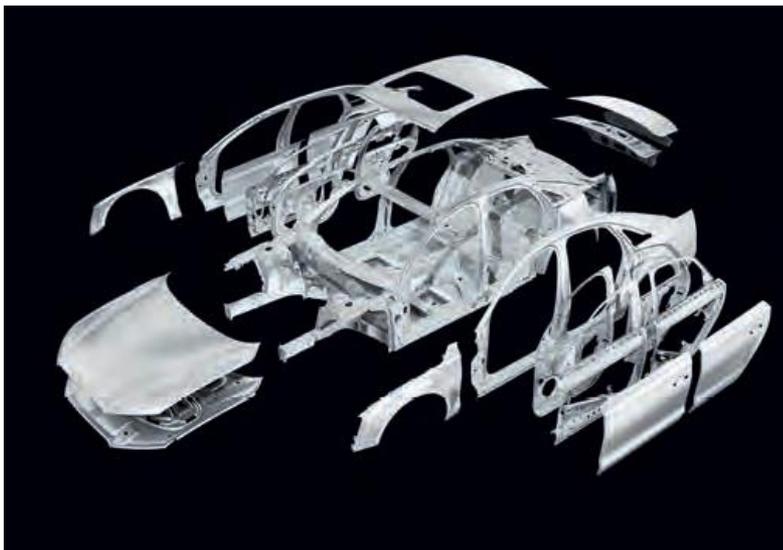
Nachteile:

- Zerkl.-Aufwand ↑
- Verschleiß bei Zerkleinerung ↑↑
- Sortieraufwand ↑

Vorteile:

- Erfassung höherwertigerer Stähle (wenn sortierbar !?)

Leichtbau-Fahrzeugkonzepte – Beispiele



AUDI A8 Aluminium Space-Frame Karosserie; ©AUDI AG

Audi A3

Karosseriematerialien
Materials in the body structure
04/12

- Ultrahochfeste Stähle (warmumgeformt)**
Ultra-high strength steels (hot-formed)
- Höchstfeste Stähle**
Higher strength steels
- Hochfeste Stähle**
High-strength steels
- Weiche Stähle**
Soft steels
- Aluminium-Blech**
Sheet aluminium
- Aluminium-Profil**
Aluminium section



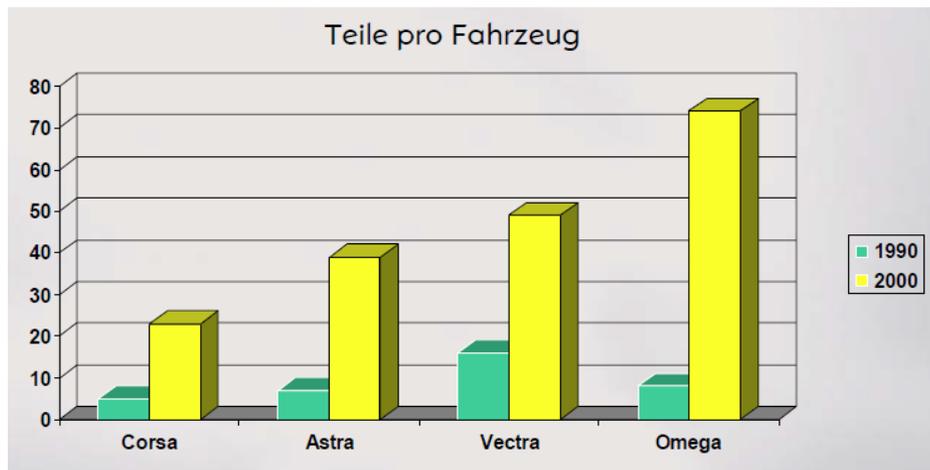
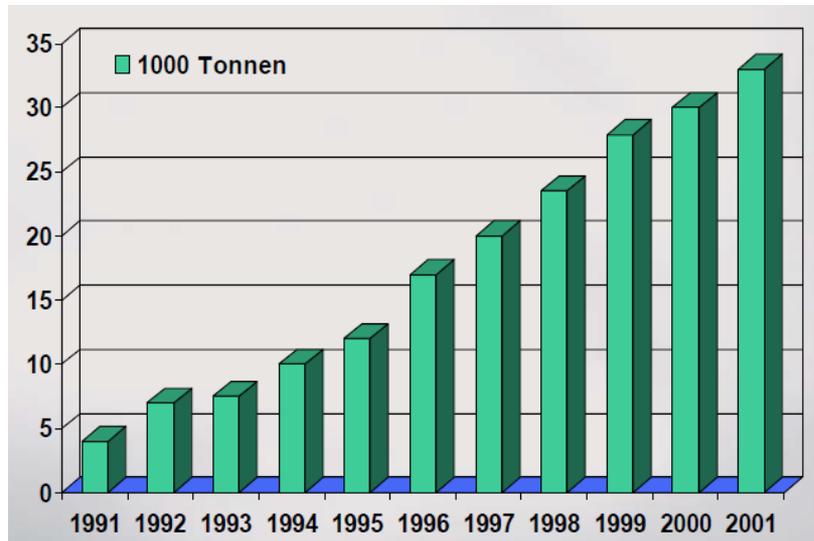
Aluminium-
Rohkarosserie
des
Mercedes-
Benz SL;
© Daimler AG



Porsche 911, Leichtbaukarosserie
mit intelligentem Werkstoffmix;
© Porsche AG

Trends im Fahrzeugbau – konventionelle Fahrzeuge

f) zunehmender Kst.-Recyclateinsatz in Fahrzeugen: Beispiel OPEL



Vorteile:

→ Verw.quote ↑; Kosten ↓

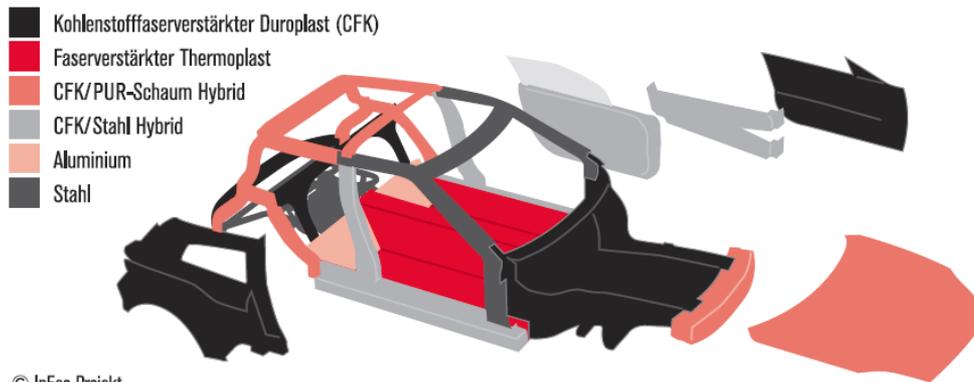
Nachteile:

- Qualität der Kst.-Produkte ↓
- Masseanteil stofflich verwertbarer Kunststoffe ↓ (durch Re-Recycling)
- Sortieraufwand ↑
- Schadstoff-Gehalte ↑ (CI, FH, WM)

Trends im Fahrzeugbau – konventionelle Fahrzeuge

g) zunehmender Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen:

Beispiel Thyssen/ILK Dresden



© InEco Projekt
ThyssenKrupp AG | TU Dresden - Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik | Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH

Nachteile CFK: CFK-EP; CFK-PP/PA

- Stoffliche Verwertung schwierig !!
(s. FOREL/RELEI u. ZIM-Projekt TUBAF/SiC-P)
- Verunreinigung **SSF** (→ EBS)
- Verunreinigung **SLF** (→ LG1/2/3 + < 2 mm → ggf. nicht mehr deponierbar !!)
- Sortieraufwand sehr hoch
- Qualität der Kst.-Produkte ↓
- Faserstaubbelastung/Kurzschlüsse

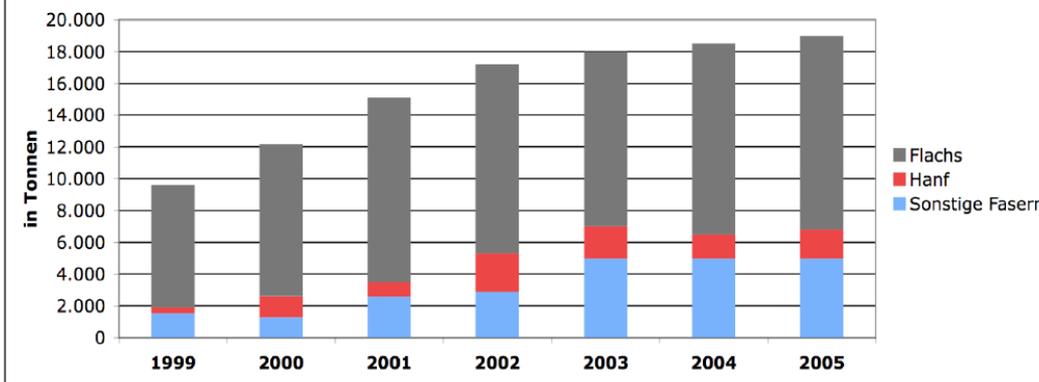
Vorteil: Massereduzierung

- Öko-Image ↑

Nachteile NFK:

- Masseanteil stofflich verwertbarer Kunststoffe ↓
- Rückgewinnung nicht möglich (Matrix thermoplastisch, Faservielfalt)
- NFK nur als EBS verwertbar (aber unproblematisch)
- Stoffliche Verwertungsquote ↓

Einsatz von Naturfasern* für Verbundwerkstoffe in der deutschen Automobilproduktion 1999 - 2005



Quelle: Karus et al. (2006)

*ohne Holz und Baumwolle

Trends im Fahrzeugbau – konventionelle Fahrzeuge (Leichtbaukonzepte)

h) Zunahme der Leistungselektronik:

- Bordcomputer
- Steuerung/Lenkung
- Bremssysteme
- Navigation (Fahrassistenzsysteme)
 - Laserscanner (für autonomes Fahren)
 - Radarsensoren (Parkassistent)
 - US-Sensoren (Abstandsmessung)
 - IR-Nachtsichtgeräte (Hindernis-Erkennung)
- Sicherheitssysteme (Airbags)

incl. Vernetzung der Systeme (Kabelstränge)

Tabelle 2: Strategisch wichtige Technologiemetalle in Gramm pro Kilogramm bestückter Leiterplatten aus Fahrzeugen

Au	Ag	Pt	Pd	Ru	Cu	Sb	Ge	Te	Ta
0,12	1,17	< 0,01	0,02	< 0,01	240	0,8	-	-	0,4

[7] Vortrag Schmid/Rohstoff- und Recyclingkonferenz Berlin:
Gehalte an Technologiemetallen in Kfz-Leiterplatten

Vorteile aus Recyclingsicht:

- Wertinhalt ↑ (mehr NE; PGM; SE-Metalle)
- mehr Cu-Kabel
- mehr Stellmotoren
- mehr Leistungselektronik
- z.T. durch Ausbau anreicherbar
- z.T. wiederverwendbar (Gebrauchteile)

Probleme:

- überwiegend komplizierte, fein-/ feinst-strukturierte Werkstoffverbunde
- Aufschluss schwierig (Feinzerkleinerung erforderlich – Aufwand ↑ ↑ ↑)
- Sortierung schwierig (ggf. Nassprozesse)
- ggf. Abgabe an Spezialaufbereiter erforderlich

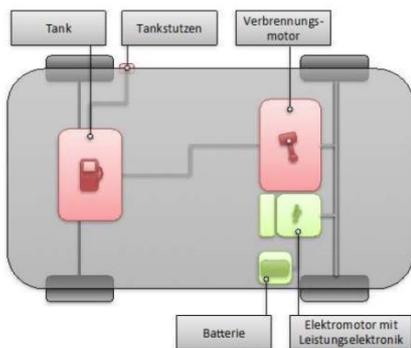
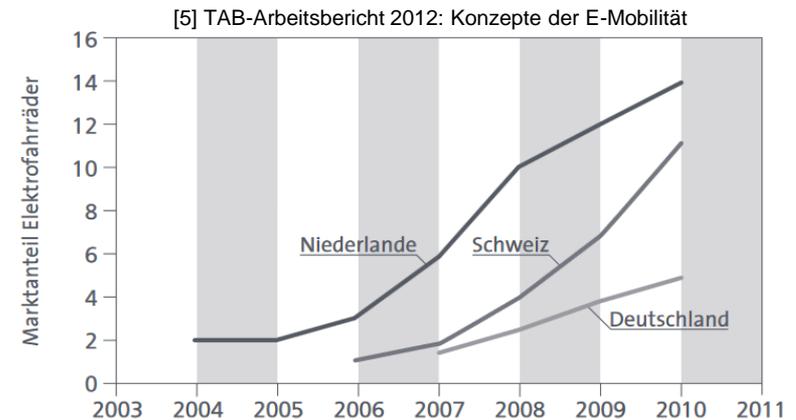
Trends im Fahrzeugbau – Hybrid-Fahrzeuge (Leichtbaukonzepte)

j) Änderung der Antriebskonfigurationen:

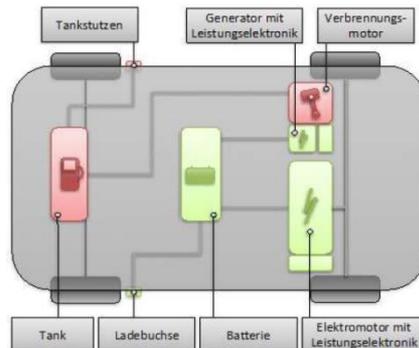
- zunehmend elektrische Hilfsaggregate (Pedelects, E-Motorroller, -räder)
- Hybride Fahrzeuge:
 - MHEV ... Mild-Hybrid-EV
 - FHEV ... Full-Hybrid-EV
 - PHEV ... PlugIn-Hybrid-EV
 - REEV ... Range-Extender-EV
- Voll-Elektromobile (BEV)
- Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)

ABB. II.8

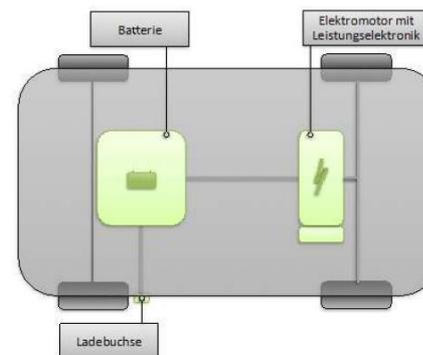
MARKTANTEILE ELEKTROFAHRRÄDER IM EUROPÄISCHEN VERGLEICH IN %



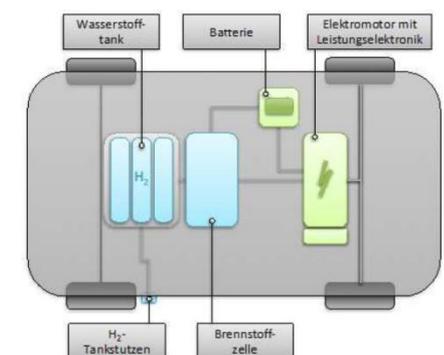
FHEV ... Full-Hybrid-EV



REEV ... Range-Extender-EV



BEV ... Batterie-EV



FCEV ... Fuel-Cell-EV

[8] Bericht öko-institut Darmstadt 2011: Umweltentlastung durch E-Fahrzeuge

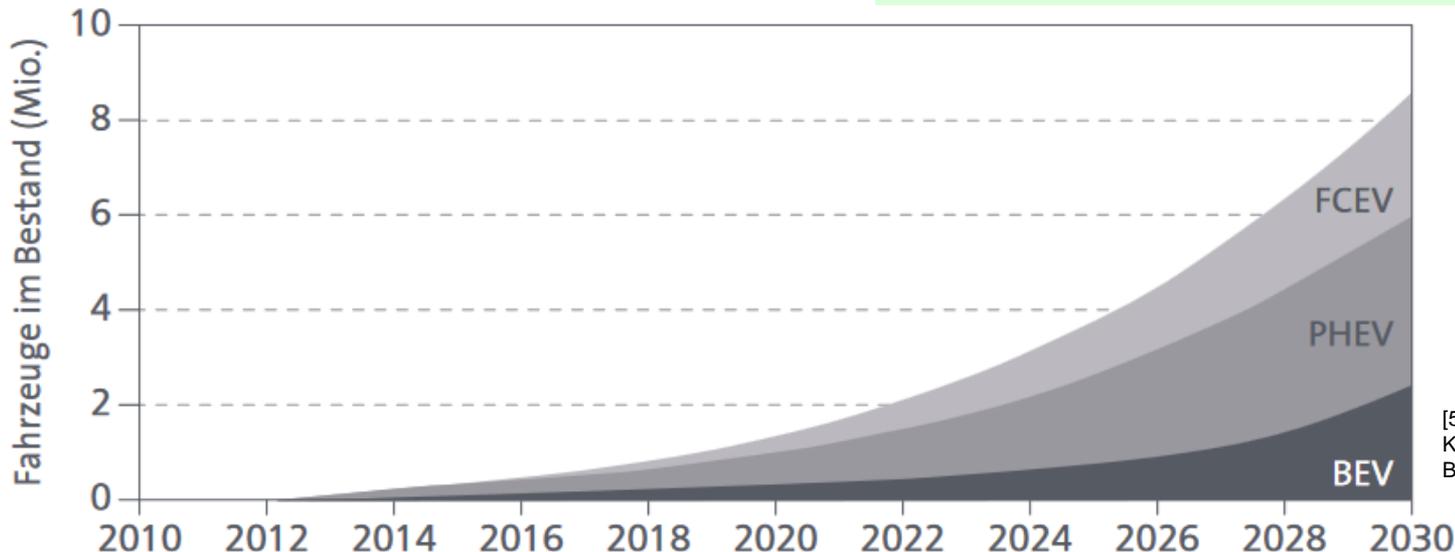
Trends im Fahrzeugbau – Hybrid-Fahrzeuge (Leichtbaukonzepte)

j) Änderung der Antriebskonfigurationen:

- zunehmend elektrische Hilfsaggregate (Pedelecs, E-Motorroller, -räder)
- Hybride Fahrzeuge:
 - MHEV ... Mild-Hybrid-EV
 - FHEV ... Full-Hybrid-EV
 - PHEV ... PlugIn-Hybrid-EV
 - REEV ... Range-Extender-EV
- Voll-Elektromobile (BEV)
- Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)

Tendenzen:

- bis ca. 2030 keine deutliche Trendwende im Altfahrzeugschrott zu erwarten (verschiedene Szenarien)
- schrittweiser Anstieg des Bestandes auf ca. 16/18 Mio Einheiten (ca. 30 % des Bestandes)
- Zunahme der Schrottfahrzeuge mit neuem Antriebssystemen ca. 10 – 15 Jahre später
- Reaktionszeit auf Veränderungen lang



[5] TAB-Arbeitsbericht 2012: Konzepte der E-Mobilität – Bestandsentwicklung

Trends im Fahrzeugbau – Elektrofahrzeuge (Leichtbaukonzepte)

a) Beispiele:



smart forvision; © Daimler AG



*Multifunktionale
Kunststoff-
Leichtbau-
Komfortsitze im
smart forvision;
© Daimler AG*



*BMW i3 + i8
Concept,
Elektrofahr-
zeuge mit CFK-
Karosserien*

© BMW AG



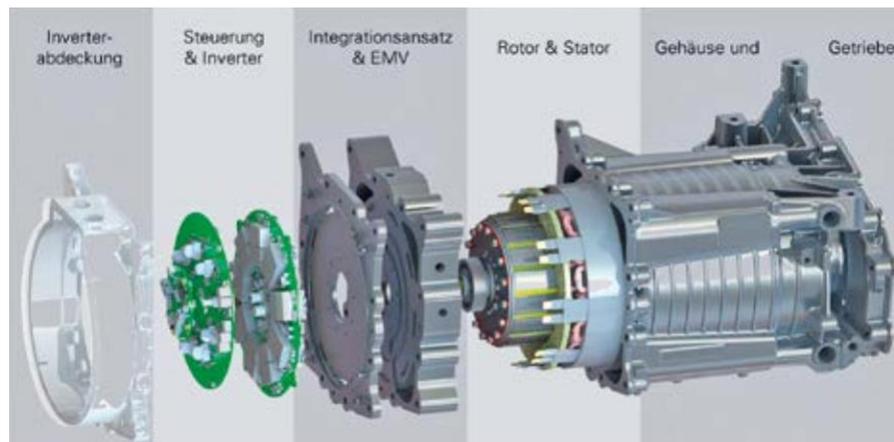
Trends im Fahrzeugbau – Elektrofahrzeuge

b) Spezielle Antriebskonfigurationen:

- E-Motor-/Generatorschaltungen zur Bremsenergie-rückgewinnung
- Motorgehäuse: Al/Mg-Guss
- Getriebe: hochlegierte Spezialstähle
- Rotor/Stator: hohe Cu-Inhalte (große Querschnitte)
- Rotor: hohe SE-Gehalte (FeNd-Magnete)



a) Rotor Traktions-E-Motor;
b) FeNd-Magnete [aus 4]



Grundlage für die Neuentwicklungen im Projekt 3Ccar ist der hochintegrierte 9-Phasen-Elektromotor aus dem Projekt MotorBrain.

[9] Bast, Blank, Buchert u.a.: Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben; Abschlussbericht zum Verbundvorhaben MORE (Motor Recycling)

Trends im Fahrzeugbau - Elektrofahrzeuge

c) Li-Traktions-Akkumulatoren:

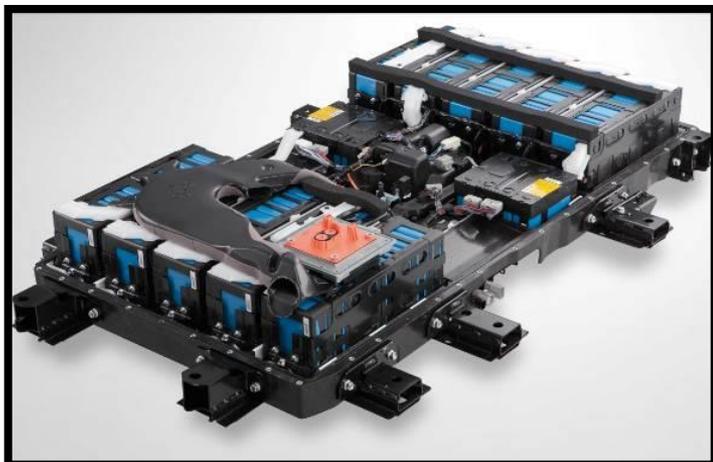
96 Einzelzellen (Typ SE03)



8 Module a' 12 EZ



Li-Akkublock BMW (ca. 250 kg)



Li-Akkublock Mitsubishi/Peugeot (ca. 230 kg)



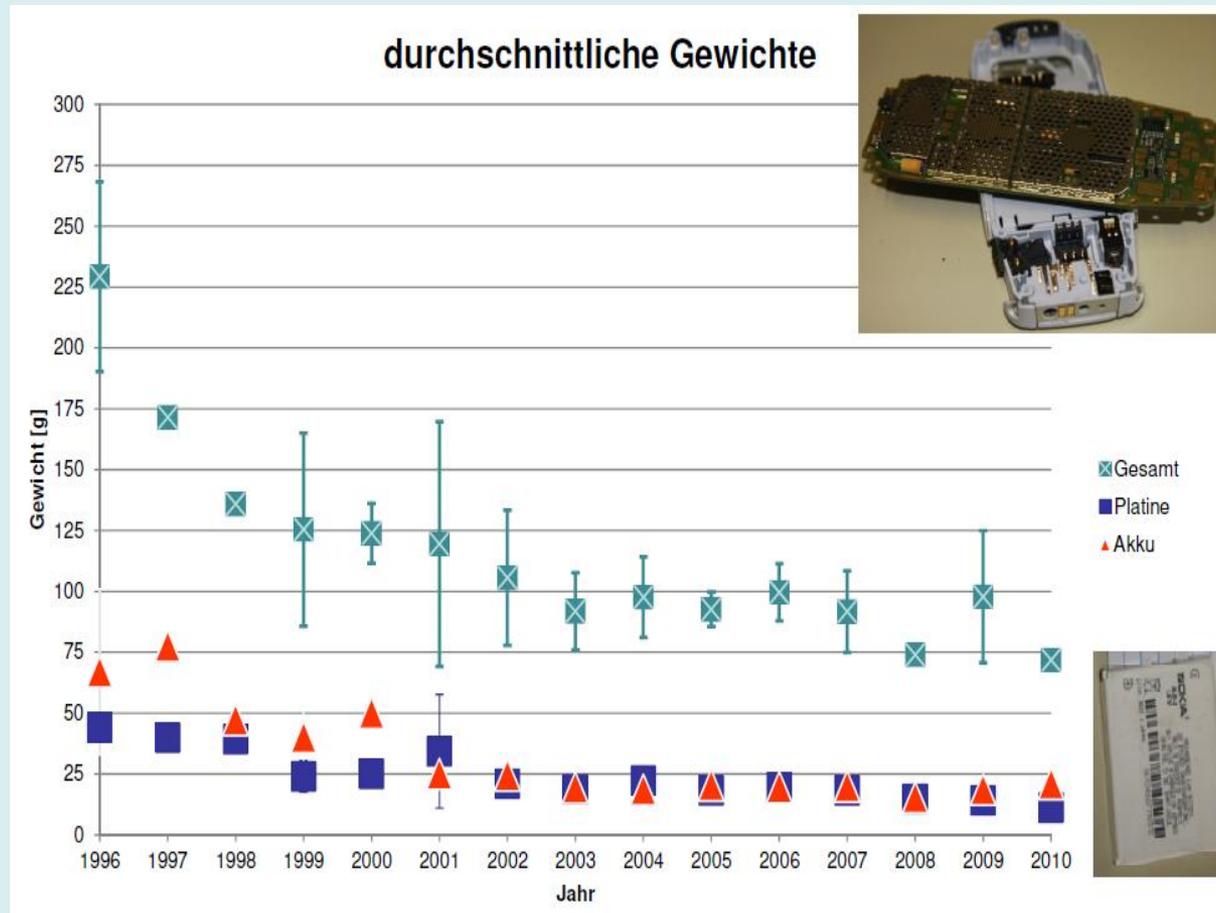
22 Module a' 4 EZ

88 Einzelzellen



Trends in der Informations-/Kommunikationstechnik - Smartphones/Handys

Entwicklung der Handy-Massen 1996 - 2010



Probleme:

- Massenanteil in E-Schrott ↓
- Weniger Metalle, mehr Glas + Kst
- Werthaltigkeit ↓
- Fein-/ Feinststrukturierung ↑
- Verbundaufschluss, Sortierung schwierig
- Erfassung schwierig (Hortungseffekte)
- ggf. Abgabe an Spezialaufbereiter erforderlich

Vorteile:

- Menge ↑; Masse ↓
- ggf. goldhaltig ??

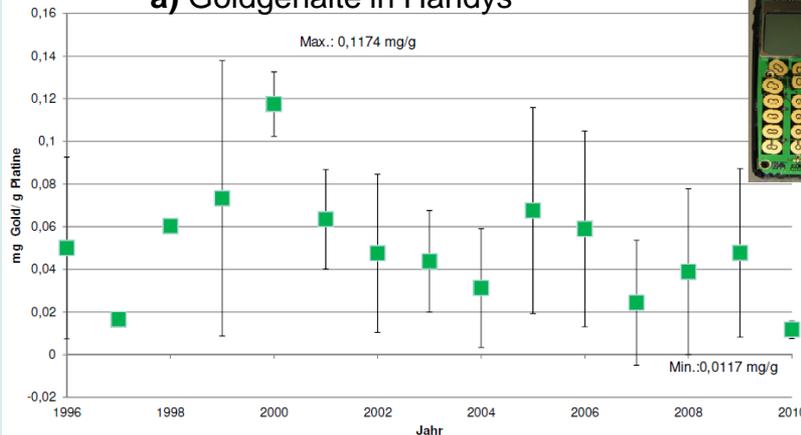
Trends in der Informations-/Kommunikationstechnik - Computer/Laptops/Tablets

Metallgehalt in Mobiltelefonen

Element	Masse (kg/t)	Element	Masse (kg/t)
Silber	3,5	Eisen	70
Kupfer	130	Blei	6
Palladium	0,144	Gold	0,344
Zink	11	Zinn	10
Nickel	14		

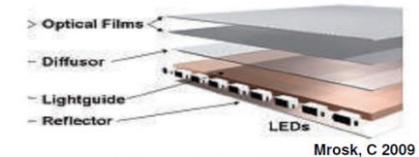
Quelle: C. Hagelüken 2008

a) Goldgehalte in Handys

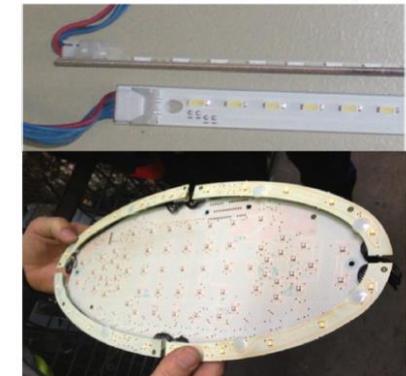


b) SE-Metalle in LED's

	LED-3 (geglüht)	
	mg/kg	µg/LED
Gadolinium	1,72	0,0344
Indium	51,3	1,026
Cer	92,2	1,844
Europium	67,5	1,35
Praseodym	<2	<0,04
Terbium	43,7	0,874
Gallium	117	2,34



Mrosk, C 2009



Kessel, K., Hobohm, J. Qualitatives und quantitatives Sekundärrohstoffpotential von Seltenen Erden in LCD-Fernsehern. Diplomarbeit an der TUHH 2012.

Probleme:

- starke Schwankungen im Au-Gehalt (↓)
- belastbare Angaben für Smartphone/Tablets fehlen (separate Sammlung schwierig !)

Vorteile:

- goldhaltig; SEE-haltig

[13] Kuchta TUHH: E-Schrottreycling – eine Zukunftsvision

Zusammenfassung - Allgemein

a) deutlich größere Vielfalt an **Konstruktionswerkstoffen**

- Metalle, Metalllegierungen (z.B. TRIP-Stähle, höherfeste Stähle)
- Kunststoffe, Blends, Faserverstärkungen (verstärkt auch Recyclate !!)
- Leichtbauverbunde (St/NE; St/Kst; NE/Kst; St/NE/CFK u.a.)

sowie **Funktionswerkstoffen**

- metallischen Beschichtungen (auf Kst: Ni/Cu/Cr; auf NE: PGM u.a.)
- Mischmetallschichten (z.B. Li-Akku-Elektroden)
- SE-haltige Baugruppen, Bauelemente (z.B. stark: FeNd-Magnete; schwach: LCD/TFT-Displays)

sowie miniaturisierten **Werkstoffverbunden/ -verbindungen** (Leiterplatten u.a.)

b) Zunahme **stark schadstoffhaltiger** (LCD-Displays) bzw. **umweltgefährdender** Baugruppen (z.B. Brandgefahr durch Li-Akkus)

c) **Recyclinggerechte Konstruktion/Fertigung** → **Illusionär !!**

Nachteile aus Recyclingsicht:

- Steigende Bedeutung der Vorbehandlung/-entfrachtung
- erhöhter Aufwand für Vorsortierung/Verbundaufschluss
- Produktqualitäten ↓ (ggf. mehr Mischprodukte)
- Analysenaufwand ↑ ↑ ↑ (PGM, SEE, Schadstoffe)

Vorteile:

- ggf. Anstieg der Werthaltigkeit durch zusätzliche Funktionswerkstoffe (PGM, SEE)

Zusammenfassung - Schlussfolgerungen für FuE an der TU BAF

Nr.	Tendenzen	Schwerpunkt	Erfahrungen/Konsequenzen für FuE
1	Fahrzeugbau (Autohersteller/Zulieferer)	<p>kurzfristig</p> <p>mittelfristig</p> <p>langfristig</p>	<p>→ <u>konventionelle Fahrzeuge</u> (insbes. Auswirkung der Leichtbaulösungen auf aktuelle konventionelle Aufbereitung – s. Aktivitäten IMB-RM)</p> <p>→ <u>Elektrofahrzeuge</u> (nennenswerter Anfall in 15-20 Jahren; Vorlaufforschung läuft aktuell an – s. MVT/IAM/IMB-RM)</p> <p>→ <u>Brennstoffzellenfahrzeuge</u> (aktuell keine Aktivitäten an TUBAF – Partner ??)</p>
2	Informations-/ Komm.-Technik	<p>kurzfristig</p> <p>mittelfristig</p>	<p>→ E+E-Schrotte (insbes. Li-Akkus + Schadstoffe in EAG - s. Aktivitäten IMB-RM/MVT – Diss. Gießner)</p> <p>→ Leistungselektronik im Fahrzeugbau (aktuell keine Aktivitäten an TUBAF – Partner ??)</p>
3	in der Energie-/ Elektrotechnik		<p>→ Photovoltaik-Module (s. Aktivitäten IMB-RM/MVT)</p> <p>→ Windkraftanlagen (s. Aktivitäten IMB-RM/MUEG)</p> <p>→ Technische Gebrauchsgüter (s. Aktivitäten IMB-RM/SCHOLZ Recycling Espenhain)</p>
4	Sondertechniken	kurzfristig	<p>→ 3D-Druck Metalle (s. AiF-Antrag MVT/IMB-RM)</p> <p>→ 3D-Druck Kunststoffe (aktuell keine Aktivitäten an TU – Partner ??)</p>

Zusammenfassung - Schlussfolgerungen für FuE an der TU BAF

aktueller Status TU BAF:
(z.B. als Partner für die Automobilbranche)

→ **Zukünftig: gigantisches FuE-Potential allein im Recycling**

(mechanische Aufbereitung) moderner Werkstoffverbunde

→ **Know-How aktuell z.T. noch vorhanden** (aber zu grundlagenlastig)

→ Insbes. **Schwächen** hinsichtlich der wirtschaftlichen **Umsetzbarkeit** entwickelter Recycling-Konzepte (Nachweis der Wirtschaftlichkeit)

→ **Modernisierung der Technika erforderlich** (insbesondere Nachrüstung automatisierter Online-Detektions- bzw. Sortiertechniken)

Zusammenfassung - Schlussfolgerungen für FuE an der TU BAF

aktueller Status TU BAF:
(z.B. als Partner für die Automobilbranche)

- **Zukünftig: gigantisches FuE-Potential allein im Recycling**
(mechanische Aufbereitung) moderner Werkstoffverbunde
- **Know-How aktuell z.T. noch vorhanden** (aber zu grundlagenlastig)
- Insbes. Schwächen hinsichtlich der wirtschaftlichen **Umsetzbarkeit** entwickelter Recycling-Konzepte (Nachweis der Wirtschaftlichkeit)
- **Modernisierung der Technika erforderlich** (insbesondere Nachrüstung automatisierter Online-Detektions- bzw. Sortiertechniken)

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit !!