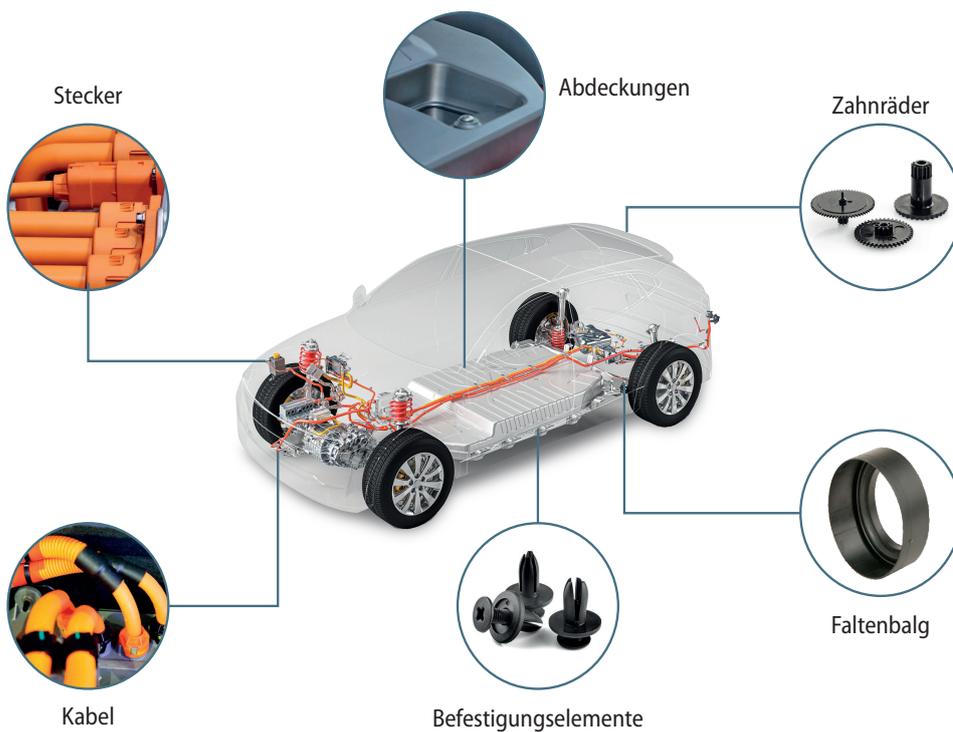


Hochleistungskunststoffe durch strahlenvernetzte günstigere Polymere ersetzen

# Elektronenbooster für Elektrofahrzeuge

Die Bedingungen in Elektrofahrzeugen stellen hohe Anforderungen an die eingesetzten Materialien. Automobilhersteller und Zulieferer müssen daher für Bauteile zu teuren Hochleistungskunststoffen greifen. Eine kostengünstige Alternative für viele Anwendungen sind Kunststoffe, deren Eigenschaften durch die Behandlung mit hochenergetischen Elektronenstrahlen stark verbessert wurden.



**Bild 1.** Strahlenvernetzte technische Kunststoffe können an vielen verschiedenen Stellen in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen.

© iStock; Phantom1311, Sven Loeffler, BanksPhotos, Zorazhuang, Songsak Paname, Supersmario

Der Anteil von Kunststoff am Automobilgesamtgewicht nahm zwischen 1970 und 2010 kontinuierlich zu: Rund 6 % im Jahr 1970 standen etwa 16 % 2010 gegenüber. Im gleichen Zeitraum stieg das mittlere Leergewicht von Pkw von 1100 auf 1400 kg [1]. Beide Entwicklungen sind hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die Automobile immer sicherer und komfortabler wurden. Üblich wurden beispielsweise polymere Schaumstoffe in den Zwischenräumen der Karosserie, um die Unfallfolgen beim Überschlagen oder bei seitlichem

Aufprall zu verringern [2]. Die Einführung von elektronischen Sicherheitssystemen, aber auch die weitere Verbreitung von Klimaanlage und Infotainment-Systemen führte zur vermehrten Nutzung von gedruckten Leiterplatten mit hohem Kunststoffanteil [3]. Zudem kamen Kunststoffe verstärkt zum Einsatz als Kunstleder und Dekorfolien, die dem Fahrzeug einen hochwertigen Charakter verleihen.

Inzwischen ist die Automobilindustrie im Umbruch: Vor allem aufgrund strengerer Emissionsgrenzwerte sowie staatli-

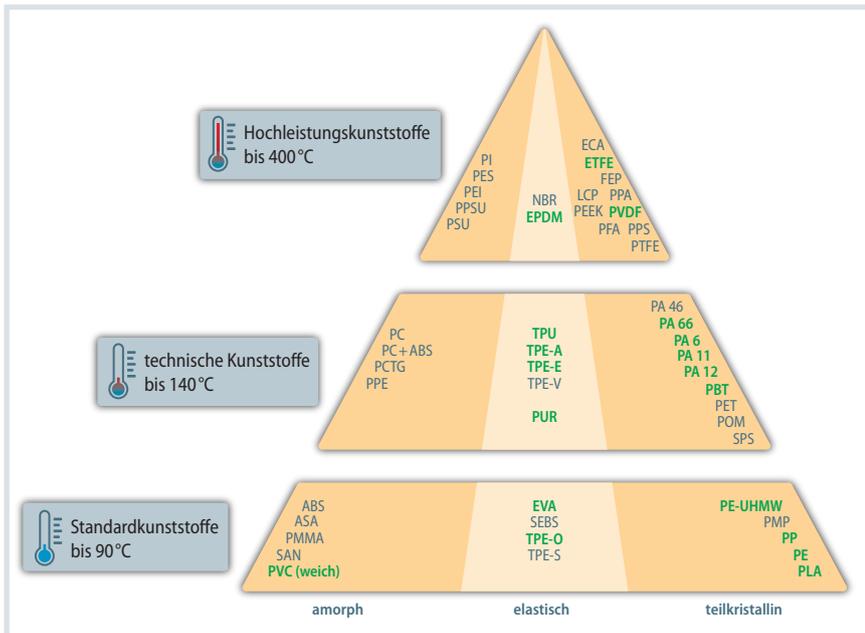
cher Förderung steigen die Verkaufszahlen von Elektroautos. Das Manko von vollelektrischen Fahrzeugen bleibt dabei trotz Fortschritten die begrenzte Strecke, die ohne Aufladen zurückgelegt werden kann. Einer der Lösungsansätze dafür besteht darin, Metalle im Fahrzeugaußenbereich vermehrt durch leichtere Kunststoffmaterialien zu ersetzen. Denn ein geringeres Gewicht hilft, Energie zu sparen und somit die Reichweite der E-Autos zu erhöhen.

Analysten zufolge bestehen neben dem Leichtbau noch weitere Vorteile des vermehrten Kunststoffeinsatzes: Dieser ermögliche es den Automobilherstellern, Produktionskosten zu senken, modulare Montageverfahren voranzutreiben und die aerodynamischen Eigenschaften der Karosserie zu verbessern [4].

## Besondere Herausforderungen in Elektrofahrzeugen

War in der Vergangenheit vor allem der Fahrzeuginnenraum die Domäne der Kunststoffe, rücken nun Anwendungen nahe am Antriebsstrang, der Batterie und an der Karosserie in den Fokus (**Bild 1**). An diesen Stellen sind jedoch die Temperaturen und die mechanischen Belastungen häufig deutlich höher. Daher müssen die Materialien neue Anforderungen erfüllen:

- Sie müssen in manchen Anwendungen Temperaturen von über 150 °C widerstehen.
- Da Strom im Elektroauto eine besonders wichtige Rolle spielt, müssen die Materialien elektrisch gut isolieren.
- Die Kunststoffe sollten die genannten Eigenschaften über die gesamte Lebensdauer von Elektroautos behal-



**Bild 2.** Strahlenvernetzen lassen sich sowohl Standardpolymere, als auch technische Kunststoffe und Hochleistungspolymere. Behandelt werden können mit dem Verfahren die in grün hervorgehobenen Polymere. Quelle: BGS; Grafik: © Hanser

(PA) und Polybutylenterephthalat (PBT) [5]. Die Materialkosten sind gegenüber Hochleistungskunststoffen um den Faktor 2 bis 10 niedriger. Die Verarbeitungstemperatur im Spritzgießprozess von beispielsweise strahlenvernetzbares PA ist mindestens 100 °C geringer als die von Hochleistungskunststoffen. Die Werkzeugtemperatur liegt zwischen 60 und 100 °C.

Die Strahlenvernetzung erfolgt stets nach der Formgebung. Das Spritzgießen, Extrudieren oder Blasformen nimmt der Hersteller wie üblich vor. Es entstehen demnach keine Kosten für die Anschaffung neuer Maschinen oder Werkzeuge. Der Hersteller des Kunststoffbauteils kann den Produktionsprozess wie gewohnt und mit der optimalen Geschwindigkeit durchführen. Insgesamt sind also nicht nur die Materialkosten, sondern auch die Prozesskosten für Bauteile aus strahlenvernetzten technischen Kunststoffen geringer als die für Bauteile aus Hochleistungskunststoffen.

### Das Prinzip hinter dem Verfahren

Die Strahlenbehandlung hebt das Eigenschaftsprofil von geeigneten technischen Kunststoffen auf ein höheres Niveau. Sie sind dadurch unter Bedingungen einsetzbar, denen sie ansonsten nicht standhalten würden (Bild 3). Diese Wirkung erzielt energiereiche Strahlung, zum Beispiel Gamma- oder Beta-Strahlen, indem sie zunächst chemische Bindungen in den polymeren Molekülen homolytisch spaltet. Somit entstehen instabile Bruchstücke mit einem einsamen Elektron, sogenannte freie Radikale. Indem benachbarte freie Radikale miteinander reagieren, bilden sich Querverbindungen (kovalente Bindungen): Es entsteht ein dreidimensionales, sehr stabiles Netzwerk.

Allerdings eignen sich nicht alle Kunststoffe zur Strahlenvernetzung, da eine entsprechende Reaktivität vorhanden sein muss. Nicht geeignet sind etwa Polycarbonat (PC) und Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS). Viele der technischen Kunststoffe (Bild 2), die für den Einsatz in Elektrofahrzeugen infrage kommen, benötigen Vernetzungshilfsmittel: Zu diesen Polymeren zählen PA 6, PA 11, PA 12, PA 66, PBT und thermoplastische Elastomere auf Urethanbasis (TPE-U). Diese Materialien sind auf

mechanische Kennwerte	nicht bestrahlt	bestrahlt mit 33 kGy	bestrahlt mit 3 · 33 kGy
Gelanteil [%]	0	51,6	62,3
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	2800/625	3125/765	3340/890
Streckspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	89/31	96/43	98/45
Bruchdehnung [%]	22/> 100	15/93	13/81

**Tabelle 1.** Vergleich der mechanischen Kennwerte von nicht bestrahltem und bestrahltem PA 66 (bei Raumtemperatur / 120 °C) Quelle: LKT Erlangen

ten, also langzeitstabil und alterungsbeständig sein.

- Sie müssen hohe mechanische Festigkeit und Zähigkeit aufweisen. Das bedeutet auch, dass unter anderem bei Faserverbundkunststoffen (FVK) die polymere Matrix besonders gut an den Fasern haften muss.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, greifen die Automobil- und Bauteilhersteller deshalb immer wieder auf Hochleistungskunststoffe wie Polysulfone (PSU, PES, PPSU), Polyphenylensulfid (PPS) und Polyetheretherketon (PEEK) zurück (Bild 2). Sie haben jedoch einen gravierenden Nachteil: Sie sind teuer [5]. Außerdem ist ihre Verarbeitung kosten-

und energieintensiver als die von technischen Kunststoffen. Das liegt vor allem daran, dass die Verarbeitung üblicherweise bei hohen Temperaturen erfolgen muss: Nötig ist eine Spritztemperatur zwischen 300 und 400 °C und eine Werkzeugtemperatur zwischen 125 und 210 °C. Außerdem sind spezielle Spritzgießmaschinen und Werkzeuge erforderlich.

### Kostengünstige Alternative durch Strahlenvernetzung

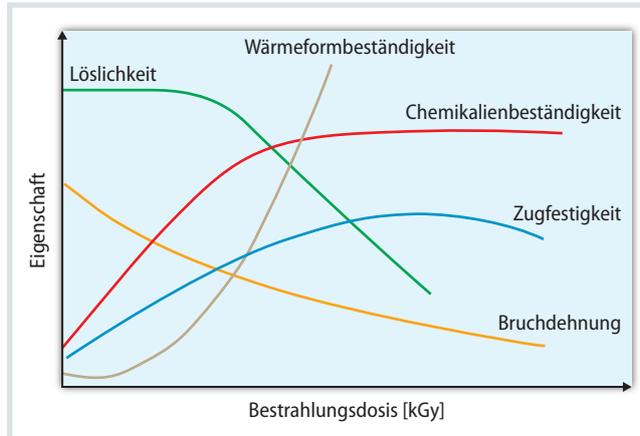
Einen Ausweg aus dem Dilemma bietet die Strahlenbehandlung von technischen Kunststoffen wie etwa Polyamiden

mechanische Kennwerte	nicht bestrahlt	bestrahlt [3 · 33 kGy]
Gelanteil [%]	0	65
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	6220/4130	6780/4740
Streckspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	108/60	121/78
Bruchdehnung [%]	2,8/2,4	2,5/2,3

**Tabelle 2.** Vergleich mechanischer Kennwerte von nicht bestrahltem und bestrahltem PA-6-GF30 (parallel / quer zur Spritzrichtung) Quelle: LKT Erlangen

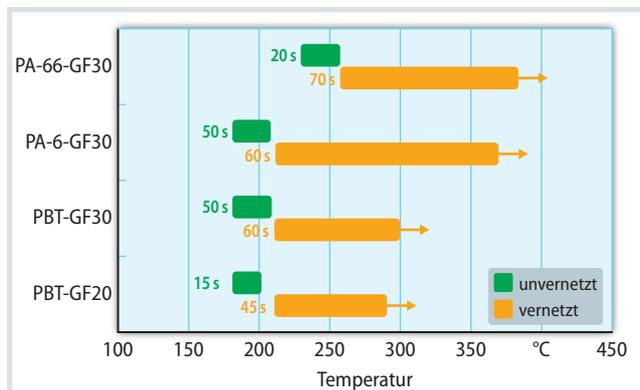
**Bild 3.** Trendlinien durch Strahlenvernetzung für verschiedene Werkstoffeigenschaften: Besonders günstig für den Einsatz in Elektrofahrzeugen sind die dadurch erhöhte Wärmeform- und Chemikalienbeständigkeit.

Quelle: BGS; Grafik: © Hanser



**Bild 4.** Durch die Behandlung steigt die kurzfristige Wärmeformbeständigkeit von glasfaserverstärkten Kunststoffen deutlich an. Besonders groß ist der Zuwachs bei PA 6.

Quelle: LKT Erlangen;  
Grafik: © Hanser



dem Markt bereits in modifizierter Form erhältlich. Ohne Vernetzungshilfsmittel kommen hingegen viele Polyolefine und deren Copolymere beispielsweise thermoplastische Copolyesterelastomere (TPE-E), Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVAC), Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuke (EPDM) und der Standardkunststoff Polyethylen (PE) aus. Die Strahlenvernetzung erfolgt jeweils bei Raumtemperatur. Die Ergebnisse des Bestra-

lungsprozesses sind sehr gut reproduzierbar.

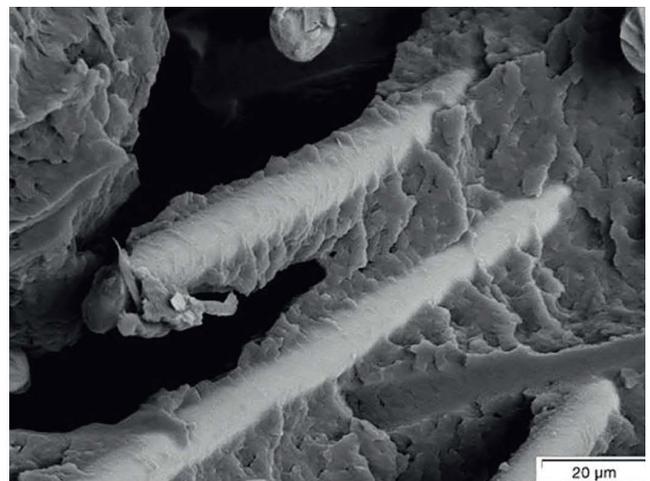
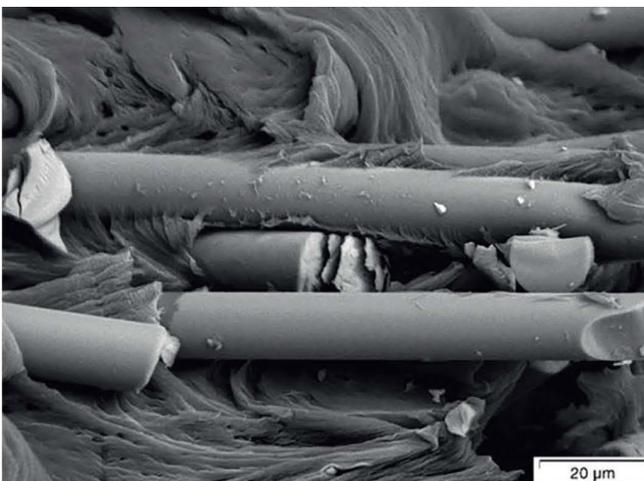
### Der Mehrwert der Strahlenvernetzung

Besonders gut untersucht ist die Wirkung der Strahlenbehandlung auf PA [6, 7, 8]. Sie sind vielseitig einsetzbar und einfach zu verarbeiten. Unbehandelt stoßen sie jedoch an ihre Grenzen, wenn hohe Temperaturen auftreten und Lang-

lebigkeit trotz starker mechanischer Belastung etwa durch Reibung gefordert ist.

Durch die Bestrahlung mit Elektronen ändert sich das Verhalten von PA unter Wärmeeinfluss. Beispielsweise steigt bei PA 66 die Glasübergangstemperatur von 81 auf 97 °C an. Entscheidender ist jedoch, dass der Speichermodul von unvernetztem PA 66 bei rund 240 °C stark abfällt: Das Material beginnt zu schmelzen. Anders sieht es hingegen bei strahlenvernetztem PA 66 aus. In den amorphen Bereichen des Kunststoffs halten die Vernetzungsstellen die Polymere zusammen, weshalb es bei dieser Temperatur über einen etwa 120-fach höheren Speichermodul verfügt als unvernetztes PA 66. Die Reststeifigkeit fällt bis zu einer Temperatur von 360 °C kaum ab. Die Behandlung mit Elektronenstrahlen führt bei PA 66 somit zu einer erhöhten Wärmeformbeständigkeit. Der gleiche Effekt lässt sich ebenfalls bei anderen Materialien beobachten (Bild 4).

Auch die mechanischen Kennwerte der PA verbessern sich durch die Strahlenbehandlung (Tabelle 1). Das ist auch bei glasfaserverstärkten Typen der Fall. Beispielsweise steigt der E-Modul von PA-6-GF30 parallel zur Spritzrichtung von 6220 auf 6780 N/mm<sup>2</sup> und die Streckspannung von 108 auf 121 N/mm<sup>2</sup> an. Zugleich sinkt die Bruchdehnung von 2,8 auf 2,5 % (Tabelle 2). Die Erhöhung der Festigkeit schon bei Raumtemperatur ist auf bessere Haftung zwischen Faser und Matrix zurückzuführen. Das verdeutlichen Untersuchungen an



**Bild 5.** Bruchflächen aus Zugversuchen mit unbestrahltem (links) und bestrahltem PA-6-GF30 (rechts) unter dem Rasterelektronenmikroskop:

Die Matrixrückstände an den Glasfasern der bestrahlten Probe verdeutlichen die bessere Haftung zwischen Fasern und Matrixpolymer. © LKT Erlangen

Bruchflächen von bestrahlten und unbestrahlten FVK. Die Bruchfläche einer nicht bestrahlten PA-6-GF30-Probe weist glatte fast frei liegende Glasfasern auf, während bei der bestrahlten Probe Matrixreste an den Glasfasern zu erkennen sind als Zeichen für die bessere Haftung zwischen den beiden Komponenten (**Bild 5**).

Die Vernetzung mit Elektronenstrahlen erzeugt noch weitere positive tribologische Effekte:

- Die Kriechneigung etwa von PA-6-GF30 reduziert sich um bis zu 70 %.
- Der Verschleißkoeffizient etwa von PA 66 verringert sich um bis zu 60 bis 70 %.
- Die Maßhaltigkeit verbessert sich aufgrund eines geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Die Leistungssteigerung durch Strahlenbehandlung ist aber nicht auf PA beschränkt. Gut belegt ist die positive Wirkung der Strahlenvernetzung bei-

spielsweise auch bei PBT, PE, EVAC, TPE und anderen Thermoplasten [5, 9].

**Anwendungen im Elektroauto**

Strahlenvernetzte technische Kunststoffe lassen sich an verschiedenen Stellen von Elektroautos verwenden (**Bild 1**). Einige entsprechende Bauteile, wie Zahnradgetriebe und solche aus der Befestigungs- und Verbindungstechnik (Clips) werden auch für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor verwendet und sind dort bereits im Serieneinsatz. Andere speziell für die Anforderungen von E-Automobilen befinden sich im Entwicklungsstadium. Das gilt insbesondere für Batteriegehäuse sowie Separatoren und Stromkabel in der Nähe der Batterie. Das Unternehmen BGS Beta-Gamma-Service, einer der Pioniere bei der Behandlung mit Beta- und Gammastrahlen, führt derzeit mit Automobilherstellern und Zulieferern entsprechende Forschungsprojekte durch. ■

**Info**

**Autoren**

**Dr. Michal Daněk** ist seit 2005 als Key-Account-Manager Strahlenvernetzung für die BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG in der CEE-Region tätig; danek@bgs.eu  
**Wilhelm Schneider** arbeitet seit 2021 als Key-Account-Manager Strahlenvernetzung für BGS; schneider@bgs.eu

**Literatur & Digitalversion**

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)

**English Version**

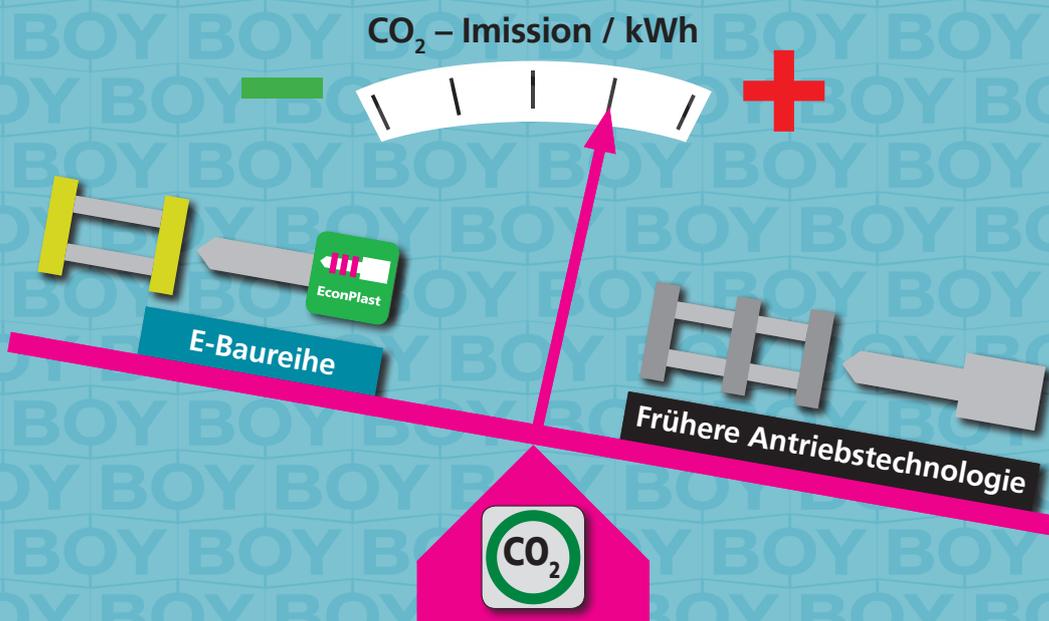
Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)

**Geringere CO<sub>2</sub>-Emission bei der Teileproduktion**

**Effizientere Servo-Antriebe steigern Nachhaltigkeit**



Spritzgiessautomaten



Servo-Drive



Circular economy

- ✓ Der energieeffiziente und dynamische Servoantrieb **spart bis zu 50 %** an Energiekosten
- ✓ Jede eingesparte kWh **reduziert** die **CO<sub>2</sub>-Emission** aktuell um 0,366 kg. Bei um 3,1 kWh reduziertem Energiebedarf, 6.000 h/Jahr, Durchsatz von 8,32 kg/h sind dies fast **7 (!) Tonnen**
- ✓ **Zusätzliches Einsparpotenzial (bis zu 50%)** bietet die Plastifizierttechnologie **EconPlast**

