

**Abschlussbericht zum SUSPRISE Verbundprojekt RailWaste:
Herstellung von Bahnschwellen aus Mischkunststoffen
Förderkennzeichen: 0330852A/B**

Projektlaufzeit: 1.3.2008 bis 28.02.2010

Projektpartner

Deutschland

Projektkoordination und Teilprojekt Werkstoffentwicklung:

Fraunhofer-Institut für chemische Technologie (ICT)

Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7

D-76327 Pfinztal

Dr.-Ing. Jörg Woidasky

Tel. +49-721/4640-367

Joerg.woidasky@ict.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Gudrun Gräbe

Tel. +49-721/4640-302

Gudrun.graebe@ict.fraunhofer.de

Teilprojekt Materialbereitstellung und Materialaufbereitung:

PAV GmbH &Co. KG

Großbeerenstraße 171a

D-12277 Berlin

Hans-Joachim Brauer

Tel. +4930/700766-16

brauer@pav-recyclate.de

Österreich

Teilprojekt Verfahrensentwicklung:

Next Generation Recyclingmaschinen GmbH

Gewerbepark 22

A-4101 Feldkirchen

Josef Hochreiter

Tel. +43-7233 70107-37

Josef.hochreiter@ngr.at

Pfinztal, den 29.10.2010

Inhaltsübersicht

	Seite
1 Einleitung	4
1.1 Stand der Technik	4
1.2 Zielsetzung	6
1.3 Vorteilswirkung transnationaler Zusammenarbeit	7
1.4 Nachhaltigkeitsaspekte.....	7
1.4.1 Umwelt.....	7
1.4.2 Wirtschaftlichkeit	9
1.4.3 Soziales.....	10
2 Arbeitsplanung und Verantwortlichkeiten	10
3 Eingehende Darstellung der Ergebnisse nach Arbeitspaketen	13
3.1 Arbeitspaket 1: Materialentwicklung	13
3.1.1 Allgemeine Zielsetzung	13
3.1.2 Technische Anforderungen an die Kunststoffschwelle	13
3.1.3 Herstellbarkeit von Kunststoffschwellen	17
3.1.4 Erwartungen von Eisenbahngesellschaften	17
3.1.5 Versuche durch PAV.....	17
3.1.6 Materialauswahl.....	19
3.1.7 Compoundiersversuche mit PE-Neuware als Referenzmaterial	23
3.1.8 Compoundiersversuche mit Altkunststoffen.....	24
3.1.9 Versuche zur Verschäumung	26

3.2	Arbeitspaket 2: Verfahrensentwicklung	28
3.2.1	Anforderungen an die Versuchsanlage	28
3.2.2	Aufbau der Versuchsanlage mit Prozessbeschreibung	28
3.2.3	Versuchsläufe	30
3.2.4	Zusammenfassung	36
3.3	Arbeitspaket 3: Material- und Produktprüfungen	37
3.3.1	Untersuchung von Schwellenabschnitten mit Hilfe einer Wärmebildkamera	37
3.3.2	Bestimmung der Homogenität der Glasfaserverteilung	43
3.3.3	Veränderungen der Porenstruktur durch Feuchtigkeit und Frost	44
3.3.4	Schwellenprüfung	44
3.4	Projektkoordination	45
3.4.1	Öffentlichkeitsarbeit	45
3.4.2	Inhalt Memo TEN-V	46
4	Zusammenfassung	49
5	Literatur	50
6	Anhang	52
6.1	Listen der EU-Mitglieder des Transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V)	52

1 Einleitung

Die Gesamtlänge des Schienennetzes in Deutschland beträgt mehr als 35.000 km. Damit ist es eines der größten Netze Europas. Angesichts von 1333 Schwellen (Beton) bzw. 1660 Schwellen (Holz) pro Kilometer liegen derzeit etwa 60 Millionen Schwellen in deutschen Eisenbahnstrecken, von denen ca. 70% aus Beton, 15% aus Holz und 15% aus Stahl bestehen (FIB 2006; Wülknitz 2008).

Während der Projektlaufzeit wurden vom Konsortium Eisenbahnschwellen aus alternativen Rohstoffen entwickelt. Als Material wurden Mischkunststoffabfälle gewählt, um die rohstoffliche Verwertung von sekundären Rohstoffen und damit die Ressourceneffizienz zu erhöhen. Im Vergleich zu Holz-Schwellen müssen keine gefährlichen Stoffe wie Kreosot verwendet werden. Auch ist die erwartete Lebensdauer der Kunststoffschwellen höher. Im Vergleich zu Beton- oder Stahlschwellen besitzen die Kunststoffschwellen ein geringeres Gewicht, zeigen besseren Schallschutz und haben eine bessere CO₂-Bilanz. Das Kunststoffmaterial wurde mit Glasfasern aus Produktionsabfällen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Schwelle verstärkt. Die Beimischung von Additiven wurde optional getestet. Die Beimischung eines Treibmittels zur Verschäumung des Schwellenkerns zur Ressourceneinsparung war ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen. Übergeordnetes Ziel war es, die Machbarkeit der Schwellenproduktion auf der Basis von sekundären Rohstoffen zu zeigen. In Summe sollte ein Produkt erzeugt werden, das die technischen Anforderungen an Bahnschwellen für eine langfristige Nutzung erfüllt, aber auch ressourcen- und kosteneffizient produziert werden kann.

1.1 Stand der Technik

Die in Deutschland für die Produktion von Bahnschwellen am häufigsten verwendete Baumart ist die Buche (*Fagus*), aus der Familie *Fagaceae*, ein einheimischer Baum des gemäßigten Europa und Nordamerika. Daneben kommt Eiche (*Quercus*) zum Einsatz. Es wird empfohlen nur Holz mit einer PEFC-Zertifizierung (Programme for the Endorsement of Forest Certification) zu verwenden (Herkunftsgarantie). Buchenholz ist nicht so hart wie Eichenholz, kostet aber nur fast die Hälfte (Preis für Buche: 250 € / m³, Eiche: 400 € / m³). Aus den Stämmen der Bäume können zwei rechteckig profilierte Eisenbahnschwellen gewonnen werden (Wülknitz 2008).

Holz ist eine natürliche Ressource und sollte zur Erhöhung der Haltbarkeit mit einem Konservierungsmittel wie Kreosot, imprägniert werden. In Deutschland werden alle Holzschwellen imprägniert (Werner et al. 2008). Das Konservierungsmittel Kreosot enthält polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Einige dieser Substanzen - vor allem Benzo(a)pyren - werden als karzinogen eingestuft und wirken sich auf die photochemische Ozonbildung aus (Kohler & Künniger 2003).

Die Standzeit der imprägnierten Holz-Eisenbahnschwellen beträgt z. B. im schweizerischen Schienennetz rund 26 Jahre. Dagegen wird für die Schwellen aus Altkunststoffen eine Lebensdauer von etwa 50 Jahren prognostiziert. Ein weiterer Vorteil der Kunststoffschwelle ist unter anderem ihre Widerstandsfähigkeit gegen Wasser oder Chemikalien. Diese Eigenschaft qualifiziert sie für den Einsatz an Standorten mit starken klimatischen Veränderungen, wie beispielsweise in Meeresnähe oder in feuchtkalten Gebieten. Darüberhinaus sind Kunststoffschwellen frei von toxischen Chemikalien (Kohler & Künniger 2003; Wisewood 2008).

Im Jahr 2008 wurden in Deutschland 32% der Kunststoffabfälle werkstofflich und 65% energetisch verwertet (Plasticseurope 2009). Eine Verwendung der Kunststoffe in Bahnschwellen erhöht ihre Wertschöpfung und verzögert die Verbrennung der Kunststoffe zumindest um einige Jahrzehnte.

In Tabelle 1 sind die Lebensdauer sowie die Preise für die verschiedenen Bahnschwellentypen aufgelistet.

Tabelle 1: Lebensdauer und Preise für Bahnschwellen in Deutschland

	Holz	Kunststoff	Beton	Stahl
Lebensdauer in Jahren – (1)	26-30	50	30-50	30-50
Preis in € – (2)	70	bis 300	45	126
Jährliche Kosten (€) -(2)/(1)	2,3-2,7	1,6-3,1	0,9-1,5	2,5-4,2

Quellen: Kohler & Künniger 2003; Scheibe 2008; Wülknitz 2008

Die Gesamtmenge an produzierten Mineralfasern in Deutschland ist in Tabelle 2 aufgeführt. Von Textilglasherstellern und –verarbeitern in Deutschland ist bekannt, dass deren Produktionsabfälle z. Zt. abgelagert werden.

Tabelle 2: Glasfaserproduktion in Deutschland (Bundesverband Glasindustrie e. V. 2008)

	Produktionsmenge in 1.000 t		Veränderung in %
	2007	2008	
Gesamtproduktion Mineralfasern	944,5	863,7	- 8,6
Textile Glasfasern und Glaswolle-Dämmstoffe	391,3	386,7	-1,2
Steinwolle-Dämmstoffe	553,2	476,9	-13,8

Bis zum heutigen Zeitpunkt wurden vielfältige Anstrengungen unternommen, um Bahnschwellen auf der Basis von Kunststoffen zu entwickeln. Im Folgenden sind einige von ihnen aufgeführt:

Sumika Bayer Urethane Co. Ltd mit Sitz in Japan hat eine Kunststoffbahnschwelle aus Polyurethan (PU) verstärkt mit Endlosglasfasern (beides Neuware) kommerzialisiert. Sie trägt den Namen Elson Neo Lumber FFU und wird mit dem Pultrusionsverfahren produziert. Im Jahr 2004 wurde sie erstmals in Europa auf der Wiener Zollhausbrücke eingebaut. Im Jahr 2008 wurden 136 dieser Schwellen mit einer Länge zwischen 2,20 und 4,50 Metern im CHEMPARK Leverkusen installiert. In Japan sind diese PU-Schwellen auf einigen Brücken, in Tunneln in Meeresnähe - wo sie häufig von Meerwasser überspült werden und einem aggressiven Mikroklima ausgesetzt sind - und im Netz der Hochgeschwindigkeits-Eisenbahnstrecken des Shinkansen eingebaut. Insgesamt mehr als 1,3 Millionen Einheiten sind verlegt, jedes Jahr kommen 90.000 PU Schwellen hinzu. Die Kunststoff-Schwellen sind in Japan seit mehr als 25 Jahren im Einsatz (Bayer 2008).

Eines der weltweit führenden Unternehmen in Entwicklung und Herstellung von Composite-Schwellen ist das amerikanische Unternehmen TieTek Composite Schwellen, welches seit über 10 Jahren Schwellen produziert. Im Jahr 2008 wurden rund 1 Million Schwellen eingebaut. TieTek erwartet für sein Produkt SleeperTek™ Composite-Schwellen, das zu 85% aus recyceltem Material (Plastikflaschen, Plastiktüten, Gummi von alten Reifen und Glasfaserabfällen- kombiniert mit verschiedenen mineralischen Füllstoffen) bestehen, eine

Lebensdauer von über 40 Jahren. Die TieTek Schwellen werden im Intrusionsprozess produziert, während im Gegensatz dazu für die RailWaste Schwellen die Extrusionstechnik gewählt wurde.

In Deutschland hat die Firma Reluma (Großrükerswalde) eine aus einer Mischung von sekundärem PE und PP bestehende Schwelle entwickelt. Diese ist auf einer Straßenbahnstrecke in Dresden (Wendeschleife) verlegt.

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Kunststoffschwellen mit der Railwaste-Entwicklung

Bayer	RailWaste
PUR-GF als Basiswerkstoff	Mischkunststoff als Basiswerkstoff
TieTek	RailWaste
Herstellung im Intrusionsverfahren	Herstellung im Extrusionsverfahren
Reluma	RailWaste
Zulassung für max. 18 t Achslast (Nebenbahnen, Straßenbahnen)	Zulassung für Güterzüge (25-30 t) bzw. Erzzüge (40 t) angestrebt
Keine gezielte Verschäumung	Gezielte Verschäumung
Intrusionsverfahren	Extrusionsverfahren
Klammer in der Stirnseite	Keine Klammer in Stirnseite

Die Reluma Schwelle hat keine Glasfaserverstärkung und ist mit der Intrusionstechnologie hergestellt. Sie ist für den Einsatz bei Straßenbahnen mit einer geringen Achslast vorgesehen, während die Railwaste Schwelle für den Einsatz bei Zügen mit Achslasten bis 40 t geplant ist.

Wie Tabelle 3 zeigt, gibt es grundlegende Unterschiede in der Produktionstechnologie und den Eigenschaften der bereits am Markt befindlichen Schwellen im Vergleich zur Railwaste-Schwelle.

1.2 Zielsetzung

Der Schwerpunkt des Projektes lag in den Bereichen Werkstoff- und Technologieentwicklung.

Im Bereich der Materialentwicklung wurde vom Fraunhofer ICT ein Compound aus Kunststoffabfällen und Glasfasern entwickelt, das den mechanischen Anforderungen von Schwellen gerecht wird. Der Schwerpunkt des Projekts lag auf der Verwendung von gemischten Kunststoffabfällen und Glasfasern, die in Deutschland anfallen. Kriterien für die Auswahl der Sekundärrohstoffe waren sowohl das Aufkommen und der Preis wie auch die Intention, verschiedene sekundär Materialtypen und –Qualitäten (mechanische Eigenschaften) zu verwenden. Die Materialien wurden von der Firma PAV aufbereitet und geliefert. Ausgangspunkt und Motivation für die Entwicklung der Glasfaser-Kunststoffcompounds war ein

Patent der Firma PAV¹. Zur Entwicklung einer geeigneten Materialkombination wurden am Fraunhofer ICT systematische Versuche durchgeführt. Auf der Basis der Ergebnisse für die mechanischen Eigenschaften wurden mehrere Compounds für die Extrusion ausgewählt.

Parallel zur Materialentwicklung wurde bei NGR der Bereich der Technologieentwicklung bearbeitet. Hierbei wurde der technische Prozess mit den Einheiten Extrusion, Kalibrierung und Kühlung entwickelt. Die Erprobung und Optimierung des Prozesses der Schwellenproduktion erfolgte mit verschiedenen Materialmischungen. Technische Schwierigkeiten ergaben sich bei der Dosierung der 3–5 cm langen Glasfasern und der gleichmäßigen Einmischung des Treibmittels. Dennoch konnten zum Projektende eine Reihe von Schwellenprototypen aus MPW mit Glasfaserverstärkung produziert und im Anschluss an die Projektlaufzeit auf ihre physikalischen Eigenschaften (z. B. Schraubenauszugskraft, 3-Punkt-Biegung, Verarbeitbarkeit) getestet werden.

Zusätzlich zum Projektrahmen wurde eine Ökobilanz für den gesamten Lebenszyklus von Holz- und MPW-Schwellen angefertigt. Hierbei wurde bilanziert, wieviele Ressourcen über die Lebenszeit verbraucht werden und wieviele Emissionen, insbesondere Treibhausgase – in CO₂-Äquivalenten – entstehen. Mehrere Szenarien wurden konzipiert (z. B. die Berücksichtigung von Holz als klimaneutraler Rohstoff oder verschiedene Lösungen für die Endlagerung der Schwellen). Je nach Szenario variierten die Emissionen an Treibhausgasen erheblich. In einem Szenario, in dem beide Schwellen (MPW und Holz) am Ende ihrer Lebensdauer verbrannt werden und die Jahre der Nutzungsdauer berücksichtigt werden, waren die CO₂-Äquivalente der Kunststoffschwelle um 66 kg niedriger als bei der Holzschwelle.

1.3 Vorteilswirkung transnationaler Zusammenarbeit

Die Harmonisierung und Erneuerung des europäischen Schienennetzes ist eine der wichtigsten Aufgaben der Europäischen Union in den kommenden Jahren. Eines der Kernthemen ist die „Interoperabilität“, d. h. die grenzüberschreitende Vernetzung der nationalen Transportsysteme. Ein Vorhaben zur Bereitstellung von Produkten für den Eisenbahnbetrieb erfordert daher zwangsläufig eine transnationale Kooperation, um am erwarteten Budget von etwa 1 Mrd. €, das von der Trans-European Transport Network Executive Agency (TEN-TEA) verwaltet wird, partizipieren zu können. Die Einbeziehung von Partnern aus verschiedenen Ländern ermöglicht so einen schnelleren und einfacheren Marktzugang.

1.4 Nachhaltigkeitsaspekte

1.4.1 Umwelt

Die Substitution von Holz durch Polymerprodukte im Bereich der Bahnschwellen hat deutliche Vorteile für die Umwelt. Bahnschwellen sind jahrzehntelanger Bewitterung und biologischen Angriffen ausgesetzt, die Nutzungszeiten liegen zum Teil bei bis zu 60 Jahren. Vor 1992 wurden Bahnschwellen mit PCB-haltigen und somit kanzerogenen Teerölen behandelt (Tabelle 4), auch die heutigen "schadstoffarmen Teeröle" sind nicht umweltneutral.

Während der Nutzungsdauer sind bereits erhebliche umweltrelevante Emissionen aus Schwellen festzustellen:

"Eine teerölbehandelte Eisenbahnschwelle (Buchen- oder Eichenholz) emittiert während einer Einsatzdauer von 20 bis 30 Jahren rund 5 kg Teeröl. PAK Emissionen liegen im Bereich von etwa

¹ Patentschrift DE 195 03 632 C1 (1996): Verfahren zur Herstellung von thermoplastischen Werkstoffen durch Einarbeiten von Glasfaservlies unter Verwendung von recycelten Materialien.

0,5 kg (Summe der 16 EPA-PAK) und liegen als Emissionen der flüchtigen 2- und 3-Ring PAK (Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen, Anthracen, Fluoren und Phenanthren) vor. Die Emissionen phenolischer Verbindungen liegen im Bereich von 10 g pro Schwelle. Gemäß unserer Untersuchungen werden aus den teerölbehandelten Eisenbahnschwellen des schweizerischen Schienennetzes pro Jahr rund 1710 t Teeröl, 139 t EPA-PAK und 4 t phenolische Verbindungen emittiert."

Tabelle 4: Analyseergebnis teerölbehandelter Holz-Bahnschwellen (Staatl. Umweltamt Herten 2003)

Parameter	Eichenschwelle	Buchenschwelle
Teerölgehalt (ca.)	45 kg/m ³	160 kg/m ³
Gewicht Holz bei Normalfeuchte	690 kg/m ³	720 kg/m ³
Schwellen-Holzmasse (ca.)	69 kg	72 kg
Schwellen-Teerölmasse (ca.)	4,4 kg	15,6 kg
Schwellen-Gesamtmasse (ca.)	73 kg	87,6 kg
Teerölanteil (Gew.-%)	6	18
Benzo(a)pyrengelgehalt in Schwelle lt. vorliegenden Analysen	9 mg/kg	18 mg/kg
Benzo(a)pyrengelgehalt in Teeröl, rechnerisch lt. vorliegenden Analysen	150 mg/kg	390 mg/kg

Alte Bahnschwellen sind heute nur noch für eine industrielle Wiederverwendung einsetzbar und müssen ansonsten als gefährlicher Abfall entsorgt werden. Teeröl wird für Bahnschwellen auch heute weiterhin als Holzschutzmittel eingesetzt, wenn auch als "schadstoffarmes Teeröl" mit weniger kanzerogenen Inhaltsstoffen². Die biozide Behandlung von Bahnschwellen ist bei Nutzungsdauern von mehreren Jahrzehnten jedoch nach wie vor ebenso unvermeidbar wie dadurch auftretende Umweltbeeinträchtigungen durch Luftemissionen oder Auswaschung.

Diese negativen Umweltauswirkungen treten bei Kunststoff-Bahnschwellen nicht auf, da sie keine den Holzschwellen vergleichbare biozide Ausrüstung benötigen.

Die Substitution von Beton durch Polymerprodukte kann den Verbrauch nicht nachwachsender geogener Rohstoffe verringern. Darüber hinaus führen geringere Schwellengewichte zu Umweltvorteilen bei der Logistik (geringerer Transportaufwand).

Zu den deutschen Umweltqualitätszielen im Bereich der Abfallwirtschaft zählen lt. Schwerpunktprogramm der Bundesregierung von 1998 der Anteil verwertbarer Abfälle am gesamten Abfallaufkommen (Ziel: Steigerung der Verwertungsquote von 25 % in 1993 auf 40 % in 2010) sowie die aus Siedlungsabfällen stammenden Deponierungsmengen mit dem Ziel einer weiteren Verringerung. Mit Blick auf diese Nachhaltigkeitsindikatoren kann für die Verwertung von (Abfall-) Kunststoffen in Bahnschwellen klar festgestellt werden, dass durch diese werkstoffliche Verwertung eine Erhöhung der Verwertungsquote und gleichzeitig eine Verringerung der Abfallmenge erfolgt. Alternative Verwertungsrouten wie z. B. der Einsatz als Reduktionsmittel im

² Schadstoffarme Teeröle enthalten lt. ChemVerbotsV weniger als 50 mg/kg Benzo(a)pyren und weniger als 3 % wasserlösliche Phenole. Die Überwachung der "Schadstoffarmut" ist nach Angaben z. B. des staatlichen Umweltamtes Herten in der Praxis äußerst schwierig.

Hochofen (rohstoffliche Verwertung) oder als Teilstrom in Industriefeuernungen (energetische Verwertung) sind im Vergleich zur geplanten werkstofflichen Verwertung aus Umweltsicht weniger vorteilhaft. Die Substitution von Primär- durch Sekundärwerkstoffen bei Kunststoffen führt durch den Verzicht auf die "Vorketten" der Rohstoffgewinnung und Polymerherstellung in der Regel zu Umweltentlastungseffekten u. a. bei den Treibhausgasemissionen und beim Gesamtenergieverbrauch.

1.4.2 Wirtschaftlichkeit

Durch die Nutzung von Polymer- und Glasfaserabfällen gemeinsam mit Abfällen aus dem Medizinbereich mit Schäumwirkung als Hilfsstoff zur Herstellung von Bahnschwellen und der daraus resultierenden Substitution von Primärrohstoffen (Holz, mineralische Rohstoffe), kann die Ressourcenproduktivität (Verhältnis des Bruttoinlandsprodukts zur Primärrohstoff-Nutzung) gesteigert werden. Der Primärressourcenverbrauch sinkt, die Wertschöpfung (Herstellung von Produkten aus Abfällen) wird gesteigert und vor allem in Deutschland gehalten: Bahnschwellen werden derzeit mit etwa 65 €/Stück gehandelt. Alte Bahnschwellen werden in den Kategorien A bis C gehandelt, dabei werden Erlöse von ca. 15 € (Bahnschwelle zur Wiederverwendung, Kategorie A) bis hin zur Kategorie C (2 €/Stück) erzielt. Durch Konfektionierung und Handel kann es zu einer Schadstoffexposition von Menschen sowie zur Schadstoffdissipation kanzerogener Substanzen kommen.

Die Polymer-Bahnschwelle tritt in den Wettbewerb zu Holz- und Betonschwellen. Trotz technischer Vorteile ist derzeit nicht damit zu rechnen, dass für Polymer-Bahnschwellen deutlich höhere Preise als für konventionelle Produkte erzielbar sind. Daher ist der Ansatz der Wertschöpfung aus Abfallströmen, die zu sehr geringen Kosten erworben werden können, auch der wirtschaftlich sinnvolle Ansatz bei dieser Material- und Verfahrensentwicklung.

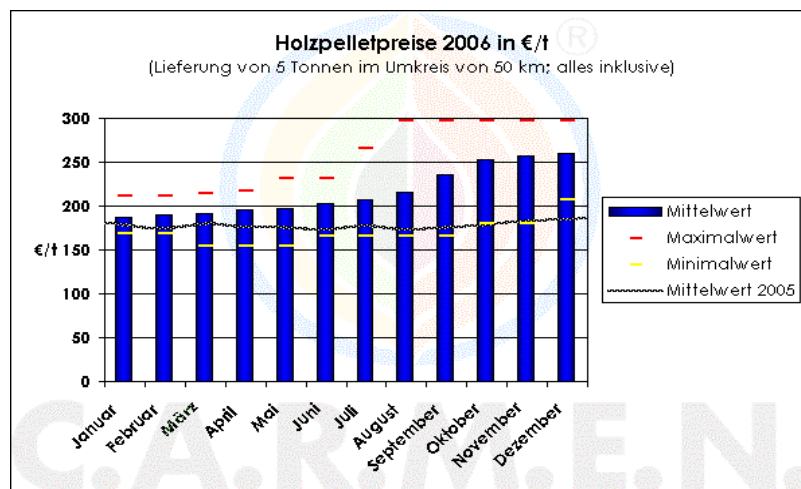


Abbildung 1: Entwicklung der Holzpelletpreise 2006³

Im Bereich der Wettbewerbsfähigkeit muss mit Blick auf die zunehmende Ressourcennutzung mit weiteren Verbesserungen für die Polymer-Bahnschwelle gerechnet werden: So wird Holz zunehmend für die energetische Nutzung verwendet, der Papierverbrauch steigt und Holz als Baustoff gewinnt ebenfalls wieder an Bedeutung. Dies wird im Bereich der Forstwirtschaft zu einer Angebotsverknappung und steigenden Preisen führen. Bei Hölzern zur Energieerzeugung ist dies bereits geschehen (Abbildung 1).

³ <http://www.carmen-ev.de/dt/energie/pellets/pelletpreise.html#2>

Ähnliches gilt für die endlichen mineralischen Ressourcen der Betonherstellung, bei der noch die wirtschaftlich und umweltrelevante, energieintensive Zementherstellung⁴ hinzutritt. Neben den Rohstoff- und Energiepreisen wirkt sich der Emissionshandel auf diese Produkte aus.

1.4.3 Soziales

Aus Sicht des Gesundheitsschutzes weisen Polymer-Bahnschwellen deutliche Vorteile auf. Neben der bereits diskutierten nicht vorhandenen Humantoxizität weisen sie geringere Produkt-Massen auf. Sie sind dadurch einfacher zu verarbeiten. Darüber hinaus haben sie ähnlich wie Holzschwellen hervorragende Körperschall-Absorptionseigenschaften, die eine Verbesserung des Problems "Bahnlärm" ermöglichen. Darüber hinaus ermöglicht deren Produktion in Deutschland die Stärkung des Wirtschaftsstandortes.

2 Arbeitsplanung und Verantwortlichkeiten

Im Wesentlichen wurden drei Arbeitsschwerpunkte bearbeitet:

1. Materialbereitstellung und Materialaufbereitung: Qualifizierung, Auswahl, Aufbereitung und Bereitstellung von Mischkunststoffen und anderen Abfällen durch PAV
2. Werkstoffentwicklung: Herstellung eines Compounds und Identifikation eines Prozessfensters sowie notwendiger Hilfsstoffe für die Produktherstellung sowie Durchführung von Werkstoffprüfungen durch das Fraunhofer ICT
3. Verfahrensentwicklung: Verarbeitungsversuche einschließlich anlagenseitiger Modifikationen zur Herstellung eines schwelengeeigneten Großprofils durch NGR – Österreichisches Teilprojekt

Tabelle 5 und Tabelle 6 zeigen den genehmigten Arbeitsplan sowie die Verantwortlichkeiten im Vorhaben.

⁴ Energieverbrauch ca. 3.500 kJ/kg Zementklinker oder etwa 100 kWh/t Zement

Tabelle 5: Übersicht über die Arbeitspakete des Vorhabens

WP No.	WP Title	WP Contents	Responsible Partner
1	Materials development		
1.1	Materials pre-processing	Mechanical processing of MPW to prepare for subsequent polymer conversion processes, covering drying, metals removal, homogenization/blending, pelletizing and/or grinding	PAV
1.2	Compound development	Composition of a compound from MPW including processing aids, stabilizers, and compatibilizers, reinforcement with waste glass fibers, foaming agents	Fraunhofer ICT
2	Process development		
2.1	Extrusion technology	Adaptation of profile extrusion technology to MPW processing: Wear minimization, fibre length conservation, de-gassing/venting, temperature management in order to optimize foaming process	NGR
2.2	Tooling	Design of a tooling and post- processing solution for fibre-reinforced MPW profile of large diameter (homogeneous fibre distribution,—stabilization, surface properties, shape stability)	NGR
3	Testing	Materials testing on mechanical and processing properties (e. g. youngs modulus, charpy impact strength, melt flow rate) as well as on long-term behaviour (sun irradiation, creep behaviour, <i>Selected tests on product properties</i>	Fraunhofer ICT
4	Project management		
4.1	Cooperation (internal)	Organization of internal information flow, project meetings, budget controlling	Fraunhofer ICT
4.2	Reports	Definition of reports contents and time lines for delivery, controlling, report writing and distribution	Fraunhofer ICT
4.3	Dissemination of results	publications and presentations, workshop organization, interviews, <i>continuous involvement of railway operators into development process by communication</i>	PAV

Tabelle 6: Arbeitsplanung, Zuständigkeiten und Balkenplan

WP No.	WP Title	Resp. Partner	Other Partners involved	Quarter I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Materials development										
1.1	Materials pre-processing	PAV	ICT		MS1						
1.2	Compound development	ICT	PAV, NGR				MS 2				
2	Process development										
2.1	Extrusion technology	NGR	ICT					MS 3			
2.2	Tooling	NGR								MS 4	
3	Testing	ICT	PAV, NGR								MS 5
4	Project management										
4.1	Cooperation (internal)	ICT	PAV, NGR								
4.2	Reports	ICT	PAV, NGR								
4.3	Dissemination of results	PAV	ICT								

Milestones:

MS1: Availability of 800 kg pre-processed MPW (mixed plastic waste) for WP1.2

MS2: Identification of optimal compound mixture for WP 2.1

MS3: Extrusion process runs stable with reproducible results

MS4: Successful experiments along with tool layout

MS5: Sleeper product meets the requirements

3 Eingehende Darstellung der Ergebnisse nach Arbeitspaketen

3.1 Arbeitspaket 1: Materialentwicklung

3.1.1 Allgemeine Zielsetzung

Die Kunststoffschwelle soll primär die Holzschwelle ersetzen.

Hierfür sind mehrere Gründe vorhanden:

- Umweltverträglichkeit – keine Holzschutzmittel, die alten Holzschutzmittel sind nicht mehr zugelassen, die neuen zugelassenen haben nur eine sehr eingeschränkte Wirkung.
- Die Entsorgung der alten Holzschwellen ist nur als gefährlicher Abfall über Verbrennungsanlagen mit hochwertiger, aufwendiger Rauchgasreinigung möglich.
- Die Holzschwelle hat eine gewisse Körperschalldämpfung, die bei der Betonschwelle nicht gegeben ist. Die Körperschalldämpfung erreicht nur eine Kunststoffschwelle.

Es sind bereits Kunststoffschwellen im Einsatz, die jedoch durch den hohen Preis begrenzt, nur bei speziellen hochwertigen Anforderungen zur Anwendung kommen. Aus diesem Grund kommt für andere Einsatzzwecke wie Brücken, Weichen, Tunnel und körperschallsensible Strecken eine Kunststoffschwelle aus Sekundärkunststoff in Frage.

Die technischen Werte der Kunststoffschwelle müssen mindestens mit denen der Holzschwelle vergleichbar sein.

Die Bearbeitung der Kunststoffschwellen sowie die Verlegung im Gleisbett muss mit den gleichen Gleisbaumitteln der Holzschwelle möglich sein. (Resümee aus dem Erprobungsbericht DB Netz AG –Brückenschwellenfertigungsanlage Nürnberg v. 12.12.2008)

Die Lebensdauer der Kunststoffschwellen im Vergleich zu Holzschwellen sollte doppelt so hoch sein. Zusätzlich ist die Kunststoffschwelle resistent gegen Öle, Fette und Laugen.

Für die Wirtschaftlichkeit einer Produktionslinie ist eine jährliche Mindestproduktion erforderlich.

3.1.2 Technische Anforderungen an die Kunststoffschwelle

Aus den Anforderungen der Deutschen Bahn (DB) für Holzschwellen wurden folgende Kriterien bestimmt, um eine Zulassung durch das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) zu erreichen:

- Allgemeine Informationen über den Antragsteller
- Verantwortlicher Mitarbeiter des Antragstellers (Ansprechpartner)
- Ausführliche Beschreibung der Produkte (Schwellenform) und deren Herstellungsverfahren
- Beschreibung der laufenden Qualitätskontrolle
- Beabsichtigte Einsatzgebiete, wie Schwerlastverkehr (Typenbezeichnung)
- Zeichnungen mit Maßangaben und Fertigungstoleranzen
- Hinweise auf Abweichungen von den anerkannten Regeln der Technik
- Nachweise, dass bei dem Produkt mindestens die gleiche Sicherheit vorhanden ist wie bei den allgemeinen für die Eisenbahnen des Bundes zugelassenen Schwellen

- Technische Merkmale der Schwellen (Spezifikationen, Materialgüten und –zusammensetzungen, Elastizitäten) und statische Berechnung
- Statische und dynamische Federkennlinie
- Verhalten bei erhöhter Temperatur
- Registrierung von Verschleiß, Verformungen und Einarbeitungen
- Nachweis der Brauchbarkeit gem. § 5 Abs. des Bauproduktengesetzes
- Bestimmung der Druck- und Zugfestigkeit sowie der Dehnung an Probekörpern
- Bewitterungsprüfung nach DIN 53231 (ersetzt durch DIN EN ISO 11 341)
- Frost-Tau-Wechsel Prüfungen in Anlehnung an DIN 52 104
- Bestimmung der Eluierbarkeit nach DIN 38 414 und Entsorgung
- Prüfung des Brennverhaltens (Brandversuche) in Anlehnung an DIN 54 837 (Klassifizierung in Anlehnung an DIN 5510)

Eine Prüfung bzw. Vorprüfung durch eine vom EBA anerkannte TU oder TH ist auf jeden Fall erforderlich.

Daraus ergibt sich folgendes Anforderungsprofil an Schwellen:

Auszug aus den Zulassungsanforderungen des Eisenbahn-Bundesamtes v. 08.07.2009 VMS.Nr. 322311

„Nachfolgende Voraussetzungen sind erforderlich, um eine vorläufige Betriebserlaubnis oder Zulassung auf Betriebserprobung zu erhalten:

- 1. Bauliche oder sicherheitsrelevante Veränderungen an der Kunststoffschwelle sind dem Eisenbahn-Bundesamt, Ref. 21, unmittelbar mitzuteilen.*
- 2. Für die Fertigung der Kunststoffschwellen gelten sinngemäß die DIN EN 13 145 „Gleis- und Weichenschwellen aus Holz“ und der DB Standard (DBS) 918 144 „Holzschwellen“ als Anpassungsnorm in der jeweils gültigen Ausgabe, mit Ausnahme der darin enthaltenen spezifischen Anforderungen an den Werkstoff Holz.*
- 3. Vor dem Einsatz in Tunneln ist die Nichtbrennbarkeit der Kunststoffschwellen entsprechend Richtlinie des Eisenbahn-Bundesamtes „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln“ nachzuweisen.*
- 4. Die Kennzeichnung der Kunststoffschwellen ist in Absprache mit dem Auftraggeber auszuführen.*
- 5. Bei der Bearbeitung der Kunststoffschwellen sind die gültigen Arbeitsschutz- und Arbeitsvorschriften für Kunststoffe sowie diejenigen analog zu Holz einzuhalten.*
- 6. Bei der Bearbeitung der Kunststoffschwellen ist die Bohr- bzw. Schneidgeschwindigkeit so zu wählen, dass die Werkzeuge keine Temperatur erreichen, die zum Verschmelzen von Glasfasern und Werkzeug führt.*
- 7. Im Rahmen der Betriebserprobung sind die Querverschiebewiderstände der Kunststoff- Schwellen im Betriebsgleis für die Zustände „nicht konsolidiertes Schotterbett“, d. h. nach dem Einbau der Schwellen und vor der Aufnahme des Betriebs, sowie „konsolidiertes Schotterbett“, d. h. nach ausreichender*

Verfestigung durch Verkehrsbelastung, von der DB AG oder einem autorisierten Institut zu ermitteln. Die Ergebnisse sind dem Eisenbahnbundesamt, Ref. 21, schriftlich mitzuteilen.

8. Die Bauvorhaben für die Betriebserprobung sind in der Bauphase fachlich zu begleiten und während der Betriebserprobung im Rahmen der Regelinspektionen besonders zu überwachen. Die visuellen Kontrollen haben sich insbesondere auf die Verankerung der Schienenbefestigung und auf eventuelle Rissbildungen, Verdrückungen, Ablösungen sowie UV-Schäden an den Kunststoffschwellen zu konzentrieren. Die Ergebnisse der Prüfungen und Kontrollen sowie die im Erprobungszeitraum erfolgten Oberbauarbeiten sind zu dokumentieren und in einem „Begleitheft zur Betriebserprobung“ zu sammeln.

Ort und Beginn der Betriebserprobung sind dem Eisenbahnbundesamt, Ref. 21, schriftlich bekannt zu geben.

9. Die Ausführungsplanung ist den zuständigen Fachbereichen der Betreiberbahn zur Zustimmung vorzulegen. Für die Rückstromführung, Bahnerdung und den Potentialausgleich sind die Bestimmungen der Geschäftsbereichsrichtlinie 997.02 der DB AG maßgebend. Die Vorgaben in den Normen, insbesondere die der DIN EN 50122-1, müssen eingehalten werden.

10. Die Schwellen müssen einer laufenden Güteüberwachung nach DIN 18 200 unterzogen werden. Die Eigenüberwachungsprüfungen dürfen in eigenen Labors und Prüfständen durchgeführt werden. Die Fremdüberwachung ist von einer anerkannten Stelle oder der Deutsche Bahn AG, Qualitätssicherung Beschaffung Oberbaumaterialien (VQB 21), 10963 Berlin, Köthener Straße 2-3, durchzuführen. Art, Umfang und Häufigkeit der im Rahmen von Eigen- und Fremdüberwachung erforderlichen Prüfungen sind in Anlehnung an die Normen DIN EN 13 145 und DBS 918 144 durchzuführen.

Die Bestätigung der Übereinstimmung der Schwellen mit den Bestimmungen dieser Zulassung muss mit einer Übereinstimmungserklärung des Herstellers (Übereinstimmungsnachweis) auf der Grundlage einer werkseigenen Produktionskontrolle und einer Erstprüfung erfolgen.

Grundlage für die Zulassung zur Betriebserprobung sind folgende Unterlagen:

- DIN EN 13 145: 2001 „Gleis- und Weichenschwellen aus Holz“,
- DB Standard (DBS) 918 144, Ausgabe Dezember 2007, „Holzschwellen“,
- DIN EN 13 146-5: 2003 „Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme, Bestimmung des elektrischen Widerstandes“;
- DIN EN 13481-2: 2007 „Leistungsanforderungen für Schienenbefestigungssysteme, Befestigungssysteme für Betonschwellen“;
- DB-Vorschrift von 1982 „Spannbetonschwellen - Grundsätze für Bemessung, Bauart und Zulassungsverfahren“;

Vorbehalt:

Die Zulassung zur Betriebserprobung kann mit sofortiger Wirkung widerrufen werden, wenn ihren Nebenbestimmungen nicht entsprochen wird. Die Zulassung zur Betriebserprobung wird widerrufen, ergänzt oder geändert, wenn sich die Kunststoffschwellen nicht bewähren oder wenn neue technische Erkenntnisse dies begründen.

Hinweise:

1. Die Zulassung zur Betriebserprobung wird unbeschadet der Rechte Dritter, insbesondere privater Schutzrechte, erteilt.
2. Die für die Infrastruktur zuständige Betreiberbahn regelt in eigener Zuständigkeit, welche Schwellen im Gleis verwendet werden. Bei der Zulassung durch das EBA stehen vor allem sicherheitstechnische Aspekte im Vordergrund. Der Anwender kann evtl. zusätzliche, nicht zulassungsrelevante Kriterien vor einem Einsatz im Betriebsgleis fordern. Es wird deshalb empfohlen, sich frühzeitig mit den zuständigen Stellen der Betreiberbahn in Verbindung zu setzen und unabhängig von der öffentlich/rechtlichen Zulassung eine Anwendererklärung mit Festlegung der Ausführungsbestimmungen einzuholen.
3. Eine Verlängerung der befristeten Zulassung bzw. eine (allgemeine) Bauartzulassung ist bei der Zulassungsstelle mindestens 6 Monate vor Ablauf der Geltungsdauer mit den einschlägigen Unterlagen und dem Ergebnis der Betriebserprobung zu beantragen.
4. Für die Einsätze im Bereich des Transeuropäischen Eisenbahnnetzes (TEN) wird auf die Notwendigkeit einer Prüfung durch eine benannte Stelle hingewiesen.

Begründung:

Das Eisenbahn - Bundesamt ist aufgrund des § 3 des Gesetzes über die Eisenbahnverkehrsverwaltung des Bundes (Bundeseisenbahnverkehrsverwaltungsgesetz - BEVVG) vom 27.12.1993 (BGBl. I S. 2378, 2394), in Verbindung mit § 4 Abs. 2 des Allgemeinen Eisenbahngesetzes (AEG) vom 27.12.1993 (BGBl. I S. 2378, 2396, 1994 I S. 2339), jeweils in der aktuellen Fassung, zuständig für Baufreigaben, Abnahmen, Prüfungen, Zulassungen, Genehmigungen und Überwachungen für Einrichtung, Änderung, Unterhaltung und Betrieb der Betriebsanlagen der Eisenbahnen des Bundes.

Die Zulassung der Betriebserprobung kann erteilt werden, weil

- die Materialeigenschaften der Kunststoffschwelle im Vergleich zur Holzschwelle deutlich besser sind,
- bei sach- und qualitätsgerechter Ausführung der Arbeiten mit Qualitätsbaustoffen die Lagesicherheit des Gleises gewährleistet ist und die Lasten aus dem Eisenbahnbetrieb dauerhaft und sicher abgetragen werden,
- die bei der TU München, Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau, durchgeführten umfangreichen Labor- und Prüfstandsversuche gezeigt haben, dass keine technischen

und sicherheitsrelevanten Bedenken bestehen, die Kunststoffschwelle für Vollbahnen einzusetzen.

Die Zulassung wird zunächst nur befristet mit der Auflage zur Betriebserprobung erteilt, da es sich um eine neue, nicht betriebserprobte Schwellenart handelt. Dabei ist der Nachweis der mindestens gleichen Sicherheit wie bei Beachtung der anerkannten Regeln der Technik gemäß § 2 Abs. 2 der Eisenbahn- Bau - und Betriebsordnung (EBO) zu erbringen."

3.1.3 Herstellbarkeit von Kunststoffschwellen

Die technische Machbarkeit ergibt sich aus den Erfahrungen in der Profilextrusion.

Mit Versuchen auf einem Technikumsextruder sollte die Machbarkeit nachgewiesen werden. Hierbei handelte es sich um einen Einschneckenextruder, für den die Anforderungen recht hoch sind. Die Erfahrungen des Extruderherstellers führten dann auch zum gewünschten Erfolg.

Die Herstellung von Kunststoffschwellen macht jedoch nur Sinn, wenn das Preis-Leistungs-Verhältnis stimmt. Dieses lässt sich jedoch nur erreichen, wenn der Rohstoffpreis eine bestimmte Höhe nicht übersteigt.

Aus Kostengründen scheidet Primärkunststoff für die Herstellung aus, weshalb für die Produktion Sekundärrohstoff vorgesehen ist.

Dieser ist in ausreichenden Mengen in Deutschland und der EU vorhanden und ist in Bezug auf die Qualität mit Primärware vergleichbar.

3.1.4 Erwartungen von Eisenbahngesellschaften

Voraussetzungen für den Einbau von Kunststoffschwellen sind:

Die Schwellen müssen mit den vorhandenen Gleisbaumitteln – derzeit für Holzschwellen – einbaubar sein.

Unter verschiedenen Aspekten ist die Kunststoffschwelle der Holzschwelle überlegen, die Aufzählung der Aspekte setzt keine Prioritäten, diese muss der Netzbetreiber (Eisenbahn, U-Bahn, Straßenbahn usw.) selbst setzen:

- Die Kunststoffschwelle kann erneut werkstofflich verwertet werden.
- Die Kunststoffschwelle ist resistent gegen Umwelteinflüsse.
- Es geht keine Gefahr für den Boden von ihr aus.
- Sie kann nicht verfaulen.
- Es entstehen keine Entsorgungskosten, eventuell eine Vergütung für den dann zu gewinnenden Rohstoff.
- Es wird ein Teil der Körperschallschwingungen absorbiert.
- Die zu erwartende Lebensdauer beträgt etwa 50 Jahre und stellt damit eine nachhaltige Investition dar.

In den Berichten zum transeuropäischen Verkehrsnetz (TEN-V) wird auf den Erneuerungsbedarf und Neubau von Schienennetzen verwiesen.

3.1.5 Versuche durch PAV

Grundlage der Materialauswahl zur Eigenschaftsmodifizierung an Eisenbahnschwellen bildeten Untersuchungen mit Glasfasern sowie mit Glasfaservliesen an DSD-Kunststoffen.

Als Glasfaser – und Glasfaservliesmaterialien kamen Abfallprodukte der Fa. Schuller in Wertheim zur Anwendung.

Die DSD-Reggranulate wurden aus dem laufenden Produktionsprogramm eines Recyclers ausgewählt in Form von HDPE-Reggranulat, HDPE/PP-Reggranulat und PP-Reggranulat.

Die Ergebnisse zeigten beim Einsatz von Glasfaservliesen eine Erhöhung der Reißfestigkeit bei gleichzeitiger Erhöhung der Reißdehnung. Beim Einsatz von Glasfasern dagegen findet nur eine Erhöhung der Reißfestigkeit statt. Positiv beim Einsatz von Glasfaservliesen wirkten sich zudem sowohl der Anteil an Polyacetaten als auch Polyacrylaten auf die Verbesserung der Verträglichkeit von unterschiedlichen Kunststoffen aus. Dies war besonders beim Einsatz von DSD-Kunststoffen von Vorteil.

Störend beim Einsatz von Glasfaservliesen wirkten sich die Anteile an Harnstoff, Formaldehydharzen als auch Melaminharzen durch Geruchsanhaftung der fertigen Compounds aus.

Eine Recherche ergab, dass an Kunststoffen, im Besonderen an DSD-Kunststoffen, weltweit noch keine derartigen Untersuchungsergebnisse vorlagen.

Die in den Vortests aufgezeigten Ergebnisse fanden ihren Niederschlag in der Patentschrift DE 19503632 C1 vom 26.01.1995.

In den darauffolgenden Jahren wurde an praktischen Umsetzungsvorschlägen für die oben dargestellten Ergebnisse gearbeitet. Diese scheiterten entweder aus kostentechnischen Gründen oder aufgrund des Beigeruches der im Glasfaservlies enthaltenen Harnstoff-Formaldehydharz bzw. Melaminharzkomponenten.

Bei der Erarbeitung eines Konzeptes für die Realisierung des Projektes Eisenbahnschwelle flossen die Erkenntnisse aus den o.g. Untersuchungen mit ein, da zum Ersten beim Einsatz dieser Schwellen auch DSD-Kunststoffe zur Anwendung kamen und zum Zweiten es auch hier auf die Erreichung eines optimalen Niveaus der Eigenschaftskombination Reißfestigkeit-Reißdehnung ankam.

Auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse wurden im Jahre 2008 Fragen bezüglich der derzeitigen Verfügbarkeit von Glasfaservliesen sowie der chemischen Zusammensetzung der Vliese geklärt.

Ein Besuch bei der Fa. Schuller in Wertheim zeigte, dass es zwischenzeitlich Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Vliese in Richtung Polyacrylatanteil gab. Von der tonnagemäßigen Verfügbarkeit des Rohstoffes in Richtung der Entwicklung eigener Compounds einerseits und andererseits für die zukünftige Absicherung für das Projekt Bahnschwelle wurde PAV die Firma Woolrec in Tiefenbach empfohlen.

Die Fa. Woolrec erklärte sich bereit Probetonnagen zu fertigen, deren Zusammensetzung des Glasfaservlieses der aus den 90er Jahren nahekam. Die Probetonnagen wurden sowohl zur Compoundentwicklung als auch für Versuche in Richtung Bahnschwelle für das Fraunhofer ICT von der Fa. Woolrec zur Verfügung gestellt.

Als Grundlage hierfür dienten sowohl persönliche Gespräche vor Ort als auch im Hause PAV

Zur Compoundentwicklung wurde mit der Fa. Wallcover in Hildesheim Kontakt geknüpft. Diese Firma hatte bereits in den 90er Jahren ein Compound für Versuchszwecke im Auftrag der Firma Schuller in Wertheim hergestellt, welches bei der Firma Plastipack in Osterburken zur Anwendung kam. Ein Teil der Resttonnage wurde PAV für Versuchszwecke zur Verfügung gestellt. Zur Compoundentwicklung wurden von der PAV die Matrixkomponenten LDPE-Mahlgut natur MFI 2–3, PP-Mahlgut natur aus Kartuschen sowie HDPE-Mahlgut aus Flaschen bereitgestellt. Als Glasfaservlieskomponente kam das bereitgestellte Material der Fa. Woolrec zur Anwendung.

Die Technologieveränderung bei der Fa. Wallcover bis zum Jahre 2008 bewirkte, dass sich die Ergebnisse aus den 90er Jahren nicht mit der Technologie Planetwalzen – Scherwalzenextruder reproduzieren ließen. Es kam trotz Rezepturveränderungen ständig zur Verklumpung, so dass sich aus den Rohstoffen kein Glasfaservliescompound fertigen ließ. Die Versuche mussten nach mehrmaligen Ansätzen abgebrochen werden.

Daraufhin wurde im Rahmen von Versuchen mit gleichen Rohstoffen bei der Fa. Reichelt in Witzenhausen mit LDPE und PP als Matrixmaterial mittels der Technologie Spezialstopfwerk/Doppelschneckenextruder erfolgreich ein Compound mit der Zusammensetzung 50% GF-Vlies / 50% Matrixmaterial hergestellt. Das Compound auf LDPE-Basis kam bei der Fa. Lankhorst-NL zur Anwendung. Hier scheiterte das Ergebnis an der verkehrten Dosierung des Compounds, wodurch schlechtere mechanische Kennwerte als ohne Compound erreicht wurden.

Die Gründe liegen darin, dass das Compound trotz vorheriger Empfehlung als Konzentrat und nicht zu 10 – 15% gefahren wurde.

Das Compound auf PP-Basis kam bei der Fa. PURUS in Arzberg bei der Verbesserung von Reißfestigkeit und Reißdehnung bei Spezialpaletten zur Anwendung. Die Ergebnisse waren positiv.

Die großtechnische Anwendung scheiterte zum Einen an den Kosten und zum Zweiten am hierfür erforderlichen, jedoch bereits veräußerten Extruder.

Parallel liefen am Fraunhofer ICT in Pfinztal mit einer Probemenge Glasfaservlies (vorgegebene Rezeptur) der Fa. Woolrec Vorversuche zum Projekt Eisenbahnschwelle im Hinblick auf eine Rezepturoptimierung.

Das Fraunhofer ICT entschied sich letztendlich für die Realisierung des Projektes Bahnschwelle in der ersten Phase Glasfasergewebe und in der zweiten Phase reine Schnittglasfasern zu verwenden. Dies ist durch mikroskopische Aufnahmen zu begründen, welche bei Glasfaservlies unterschiedliche Schnittlängen im Vergleich zum Glasfasergewebe bzw. der Schnittglasfaser aufzeigten.

3.1.6 Materialauswahl

Ziel war es, durch den Einsatz von Polyolefin (PO) –Recyclat -Mischungen mit Glasfaserverstärkung als Faser bzw. Vliesen und Additiven die Entwicklung eines Compounds für die Herstellung von Extrusionsgroßprofilen zu ermöglichen.

Neben einer PE-Neuware wurden Altkunststoffe verschiedener Herkunft als Ausgangspunkt für die Materialentwicklung ausgewählt, von PAV beschafft und dem Fraunhofer ICT zur Verfügung gestellt. Die Kriterien für die Auswahl waren die Zusammensetzung (Anteil und Art thermoplastischer Kunststoffe), die Verfügbarkeit und der Preis. Für die Verstärkung der Compounds wurden sowohl Neuglasfasern als Referenz (Schnittglas und Endlosfasern vom Roving) sowie als Industrieabfälle anfallende Glasfasern getestet. Als Neuglasfasern wurde eine Ware gewählt wie sie üblicherweise zur Verstärkung von PP verwendet und vertrieben wird. Die verwendeten Sekundärstoffe sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

Tabelle 7: Verwendete Sekundärstoffe (Preise: Stand Juli 2009)

Altkunststoffe	
	<p>Polymer E Zusammensetzung: PE, PP Verfügbarkeit: hoch Preis: 300-350 €/Mg</p>
	<p>Polymer D Zusammensetzung: HDPE, PP Verfügbarkeit: hoch Preis: ca. 300 €/Mg (abh. vom Aufwand zur Abtrennung der Korke)</p>
	<p>Polymer MT Zusammensetzung: LDPE, HDPE, PP, PET, PVC Verfügbarkeit: hoch Preis: 50 €/Mg</p>



Polymer MN

Zusammensetzung: LDPE, HDPE, PP

Verfügbarkeit: hoch

Preis: 190 €/Mg



Polymer F

Zusammensetzung: LLDPE, LDPE, HDPE

Verfügbarkeit: hoch

Preis: 295-345 €/Mg


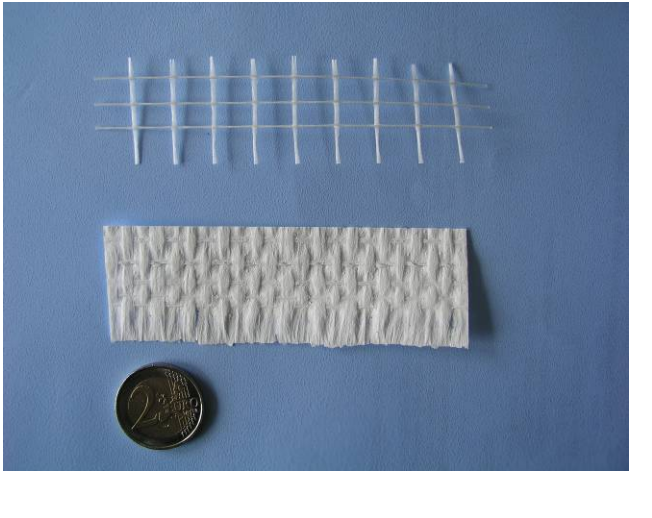



Polymer FK

Zusammensetzung: PE

Verfügbarkeit: hoch

Preis: 300-350 €/Mg

	<p>Polymer KF</p> <p>Zusammensetzung: HDPE</p> <p>Verfügbarkeit: mittel</p> <p>Preis: 600 €/Mg</p>
<p>Post-industrielle Glasfasern</p>	
	<p>Faserart GF-RC1</p> <p>Faserart GF-RC3</p>
	<p>Faserart GF-RC2</p>

Die Faserarten GF-RC1 und GF-RC3 wurden vor der Einarbeitung in die Compounds mit Hilfe einer Schneidmühle zerkleinert.

Weiterhin wurden Additive und ein Schäummittel eingesetzt. Als Additive wurden die Verwendung von Maleinsäureanhydrid (MAH) als Haftvermittler und von Recyclostab, Irganox

und Kreide als Temperaturstabilisatoren getestet. Als Schäumittel wurde ein Abfall aus dem Medizinbereich (technische Qualität) verwendet.

3.1.7 Compoundierversuche mit PE-Neuware als Referenzmaterial

Zunächst wurden Extrusionsversuche mit einer PE-Neuware und den verschiedenen Glasfaserqualitäten (Neuware und industrielle Reststoffe) durchgeführt. Hierbei sollte zum einen der Glasfasergehalt im Kunststoffmaterial optimiert werden und zum anderen ermittelt werden, welcher der industriellen Glasfaserreststoffe sich zur Verstärkung von Kunststoffen am besten eignet. Zusätzlich wurde getestet, ob der Zusatz von Maleinsäureanhydrid (MAH) als Haftvermittler zwischen Kunststoff und Glasfaser positive Auswirkungen auf die mechanische Stabilität der Compounds hat. Die Versuche wurden im Technikum des Fraunhofer ICT durchgeführt. Für das Compoundieren wurde ein gleichlaufender Doppelschneckenextruder Berstorff ZE 40 A (Schneckendurchmesser $D = 43 \text{ mm}$; $L/D = 33,5$) verwendet. Die Polymere wurden mittel gravimetrischer Waage (Brabender Flexwall) in den Einfülltrichter des Extruders zugegeben.

Mit Hilfe von statistischer Versuchsplanung wurde eine Versuchsmatrix zur Ermittlung des Einflusses von Glasfasergehalt und dem Gehalt an MAH auf die Festigkeit der Compounds erstellt. Aus den Compounds wurden Zugstäbe mit einer Spritzgießmaschine (ENGEL Schwertberg Austria, 1997) hergestellt. Für diese wurden E-Modul, Biegemodul, Biegebruchspannung, Schlagzähigkeit und Kerbschlagzähigkeit nach Charpy sowie die Wärmeformbeständigkeit (HDT) bestimmt und bewertet.

Es zeigte sich kein Einfluss des Additivs Maleinsäureanhydrid auf die Parameter E-Modul, Biegemodul, Biegespannung und Wärmeformbeständigkeit. Lediglich die Kerbschlagzähigkeit stieg für die Glasfasertypen Schnittglas, Roving und GF-RC1 in der Gegenwart von MAH geringfügig an. Für den Einsatz von MAH kann demnach nur ein geringer Vorteil gezogen werden. Aus diesem Grund wurde vom Konsortium entschieden, auf den weiteren Einsatz von MAH zu verzichten.

Die höchsten Werte für die Kennwerte E-Modul, Biegemodul, Biegespannung und Wärmeformbeständigkeit wurden für Glasfasern vom Roving erzielt, gefolgt von Schnittglas und den Produktionsreststoffen. Für die Schlagzähigkeit wurde die umgekehrte Reihenfolge erzielt. Dabei wurden für einen der Reststoffe fast die gleichen Werte erzielt wie für das Schnittglas. Durch Mikroskopaufnahmen der veraschten Compounds konnte die Eignung dieses post-industriellen Glasfasermaterials bestätigt werden (Vergleiche Abbildung 2 und Abbildung 3).

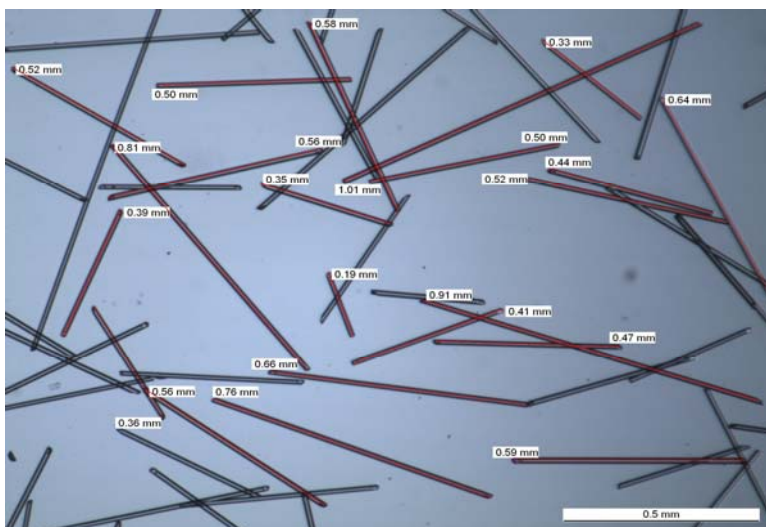


Abbildung 2: Schnittglas



Abbildung 3: Postindustrielle Glasfaser

3.1.8 Compoundierversuche mit Altkunststoffen

Neben der Verwendung der unvermischten Altkunststoffe wurden insgesamt 19 verschiedene Mischungen (M1 – M19) angefertigt. Diese wurden im Extruder granuliert und anschließend zu Zugstäben gespritzt. Durch die Bestimmung der mechanischen Kennwerte wurden die Mischungen beurteilt und einige für die Verwendung in der Technikumsanlage ausgewählt (Abbildungen 4 bis 6)

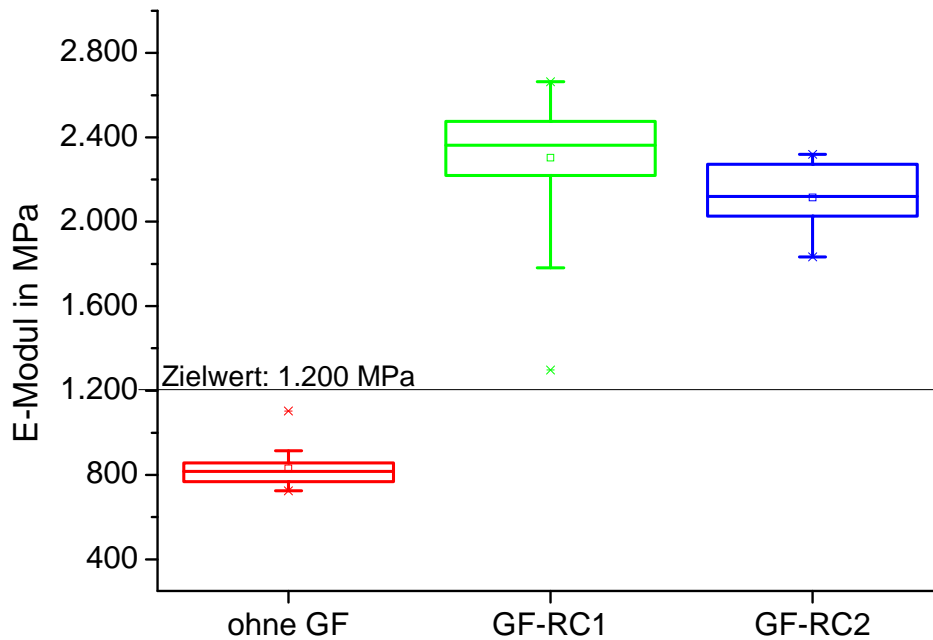


Abbildung 4: E-Module der MPW-Mischungen mit und ohne RC-Glasfasern

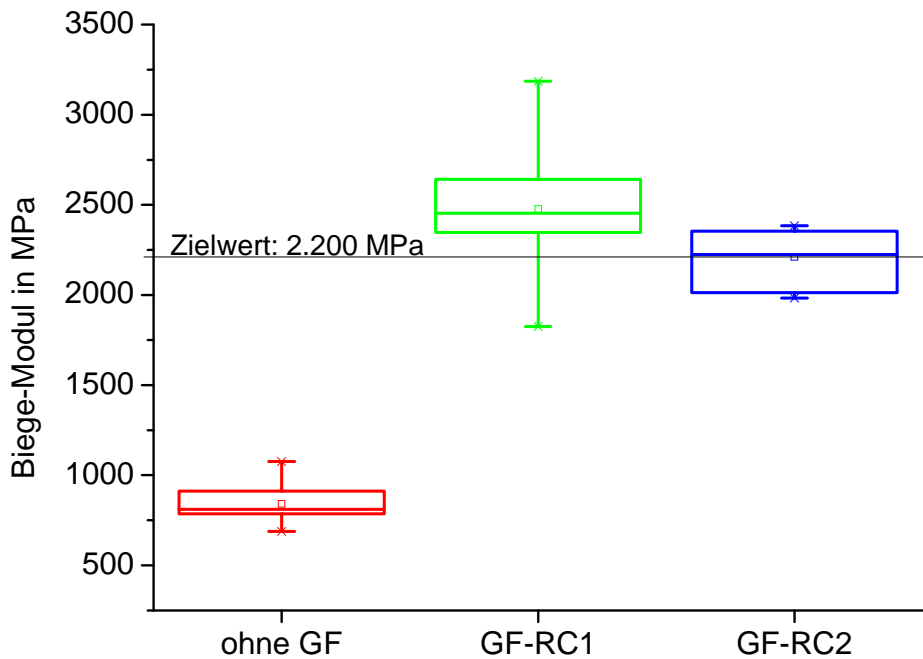


Abbildung 5: Biegemodule der MPW-Mischungen mit und ohne RC-Glasfasern

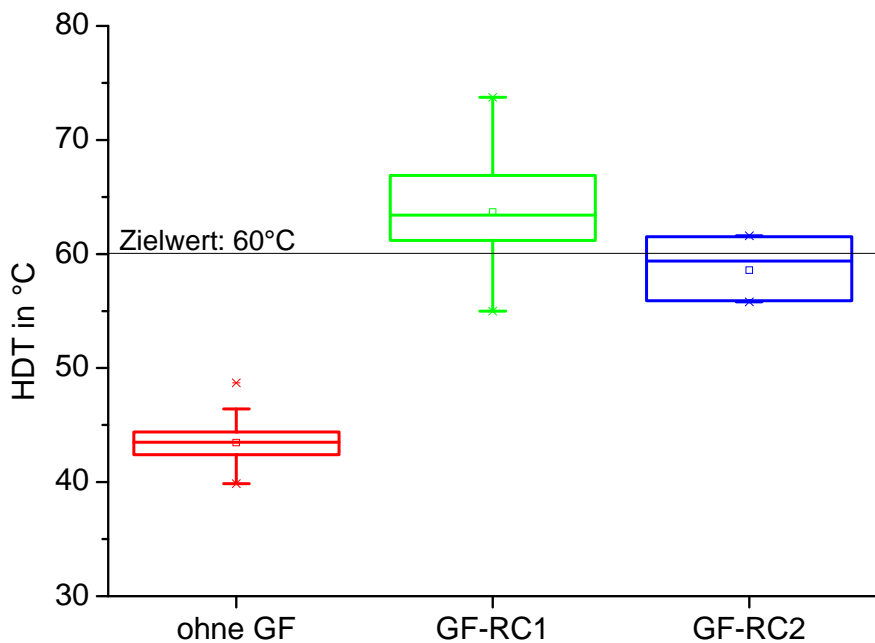


Abbildung 6: Wärmeformbeständigkeiten der MPW-Mischungen mit und ohne RC-Glasfasern

Die in Abbildung 4 bis Abbildung 6 eingezeichneten Zielwerte wurden aus bestehenden Patenten (Tabelle 8) bzw. für den HDT aus Erfordernissen der Deutschen Bahn abgeleitet. Aus den Abbildungen 4 bis 6 wird deutlich, dass ohne eine Verstärkung der Altkunststoffmischungen mit Glasfasern die Zielwerte nicht erreicht werden. Eine Glasfasertyp wurde bereits

aufgrund der Ergebnisse mit der PE-Neuware von den Versuchen mit den Altkunststoffmischungen ausgeschlossen. Die Compounds mit der als GF-RC1 bezeichneten postindustriellen Faser erzielten für alle Kennwerte die besten Ergebnisse.

Tabelle 8: Anforderungen für mechanische Kennwerte von Schwellenmaterialien aus Patentschriften

Parameter	Patent/Prozess	Minimum	Maximum	PAV-Tests	Beurteilung
E- Modul [MPa]	DE 43 17 494 A1	850	1250	1146-1357	gut
	WO 20030623119 A1	882,56	1282,47		
	Wo 9806778 A1 (Tietek)	1133,54			
	US 639 1456 B1	870,49	3953		
	US 2005031848 A1	1070,1			
Biegemodul [MPa]	WO 9808896 A1 (USPL)	2137, 45		1019,7-1168,8	ok
	WO 2000044828 A1(Polywood)	1172	1370		

Im Hinblick auf eine Erhöhung des HDT-Wertes wurde der Zusatz der Temperaturstabilisatoren Irganox B 900, Recyclostab 411 und OMYA-Kreide getestet. Es zeigte sich, dass keine signifikante Erhöhung des HDT-Wertes erreicht werden konnte, weshalb auf den weiteren Zusatz verzichtet wurde.

Anhand der Ergebnisse wurden für die Versuche bei NGR mehrere Mischungen aus Altkunststoffen mit der Faser GF-RC1 ausgewählt.

Die Versuche bei NGR zeigten, dass die Verwendung mehrerer Altkunststoffsorten nicht zu stabilen Versuchssträngen führte und eine starke Lunkerbildung stattfand. Um auszuschließen, dass die undefinierte Gasbildung durch die Feuchtigkeit des Ausgangsmaterials hervorgerufen wird, wurden am Fraunhofer ICT ca. 130 kg des Materials DSD 310 getrocknet und an NGR versandt. Auch mit dem getrockneten DSD-Material funktionierte die Schwellenextrusion nicht zufriedenstellend. Es wird vermutet, dass die unkontrollierbare Gasbildung während der Extrusion durch ausgasende Druckerfarben entsteht. Diese Ergebnisse schränkte die Auswahl der für die Bahnschwellenextrusion geeigneten Mischungen weiter ein. Im längeren Betrieb ergaben sich bei NGR Schwierigkeiten mit der Dosierung der 3-5 cm langen Glasfaser GF-RC1.

3.1.9 Versuche zur Verschäumung

Am Fraunhofer ICT wurden erste Versuche zur Schäumung der Altkunststoffe an einem Extruder mit einer Düse von 6 mm Durchmesser durchgeführt. Hierbei wurden Stränge mit einem Treibmittel-Gehalt von 0, 2 und 4% hergestellt. Die Abbildung 7 zeigt die Extruderdüse während eines Schäumversuches. Als schwierig gestaltete sich die gleichmäßige Einbringung des Treibmittels. Es bildeten sich in regelmäßigen Abschnitten Gaspolster so dass der Strang abbriss und das Material regelrecht ausschoss. Dementsprechend schwierig war es, die geschäumten Stränge zu vergleichen. Aufgrund des Versuchsverlaufs erschien es jedoch sinnvoll, für die Schäumung des Schwellenkerns die Treibmittelkonzentration nicht zu hoch zu wählen. Sie wurde auf 2% festgelegt.

Um die Charakteristik der Gasbildung näher zu beschreiben, wurde eine thermogravimetrische Untersuchung des Treibmittels durchgeführt. Hierbei wurde die Masseabnahme in Abhängigkeit

eines Temperaturprofils bestimmt. Die Masseabnahme kann dabei als proportional zur Gasbildung betrachtet werden. Aus den Abbildungen 8 und 9 wird ersichtlich, dass die Bildung von Gas bereits bei etwa 100 °C beginnt. Wird die Temperatur über einen längeren Zeitraum bei 100 °C gehalten, so nimmt die Treibmittel-Masse kontinuierlich ab.

Um eine gleichmäßige Verteilung der Poren im Schwellenprodukt zu erreichen, sollte das Treibmittel in die bereits heiße, geschmolzene Kunststoffmasse zudosiert und sehr schnell durchmischt werden.

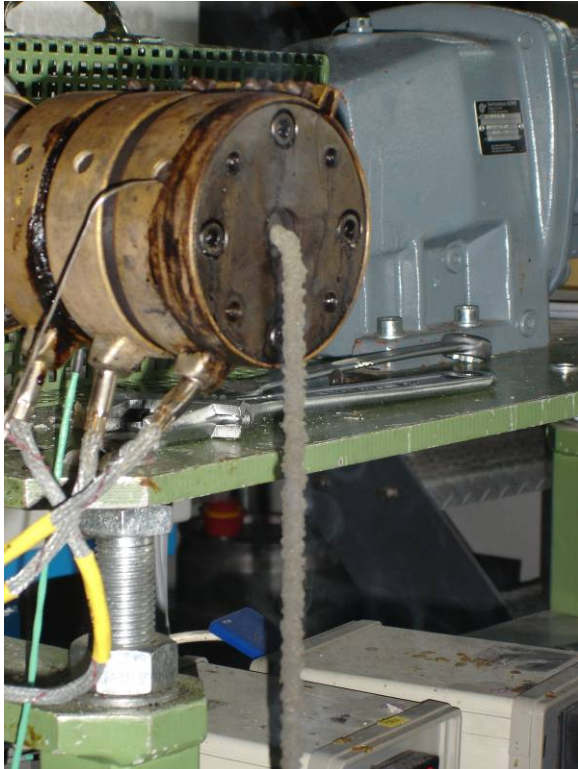


Abbildung 7: Schäumversuche: Extruderdüse mit austretendem Schaumstrang

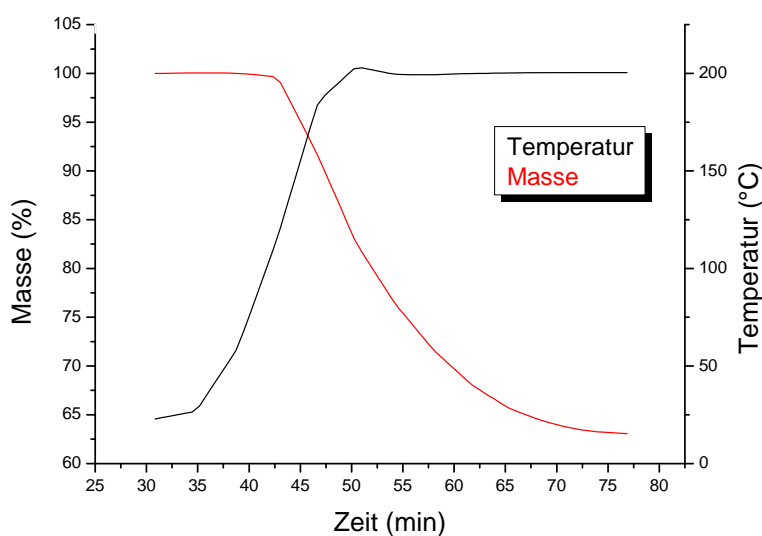


Abbildung 8: Thermogravimetrische Analyse des Treibmittels, kontinuierliches Temperaturprofil (Anheizgeschwindigkeit: 20 K/min)

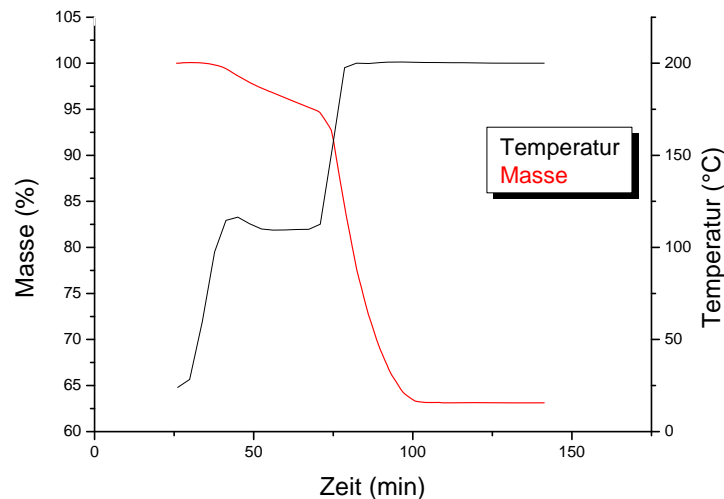


Abbildung 9: Thermogravimetrische Analyse des Treibmittels, Temperaturstufe bei 100 °C

3.2 Arbeitspaket 2: Verfahrensentwicklung

3.2.1 Anforderungen an die Versuchsanlage

Die Versuchsanlage wurde für die Herstellung von Bahnschwellen im Extrusionsverfahren ausgelegt. Ausschlaggebend für diese Entscheidung war, dass dieses Verfahren auch wirtschaftlich auf einer Großanlage angewendet werden kann. Ein weiteres Verfahren, das sich angeboten hätte, wäre die Herstellung der Bahnschwellen im Intrusionsverfahren. Da es sich jedoch hier um einen diskontinuierlichen Prozess handelt, bestanden Zweifel, ob eine durchgehende Homogenität und somit eine gleichmäßig hohe Qualität bei der Produktion der Bahnschwellen gewährleistet werden kann.

Ziel der Versuche waren die

1. Herstellung von Bahnschwellen mit einer Länge von 2,6 m, die den in späterer Folge in der Serie produzierten Schwellen in der Art und Form sehr ähnlich sind, um genaue Aussagen über physikalische Eigenschaften, wie Festigkeit oder Bearbeitbarkeit treffen zu können. Im Versuch bzw. nach eingehender Überprüfung der Bahnschwelle sollte sich die optimale Zusammensetzung von Kunststoff, Glasfaser und Treibmittel ergeben.
2. Ermittlung aller verfahrenstechnisch relevanten Parameter, wie Temperaturen, Abkühlgeschwindigkeit oder Kühlstrecke, um eine optimale Auslegung der Großanlage vornehmen zu können.

3.2.2 Aufbau der Versuchsanlage mit Prozessbeschreibung

In Abbildung 10 ist der Längsschnitt der gesamten Versuchsanlage, bestehend aus dem Extruder mit dazugehöriger Nachfolge gezeigt.

Die zu verarbeitenden Mahlgutflakes werden über eine Förderschnecke vom Silo zum Extruder transportiert. Um eine „Brückenbildung“ im Silo zu vermeiden, ist am Boden des Silos ein Rührwerk angebracht. Dadurch wird das Material im Inneren ständig in Bewegung gehalten und ein gleichmäßiger Austrag aus dem Silo sichergestellt. Über den Extrudereinzug besteht zusätzlich die Möglichkeit Glasfasern bis zu einer Menge von 30% mit Hilfe von Dosierschnecken dem Materialhauptstrom beizumengen.

Bei der Versuchsanlage kommt ein Einschneckenextruder zum Plastifizieren des Kunststoffes zur Anwendung. Hierbei ist der erste Abschnitt der Schnecke in drei Zonen unterteilt - die Einzugs-, Kompressions- und Meteringzone.

Der zweite Abschnitt, bestehend aus Entgasungs-, Kompressions-, Metering- und Mischzone hat im Wesentlichen die Aufgaben, die Schmelze zu entgasen, zu homogenisieren und den erforderlichen Druckaufbau für die nachfolgenden Einrichtungen, wie Düse, Kaliber und Nachfolge zu erzeugen. Die Entgasung der Schmelze erfolgt über eine Öffnung im Zylinder, die es erlaubt, die beim Extrusionsprozess entstehenden Gase bzw. Dämpfe abzusaugen.

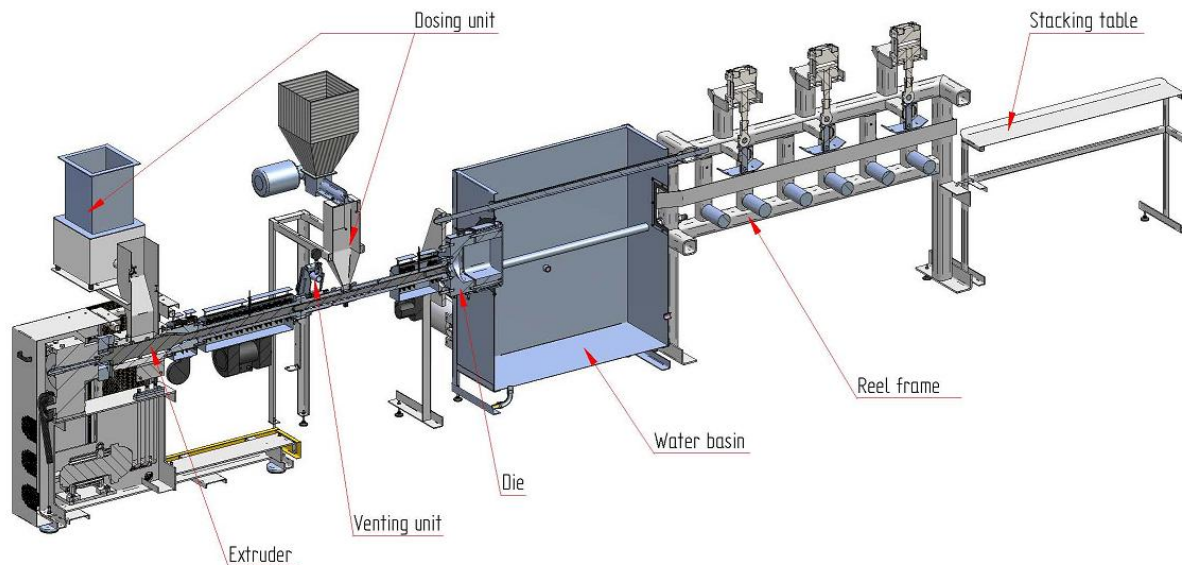


Abbildung 10: Längsschnitt der Versuchsanlage

Es wird davon ausgegangen, dass die Feuchte des Eingangsmaterials kleiner als 3% ist. Eine weitere Öffnung im Zylinder ermöglicht eine kontrollierte Zuführung weiterer Additive. Mit der Beimengung von Treibmitteln soll erreicht werden, dass das Endprodukt (Bahnschwelle) im Kern aufgeschäumt wird und somit das Gesamtgewicht um ca. 30-50% reduziert werden kann.

Alle Zonen am Extruder können beheizt bzw. gekühlt werden, mit Ausnahme der Entgasung, da hier keine Scherung und somit keine Energieeinbringung durch Reibung in die Schmelze zu erwarten ist. Außerdem ist jede Zone mit einem Temperaturfühler ausgestattet und mit Hilfe einer CPU kann die am Terminal eingestellte Temperatur für die einzelnen Zonen konstant gehalten werden.

In der nach dem Extruder aufgebauten Düse wird die Schmelze in die Querschnittsform der Bahnschwelle gebracht.

Die Außenhaut der Schmelze wird in der darauffolgenden Kalibrierung durch Wärmeabgabe stabilisiert.

Der nun bereits stabile Strang wird durch ein Wasserbad gedrückt, wo er mit Hilfe von Wasserdüsen weiter abgekühlt wird. Nach dem Wasserbad sollte die Abkühlung so weit fortgeschritten sein, dass der Strang weiterverarbeitet (abgelängt) werden kann.

Um den notwendigen Rückdruck für ein homogenes, lunckerfreies Endprodukt zu erhalten, befindet sich nach dem Wasserbad ein Rollengang, bei dem die oberen Platten nach unten gegen die bereits abgekühlte Bahnschwelle gedrückt werden können.

3.2.3 Versuchsläufe

3.2.3.1 Beschreibung der Materialien, der verfahrenstechnisch relevanten Bauteile und der Anlagen-Parameter

Ziel der Versuche war es, preiswerte, am Markt in großen Mengen verfügbare und für die Herstellung von Bahnschwellen geeignete Kunststoffe zu finden. In Tabelle 7 sind die bei den Testläufen verwendeten Materialien angeführt. Die Materialien wurden entweder einzeln oder vermischt für die Bahnschwellenherstellung eingesetzt. Eine geringfügige Kontamination mit Nichtkunststoffen (z. B. Druckfarben, organischen Stoffen, etc.) konnte nicht ausgeschlossen werden und verursachten in der Folge große prozesstechnische Probleme.

Neben den hohen dynamischen Kräften und Momenten sind die Bahnschwellen im Betrieb auch hohen thermischen Belastungen ausgesetzt. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, entschloss man sich, der Kunststoffschmelze Glasfasern beizumengen und somit die Festigkeit und die Formstabilität über einen Temperaturbereich von -20 °C bis 60 °C zu erhöhen.

Zunächst kamen die postindustriellen Glasfasern GF-RC1 (s. Kapitel 3.1.8) zum Einsatz. Diese wurden mit Hilfe einer Mühle vorzerkleinert. Daraus ergaben sich Glasfasern mit einer durchschnittlichen Länge von 40-60 mm, allerdings konnten längere Fasern mit einer Länge von bis zu 120 mm nicht ausgeschlossen werden. Diese langen Fasern stellten bei der Weiterverarbeitung ein erhebliches Problem dar. Beim Einsatz eines Siebes mit geringerer Lochweite in der Mühle konnte zwar die max. Faserlänge reduziert werden, jedoch entstanden dabei wollartige Gebilde mit einem Durchmesser von ca. 15 mm, die in der Dosiereinrichtung bzw. beim Einmischen in die Schmelze ebenfalls erhebliche Probleme verursachten.

Es konnte eine optimale Glasfaser-Konzentration im Produkt gefunden werden. Bei einem höheren Glasfaseranteil entsteht eine raue Oberfläche, wodurch ein ruckartiger Austrag des Kunststoffstranges aus dem Kaliber verursacht werden kann. Nebenbei ist der Einsatz von Glasfasern stets eine Frage der Kosten.

Um das Gewicht der Bahnschwelle zu reduzieren, war die Verwendung eines Treibmittels angedacht. In diesem Fall handelte es sich um einen pulverförmige Abfall aus dem medizinischen Bereich.

Verfahrenstechnisch relevante Bauteile bzw. Einrichtungen

Begonnen wurden die Versuchsläufe mit der Verarbeitung von Neuware aus HDPE-Kunststoff. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass hinsichtlich des Materials optimale Bedingungen für den Verarbeitungsprozess geschaffen wurden. Somit konnte einerseits die Abstimmung der verfahrenstechnischen Bauteile (Extrusionsschnecke, Düse, Kaliber, Ausführung der Kühlstrecke) vorgenommen und andererseits die für ein optimales Betreiben der Anlage notwendigen Parameter gefunden werden.

Durchsatzleistung

Die ersten Versuche wurden mit Durchsatzleistungen zwischen 10 und 20 kg/h durchgeführt. In weiterer Folge wurde die Anlage mit einer gleichbleibenden Durchsatzleistung von 20 kg/h betrieben, um Vergleiche mit den unterschiedlichen Materialien vornehmen zu können.

Nachdem eine die Herstellung einer über die gesamte Länge homogenen Bahnschwelle ermöglichende Materialmischung gefunden wurde, konnte beim letzten Versuchslauf ein Leistungstest an der Anlage durchgeführt werden. Dieser sollte die verfahrenstechnischen Grenzen aufzeigen. Bei Ausstoßleistungen über 30 kg/h waren die Kühlstrecke bzw. das Kaliber nicht mehr in der Lage die Wärmemengen ausreichend abzuführen und eine stabile Außenhaut des Kunststoffstranges zu bilden. Das Ergebnis war eine Bahnschwelle mit wellenartiger Form in Längsrichtung.

Dosiereinrichtungen für Glasfaser und Treibmittel

Die Glasfaser wurde dem Kunststoff im Bereich des Einzuges beigemischt. Die Dosierung erwies sich als außerordentlich schwierig, da es sich zum Teil um Fasern mit einer Länge von bis zu 120 mm handelte bzw. die Faser in einem wollartigen Zustand vorlag. Dadurch kam es immer wieder zu einer Verstopfung der Dosierschnecke und verhinderte eine gleichförmige Dosierung. Das Problem könnte durch die Vergrößerung des Durchmessers der Dosierschnecke behoben werden. Aufgrund der geringen Dosiermengen gestaltete sich dies jedoch als schwierig, da eine wesentliche Erhöhung des Durchmessers eine zu hohe Schwankung der Dosiermenge ergeben hätte. Für die weiteren Versuche entschloss man sich die Glasfasern manuell mit dem Kunststoffmahlgut abzumischen und anschließend gemeinsam mit Hilfe des Rührwerkes dem Extruder zu zuführen.

Das Treibmittel wurde der Kunststoffschmelze über eine Zylinderöffnung nach der Entgasung zugeführt. Auch hier traten anfänglich Probleme aufgrund der geringen Dosiermengen auf. Diese konnten jedoch durch ein spezielles Design der Dosierschnecke beseitigt werden.

Extruder

Die Extrusionsschnecke wurde für eine Durchsatzleistung von 10-40 kg/h ausgelegt.

Wie bereits oben erwähnt wurde für die Versuchsläufe eine mittlere Durchsatzleistung.

Die Temperaturen am Extruder wurden so niedrig wie möglich gehalten.

Entscheidend für das Erreichen einer optimalen Entgasung der Schmelze ist das vollständige Aufschmelzen des Materials vor der Entgasung.

Entgasung

Für die Erzeugung des Vakuums wurde eine Wasserringpumpe gewählt. Mit dieser Pumpe kann ein Vakuum von ca. 40 mbar erzeugt werden. Die Vakuumpumpe wurde bei allen Versuchsläufen eingesetzt, um die bei der Extrusion entstehenden Dämpfe und Gase abzusaugen zu können. Obwohl der Kunststoff vor der Entgasung bereits vollständig aufgeschmolzen und die Vakuumpumpe ausreichend dimensioniert war, kam es bei einigen Materialien zu einem nachträglichen Ausgasen während der Abkühlphase der Bahnschwelle und somit zu einer Lunkerbildung. Welche Stoffe dafür verantwortlich waren ist schwierig zu beantworten. Es kann davon ausgegangen werden, dass im Material noch Reste von Nicht-Kunststoffen bzw. Farbstoffen vorhanden sind. Der Einsatz einer zusätzlichen Entgasung könnte, unter der Voraussetzung einer ausreichenden Verweilzeit, eine Lösung für dieses Problem sein.

Kaliber und Kühlstrecke

Bereits nach den ersten Versuchsläufen wurde die Länge des Kalibers vergrößert, um ein Aufplatzen der Bahnschwelle unmittelbar nach dem Kaliber zu verhindern und somit einen prozesssicheren Betrieb gewährleisten zu können.

Die Temperatur des Kalibers ist ein Parameter mit entscheidendem Einfluss auf den Prozess. Eine zu niedrige Temperatur führt zu rauen und nicht vollständig geschlossenen Oberflächen. Ist die Temperatur zu hoch, kann nicht genügend Wärme abgeführt werden und es bildet sich eine relativ instabile Außenhaut. Dadurch kommt es zum Ausbeulen bzw. Aufplatzen der Bahnschwelle.

In der Kühlstrecke wird der Kunststoffstrang mittels Wasserdüsen weiter abgekühlt. Dabei ist die gleichmäßige Verteilung der Wasserdüsen am Umfang wichtig. Andernfalls wäre ein erheblicher Verzug durch eine inhomogene Temperaturverteilung an der Außenhaut die Folge.

Rollengang

Beim Rollengang stützt sich die Bahnschwelle auf den unteren Rollen ab. Gleichzeitig werden die darüber liegenden Platten auf die Bahnschwelle gedrückt, wodurch eine für die Formgebung der Bahnschwelle entscheidende und gegen die Förderrichtung wirkende Axialkraft entsteht. Der Druck kann manuell geregelt werden.

Bei einem zu geringen Anstelldruck wird die Düse bzw. das Kaliber nicht vollständig gefüllt und es bildet sich keine glatte und durchgehend geschlossene Oberfläche. Weiter entstehen beim Abkühlprozess im Kern der Bahnschwelle „shrink-holes“, die durch Erhöhen des Gegendruckes weitgehend vermieden werden können. Durch nachträgliches Aufgasen entstehende Hohlräume bzw. Lunker können dadurch nicht verhindert werden.

Ist der Anstelldruck zu hoch, besteht die Gefahr des Aufplatzens der Strangaußenhaut unmittelbar nach dem Kaliber.

Bei den folgenden Testläufen wurden verschiedene Materialkombinationen extrudiert

3.2.3.2 Testlauf 1

Versuchsmaterial: 100% HDPE-Neuware (Angaben in Massenprozent)

Dieses Material diente als Referenzmaterial, um die geeigneten Parametereinstellungen an der Anlage zu erhalten.

Anschließend wurde ein zuvor mehrfach aufbereitetes Mahlgut aus alten Heizöltanks eingesetzt.

Die Verarbeitung von diesem Mahlgut ergab einen sehr stabilen Prozess. Es waren keine Schwankungen am Extruderstrom zu erkennen.



Abbildung 11: Querschnitt der Probe 2 aus Testlauf 1

In der Abbildung 11 ist in der Mitte ein „shrink-hole“ zu erkennen mit einem Durchmesser, der vergleichbar ist mit einer 1 Euro-Münze. Grund hierfür war ein zu geringer Anpressdruck beim Rollengang. Während des Versuches wurde der Anstelldruck erhöht, dadurch konnten diese „shrink-holes“ fast zur Gänze vermieden werden.

Außerdem zeigt die Abbildung Ausbeulungen des Profils, was auf eine zu hohe Temperatur am Kaliber schließen lässt.

Grundsätzlich ist dieses Material sehr gut für diese Anwendung geeignet, es ist jedoch aufgrund der notwendigen Vorbehandlungen sehr teuer.

3.2.3.3 Testlauf 2

Im Querschnitt und im Längsschnitt (Abb.12; Abb.13) sind große Hohlräume zu erkennen, die sehr weit nach außen führen. Diese Hohlräume werden durch das Nachgasen des flüssigen Kerns während der Abkühlphase verursacht. Es besteht keine Homogenität und ist für die Herstellung von Bahnschwellen nicht geeignet.



Abbildung 12: Querschnitt der Probe 3 aus Testlauf 2



Abbildung 13: Längsschnitt der Probe 3 aus Testlauf 2

3.2.3.4 Testlauf 3

Testlauf 3 ergab ein ähnliches Ergebnis wie bei Testlauf 2. Das Material ist für die Extrusion nicht geeignet, da im Anschluss an die Vakuumentgasung in nicht reproduzierbarer Weise zu Lunkerbildung führende Gase entstehen. Der Grund für dieses anschließende „Nachgasen“ ist auf die Druckfarben zurückzuführen (Abb.14).



Abbildung 14: Querschnitt der Probe 4 aus Testlauf 3

3.2.3.5 Testlauf 4

Der Querschnitt zeigt ein relativ kompaktes Bild des Profils. Im Kern sind Poren bis zu einem Durchmesser von ca. 8 mm erkennbar (Abb.15).

Auch durch den Test mit einer Wärmebildkamera und das Aufschneiden in Längsrichtung (am Fraunhofer ICT) konnten keine größeren Hohlräume festgestellt werden. Diese Materialkombination wäre prinzipiell für eine Großprofilextrusion geeignet.



Abbildung 15: Querschnitt der Probe 5 aus Testlauf 4

3.2.3.6 Testlauf 5

Durch die Zugabe von Treibmittel erreicht man zwar einen feinporigeren Querschnitt, jedoch konnten ähnlich wie bei der Probe 5 Hohlräume nicht ausgeschlossen werden (Abb.16).



Abbildung 16: Querschnitt der Probe 6 aus Testlauf 5

3.2.3.7 Testlauf 6



Im Testlauf 6 ergaben sich große unregelmäßig über die Bahnschwelle verteilte Lunker (Abb.17; Abb.18). Demnach ist dieses Material ebenfalls nicht für diese Anwendung geeignet. Durch diese Lunkerbildungen ist es auch nicht möglich formgenaue Profile herzustellen, da es durch

die Inhomogenität zu einer unterschiedlichen Temperaturverteilung während der Abkühlphase und somit einem nicht zu verhindernden Verzug des Profils kommt.

3.2.3.8 Testlauf 7

Wie im Querschnitt und im Längsschnitt zu erkennen ist, entstanden bei der Verarbeitung dieses Materials keine größeren Lunker (Abb.19; Abb.20). Es ergaben sich nur im Innenbereich des Profils innerhalb eines Durchmessers von ca.120 mm glatte Poren mit einem Durchmesser von bis ca. 10 mm, die gleichmäßig über die Bahnschwelle verteilt waren.



Abbildung 19: Querschnitt der Probe 8 aus Testlauf 7



Abbildung 20: Längsschnitt der Probe 8 aus Testlauf 7

3.2.3.9 Testlauf 8

Die Ergebnisse ähneln denen des Testlaufs 6. In Abbildung 21 ist ein gravierender Verzug des Profils zu erkennen, der auf die erhebliche Inhomogenität der Bahnschwelle zurückzuführen ist.



Abbildung 21: Querschnitt der Probe 9 aus Testlauf 8



Abbildung 22: Längsschnitt der Probe 9 aus Testlauf 8

3.2.3.10 Testlauf 9

Das Verhalten dieses Materials entspricht denen des Testlaufs 8, jedoch war die Lunkerbildung ausgeprägter (Abb.23; Abb.24). Die Lunker reichten zum Teil bis in die Nähe der Außenhaut. Diese Materialmischung ist nicht geeignet für eine Verarbeitung in einer Extrusionsanlage.

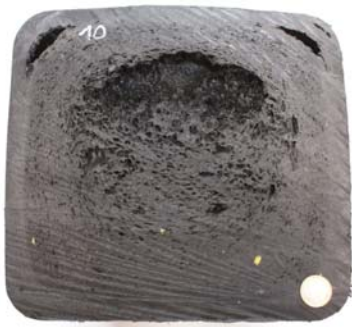


Abbildung 23: Querschnitt der Probe 10 aus Testlauf 9



Abbildung 24: Längsschnitt der Probe 10 aus Testlauf 9

3.2.3.11 Testlauf 10



Abbildung 25: Querschnitt der Probe 11 aus Testlauf 10



Abbildung 26: Längsschnitt der Probe 11 aus Testlauf 10

Der Versuchslauf ergab ein sehr kompaktes Profil mit einer glatten und geschlossenen Oberfläche (Abb.25; Abb.26). Im Inneren waren glatte Poren mit einem Durchmesser bis 10 mm mit einer gleichmäßigen Verteilung erkennbar. Lunker konnten keine festgestellt werden. Die Außenkontur entsprach der Rechteckform des Kalibers mit einer Geradheit von 3 mm/2,6 m. Der Schwund lag bei ca. 1%. Diese Materialmischung erwies sich als geeignet für die Anwendung.

3.2.4 Zusammenfassung

Die Versuchsläufe haben gezeigt, dass einige der eingesetzten Materialien nicht für die Herstellung von Bahnschwellen geeignet sind. Es kam bei diesen Materialien zu großen Lunkerbildungen, wodurch die für eine Bahnschwelle geforderten Festigkeiten, Formstabilitäten und Formgenauigkeiten nicht erreicht werden konnten. Grund für diese Lunkerbildungen ist die Kontamination des Kunststoffes mit Stoffen, die noch während der Abkühlphase im flüssigen Kern der Bahnschmelze zum Ausgasen neigen.

Sehr gute Ergebnisse wurden bei der Verarbeitung des Materials aus Testlauf 10 erzielt. Bei dieser Materialmischung war es möglich, eine sehr kompakte, homogene und formstabile

Bahnschwelle zu produzieren. Es waren keine größeren Hohlräume zu erkennen. Diese Materialmischung ist geeignet, Bahnschwellen mit gleichbleibend guter Qualität im Extrusionsverfahren herzustellen.

Musterschwellen dieser Zusammensetzung wurden an die Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) in Dresden und die Deutsche Bahn gesendet. Dort wurden die notwendigen Tests durchgeführt, um zu untersuchen, ob die Schwellen die notwendigen Anforderungen hinsichtlich Festigkeit und Bearbeitbarkeit erfüllen.

3.3 Arbeitspaket 3: Material- und Produktprüfungen

3.3.1 Untersuchung von Schwellenabschnitten mit Hilfe einer Wärmebildkamera

Ziel der Untersuchungen war die Identifizierung von Lunkern und deren Verteilung in den Mischkunststoffprofilen mit Hilfe eines thermographischen bildgebenden Systems (Wärmebildkamera). Hierzu wurde das jeweilige Profil über Nacht (min. 12 Stunden) in einer Klimakammer bei 50 °C temperiert. Anschließend wurde der Vorgang der Abkühlung mit einem FLIR ThermaCam Researcher 2001 verfolgt. In bestimmten Zeitabständen (15, 30, 45, 60, 90, 120 und 240 Minuten) wurden Fotos von vier Seiten des Profils aufgenommen. Die Materialzusammensetzung der Profile 1-3 waren jeweils unterschiedlich.

Es wird angenommen, dass Bereiche größerer Lunkeransammlungen aufgrund der darüberliegenden dünneren Kunststoffschichten schneller abkühlen und somit als kühlere Bereiche abgebildet werden. Es sollten sich also auch tiefer liegende Ansammlungen nach einer gewissen Abkühlungsdauer zeigen.

3.3.1.1 Profil 1

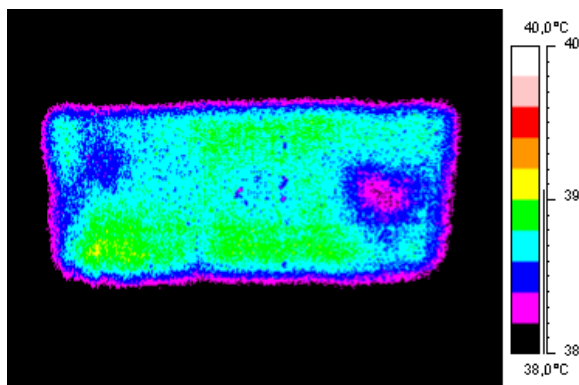


Abbildung 27: Oberseite (30 min)

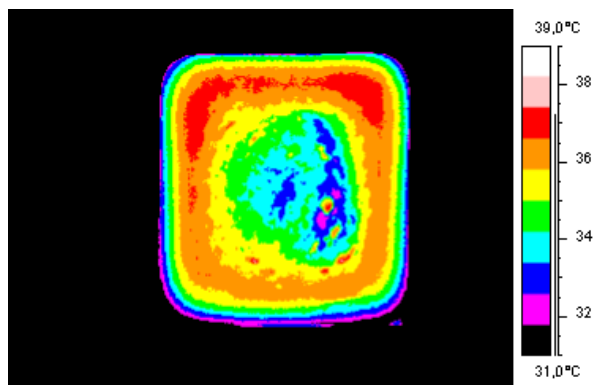


Abbildung 28: Linke Seite (30 min)

Länge: ca. 50 cm

Während bei den Aufnahmen längs des Profils (Abbildung 27) nur geringe Temperaturdifferenzen zu erkennen sind, ist quer zum Profil (Abbildung 28) eine deutliche Ungleichverteilung der Temperatur sichtbar. Diese stellt die Verteilung der Lunker an der Oberfläche gut dar.

Dennoch ergibt sich aus den Betrachtungen der Ober- und Unterseite des Profils, dass die rechte Seite ca. 1 K kühler war als die linke Seite. Weiterhin befinden sich an den Seiten des Profils Bereiche geringerer Temperaturen. Dies lässt auf größere Lunker in Oberflächennähe schließen. Eine Bestätigung dieser Annahme sollte durch ein Aufschneiden des Profils erreicht werden.

Im Anschluss an die Messungen mit der Wärmebildkamera wurden von dem Profil (von links) zwei Scheiben abgeschnitten (Abbildung 29 und Abbildung 30): Zuerst eine 4 cm starke Scheibe für die Glührückstandsanalyse und eine 8 cm starke Scheibe für Frost/Tau-Versuche.

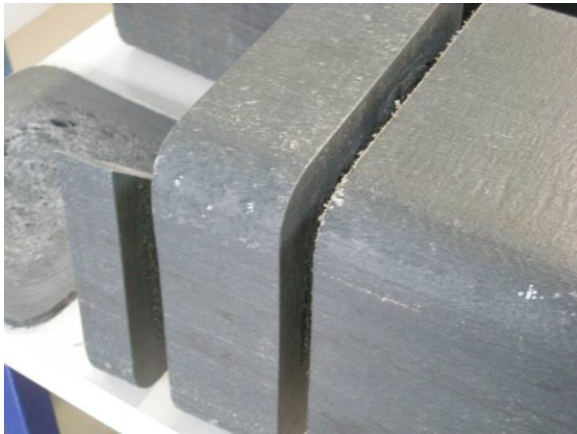


Abbildung 29: Profil 1 - abgeschnittene Scheiben



Abbildung 30: Profil 1 - Blick auf die Lunker

Bei dem Vergleich der abgeschnittenen Scheiben mit den thermographischen Aufnahmen wurde deutlich, dass zunächst kein direkter Zusammenhang zwischen den in Abbildung 30 erkennbaren Lunkern und dem kühlen Bereich auf der linken Seite von Abbildung 27 besteht. Obwohl relativ große Lunker sichtbar wurden, konnten diese der linken kühlen Stelle in Abbildung 27 nicht eindeutig zugeordnet werden.

Daraufhin wurde die Schwelle entlang der Längsachse in 4 Teile zerschnitten (Abbildung 31 und Abbildung 32).



Abbildung 31: Profil 1 - Schnitte von oben



Abbildung 32: Profil 1 - Teile nebeneinander

Deutlich wurde, dass der Bereich auf der rechten Seite, der sich in der Thermographie als deutlich kühler abgrenzen lässt, einen großen Lunker enthält (Abbildung 33, Abbildung 34 und Abbildung 35). Die raschere Abkühlung kann auf diesen Lunker und dessen Oberflächennähe zurückgeführt werden.

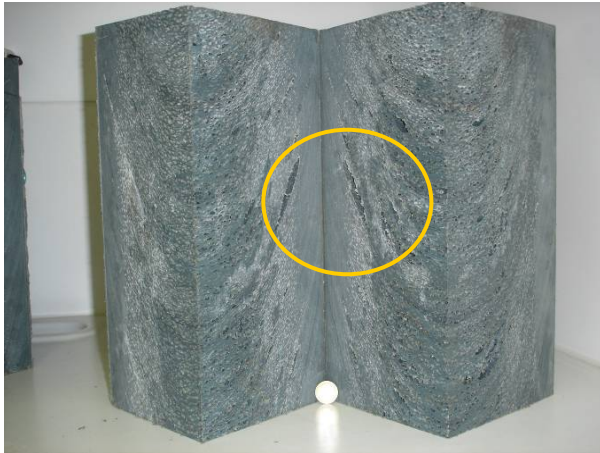


Abbildung 33: Profil 1 - Schnitt oben und vorne

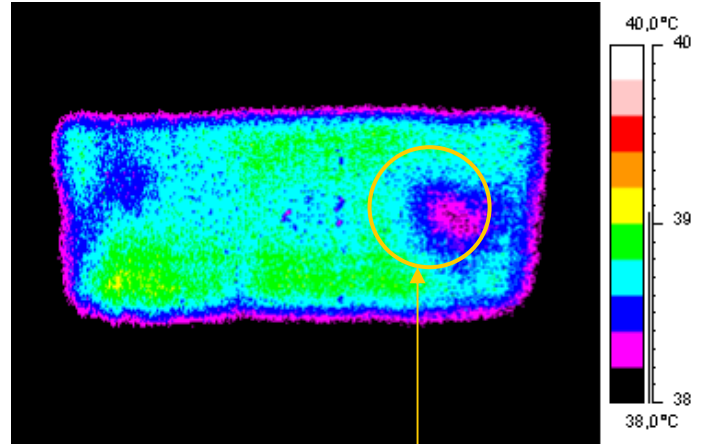


Abbildung 34: Profil 1 - Oberseite (30 min)

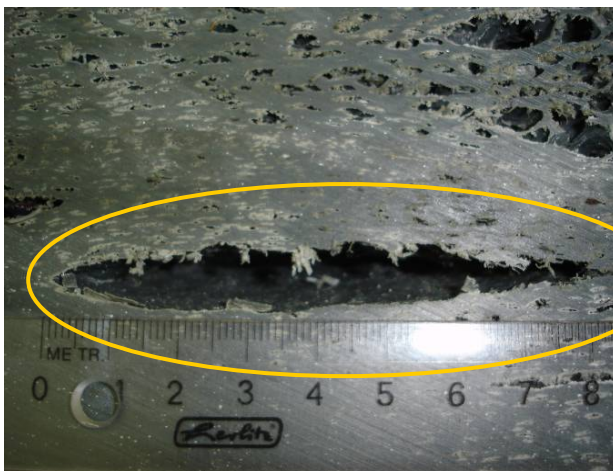


Abbildung 35: Profil 1 – Detail (Lunker)



Abbildung 36: Profil 1 - Lunker

Für den Vergleich der Thermographie mit der Photographie, müssen die von links bereits abgeschnitten Teile berücksichtigt werden, diese standen für den Schnitt durch die Längsachse nicht mehr zu Verfügung. Der ursprüngliche Schwellenabschnitt erstreckte sich bis zum Ende des abgesägten Teilstücks in Abbildung 29.

Der durch das Aufschneiden zu Tage getretene Lunker (Abbildung 36), kann nicht genau mit der thermographischen Aufnahme in Deckung gebracht werden. Er erstreckt sich allerdings noch einige Zentimeter in das Profil hinein.

3.3.1.2 Profil 2

Länge: ca. 50 cm

Schon zu Beginn des Versuchs wurde festgestellt, dass die Temperatur auf den Außenseiten über der Temperatur im Kern liegt. Das Profil wurde daher erneut über Nacht in der Klimakammer bei 50 °C gelagert.

Der warme Punkt in der Mitte (Abbildung 38) konnte als Metalleinschluss an der Oberfläche identifiziert werden. Da dieser die Wärme gut leitet, war er über den gesamten Zeitverlauf klar erkennbar.

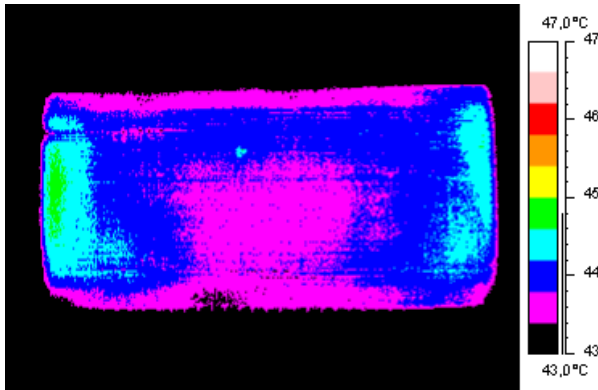


Abbildung 37: Profil 2 - Erstes Aufheizen

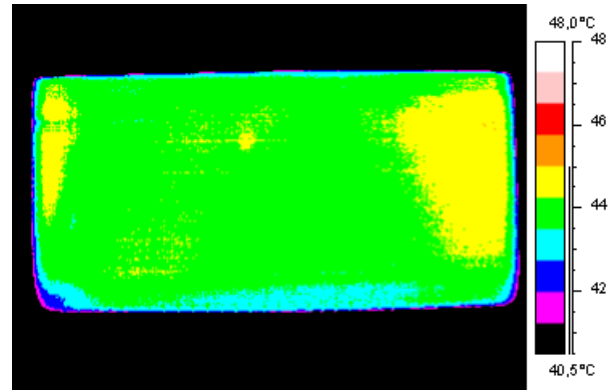


Abbildung 38: Profil 2 - nach dem zweiten Aufheizen

Des Weiteren wird deutlich, dass auch bei diesem Profil die Temperaturdifferenz entlang des Profils geringer war als im Querschnitt (Stirnseite) (Abbildungen 39 und 40).

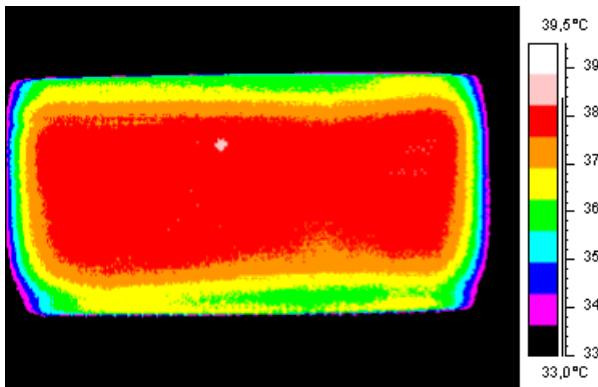


Abbildung 39: Profil 2 - Oberseite (30 min)

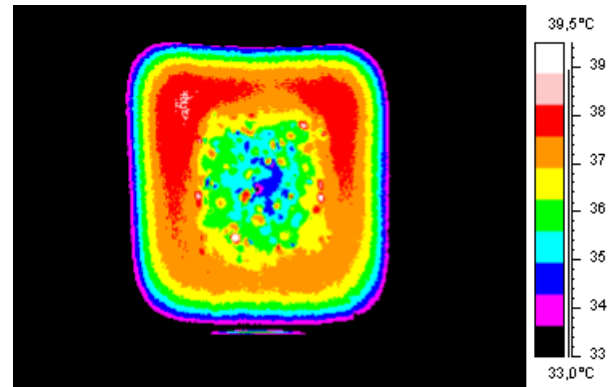


Abbildung 40: Profil 2 - Linke Seite (30 min)

Analog zum Profil 1 wurde auch Profil 2 längs in vier Teile zersägt. Wie erwartet wird aus den Abbildungen 41 und 42 eine relative Gleichverteilung der Lunker im Zentrum des Profils entlang der Längsachse deutlich.



Abbildung 41: Profil 2 - Teile nebeneinander



Abbildung 42: Profil 2 - Detail (Lunker)

Mit der Wärmebildkamera konnten nur Oberflächentemperaturen erfasst werden. Es ließen sich somit keine exakten Daten zur Größe und Verteilung von Lunkern über das gesamte Profil ermitteln. Es ist jedoch deutlich geworden, dass Bereiche mit größeren Lunkeransammlungen als kühlere Stellen in Erscheinung treten und dass die Thermographie daher als Mittel der Qualitätssicherung in der Schwellenherstellung genügt werden kann.

3.3.1.3 Profil 3:

Länge: 2,6 m

Es wurden zwei Profile dieser Zusammensetzung und Länge untersucht

Zunächst wurden die thermographischen Aufnahmen mit den bereits äußerlich erkennbaren Auffälligkeiten (z. B. Auswölbungen, die auf direkt unter der Oberfläche liegende Lunker zurückzuführen sind) verglichen.

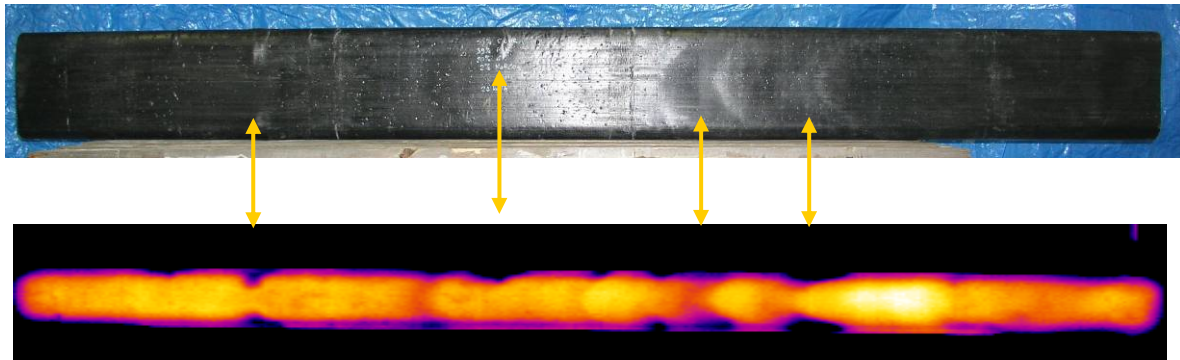


Abbildung 43: Schwelle 1

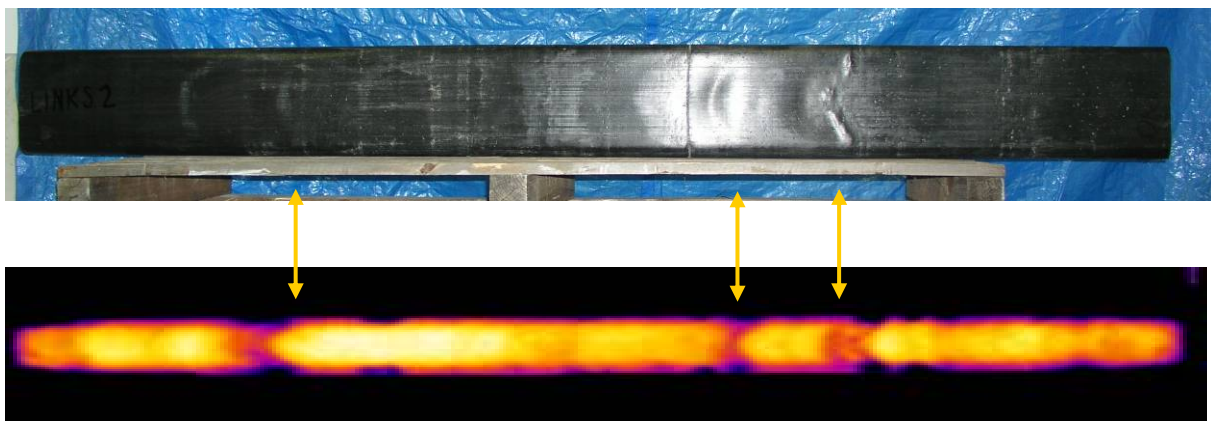
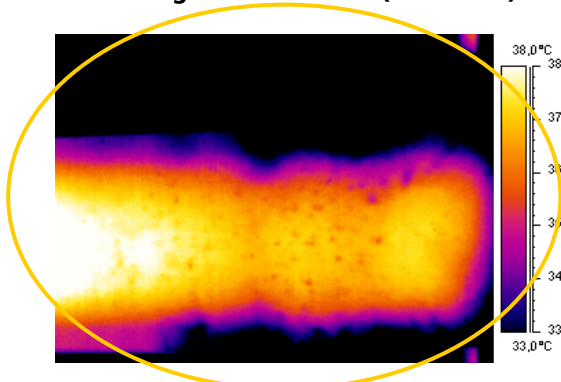


Abbildung 44: Schwelle 2

In Abbildung 43 und Abbildung 44 ist durch Pfeile kenntlich gemacht, dass ein Großteil der bei der Abkühlung und dem Vorschub während der Extrusion entstandenen und mit bloßem Auge erkennbaren Zeichnungen und Muster sich auch in den thermographischen Aufnahmen widerspiegeln.



Abbildung 45: Schwelle 2 (Rückseite)



Auch oberflächliche Blasen lassen sich bei näherer Betrachtung erkennen.

Weiterhin wurden die Thermographieaufnahmen hinsichtlich nicht direkt aus der Betrachtung der Oberfläche erkennbarer Auffälligkeiten ausgewertet.

Bei beiden untersuchten Bahnschwellen wird deutlich, dass die jeweiligen Unterseiten wenig Störstellen und ein recht homogenes Abkühlungsprofil aufweisen. Die Oberseiten dagegen zeigten häufig stärker ausgekühlte Bereiche. Weiterhin war die Temperatur der Unterseiten insgesamt trotz gleichem Abkühlungszeitraum höher als die der Oberseiten. Beide Beobachtungen lassen auf weniger Einschlüsse bzw. eine höhere Dichte schließen.

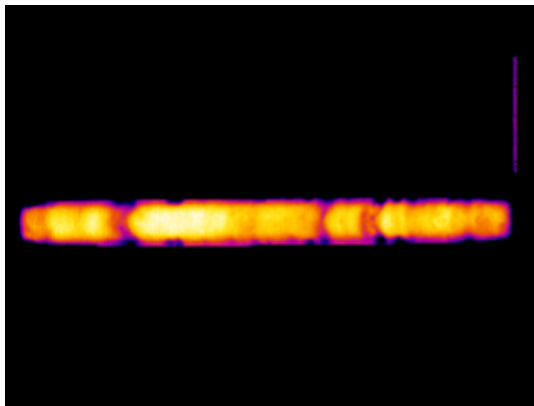


Abbildung 46: Schwelle 2 (oben 1h)

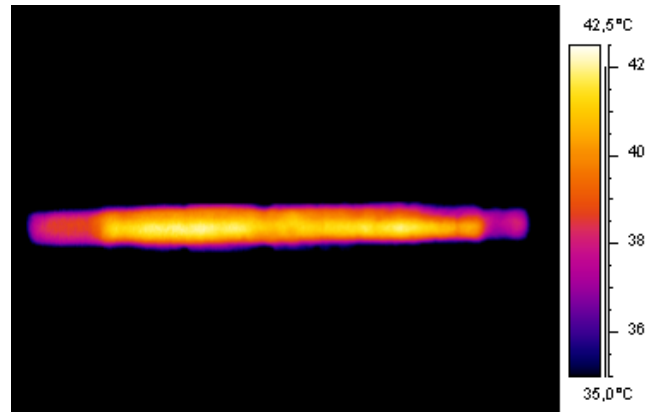


Abbildung 47: Schwelle 2 (unten 1h)

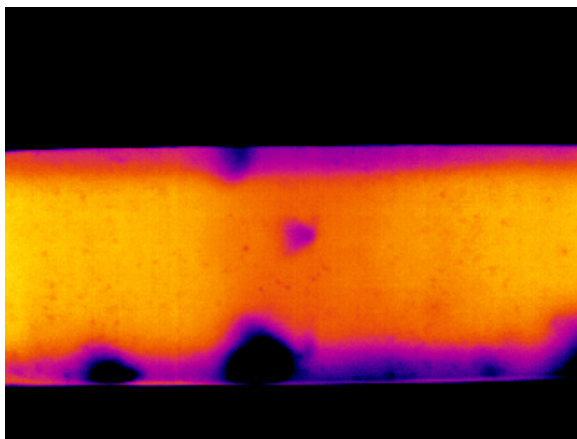


Abbildung 48: Schwelle 1 (hinten)

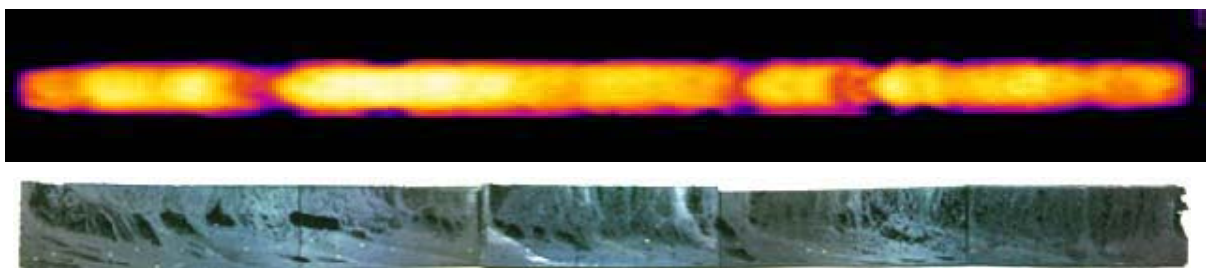


Abbildung 49: Schnittbild von Großprofil 2 und thermografische Aufnahme

In Anlehnung an das Vorgehen bei der Untersuchung der kleinen Profile wurde das Großprofil 2 ebenfalls zerschnitten. Dabei fanden sich in regelmäßigen Abständen vermehrt große Lunke. Diese lassen sich, wie in Abbildung 49 zu erkennen ist, gut in Deckung mit den thermografischen Aufnahmen bringen. Mehrfach sind langgezogene Lunke zu erkennen, welche sich bei näherer Betrachtung zum Teil weit in das Profil hinein erstrecken. Dies lässt sich

auf eine ungenügende Einmischung des Treibmittels während des Extrusionsprozesses zurückführen. Die Gasbildung findet dadurch vermehrt an lokalen Zentren statt und es bilden sich Gaskissen, die zum Teil sehr große Lunker bilden. Eine gute Durchmischung sollte stattdessen zu vielen kleinen Poren führen.

Bei der Extrusion ohne die Zugabe eines Schäummittels waren die Einzelporen zwar etwas größer, traten jedoch gleichmäßig und nur im Profilkern auf (vgl. Profil 2). Außerdem bildeten sich hier keine größeren Lunker.

3.3.2 Bestimmung der Homogenität der Glasfaserverteilung

Um festzustellen, ob die Glasfasern bei der Schwellenherstellung gleichmäßig im Extruder eingemischt werden, wurden Proben über den Querschnitt der Schwelle, wie in Abbildung 50 dargestellt, entnommen und der Glührückstand bestimmt.

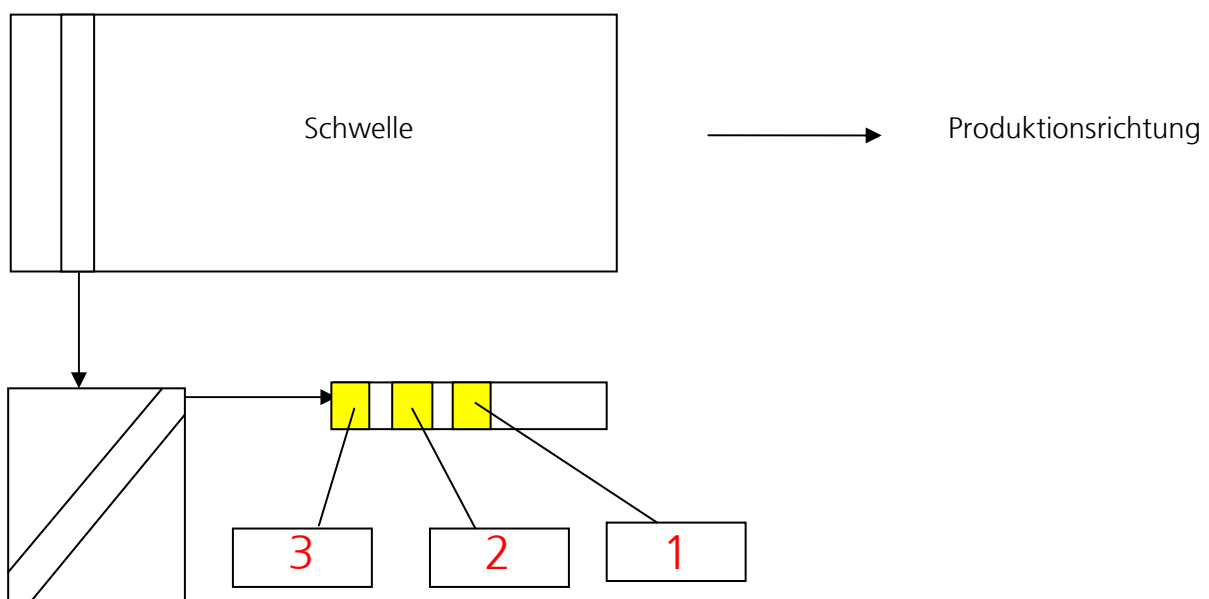


Abbildung 50: Schnittbild zur Probenahme bei der Bestimmung des Glührückstandes über den Schwellenquerschnitt (Profil aus Testlauf 5)

Es ergaben sich leichte Abweichungen im Glührückstand (Tabelle 9). Insgesamt kann die Homogenität aber als zufriedenstellend bezeichnet werden.

Tabelle 9: Glasfaserverteilung über den Schwellenquerschnitt

	Glührückstand in %
Probe 1 (Profilmitte)	15,1
Probe 2	17,5
Probe 3 (Profilrand)	14,9

3.3.3 Veränderungen der Porenstruktur durch Feuchtigkeit und Frost



Nach 1. Frost-Phase



Nach 12. Tau-Phase

Abbildung 51: Frost-Tau-Wechsel-Prüfung eines Schwellenabschnitts

Es wurde getestet, ob sich Feuchtigkeit und Frost auf die Struktur der Schwellen auswirken. Hierzu wurde ein Schwellenabschnitt der Dicke 10 cm Frost-Tau-Zyklen unterzogen und nach jedem Zyklus in Wasser eingetaucht. Anschließend wurde er aus dem Wasser entnommen, das Wasser abtropfen gelassen und mit Restfeuchte in eine Plastiktüte verpackt. Jeweils über Nacht wurde dann der Schwellenabschnitt bei -18°C eingefroren und am Morgen wieder aufgetaut. Abbildung 51: zeigt den Schwellenabschnitt nach der ersten und nach der 12. Frostphase. Auch nach 12 Frost-Tau-Wechsels konnte visuell keine Veränderung der Porenstruktur im Schwellenabschnitt festgestellt werden, so dass davon ausgegangen werden muss, dass bei den Bahnschwellen im Betrieb keine Frostschäden zu erwarten sind.

3.3.4 Schwellenprüfung

Nachdem die ersten Versuche zur Herstellung von Probeprofilen aus Mischkunststoffen wegen zu großer Lunkerbildung von allen Beteiligten verworfen wurden und somit auch Tests bezüglich der technischen Anforderungen an Bahnschwellen nicht sinnvoll gewesen wären, wurden nunmehr nach Gutbefund der beteiligten Forschungspartner die hergestellten Schwellenkörpern dem Zentrum für angewandte Forschung und Technologie e.V. an der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Dresden übergeben.

Hier wurden umfangreiche Tests unter Beachtung der einschlägigen DIN- und Baunormen an den Kunststoffschwellen durchgeführt.

In den Versuchen zeigte sich eine prinzipielle Eignung dieser Schwellen, es bedarf aber weiterführender Untersuchungen, insbesondere am Stützpunkt. Außerdem ist die Festlegung von Anforderungswerten für das spezielle Produkt Kunststoffschwelle erforderlich, da die Anforderungen an Betonschwellen auf Grund der Unterschiedlichkeit der Materialien nicht übertragbar sind und Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften von Holzschwellen nicht vorliegen.

3.4 Projektkoordination

3.4.1 Öffentlichkeitsarbeit

Durch die Verschärfung der Emissionsschutzverordnung per 31.12.08 und den Wegfall der Präferenzen für die DB ergeben sich etliche Veränderungen betreffend Emissionsberücksichtigungen (Lärm- Schall, Erschütterungen- Körperschall).

Bei der DB sowie anderen europäischen Bahnen werden im Rahmen der EU (auch von dort kofinanziert) viele Strecken erneuert oder neu gebaut, wobei der Einsatz der Kunststoffschwelle nur für spezielle Anwendungen wie Brücken, Weichen, Rangieranlagen, und Tunnel sowie dicht an Bauwerken in Frage kommt.

Besonders geeignet sind die Schwellen auch für Straßenbahnen durch Absorption von Körperschallschwingungen. Insbesondere für die neuen Flüstergleise (DB Bahn – Umweltzentrum, Dr. Michael Below, HU Berlin, Hans-Horst Bethge), die mit Rasen gefüllt werden, ergeben sich hier Vorteile.

Die neue Kunststoffschwelle ist weder für Fäulnis noch für Feuchtigkeit anfällig, wie Beton und Holz. Für U- und S-Bahnen haben die Kunststoffschwellen den Vorteil des geringen Gewichts gegenüber Beton und der Körperschallabsorption.

Im Rahmen des Projektes wurden neue Beziehungen zu verschiedenen Eisenbahngesellschaften aufgebaut. Mit der Deutschen Bahn in Nürnberg fanden verschiedene Vorversuche (Bearbeitungsverhalten der Kunststoffschwelle) am 11.12.2008 und mit der endgültigen Railwaste-Schwelle am 08.06.2010 statt (Die Prüfprotokolle sind als Anhang beigefügt). Die Prüfung der Railwaste-Schwelle im Juni 2010 wurde begleitet von Andreas Stolzenberg (ICT), Hans-Joachim Brauer (PAV), Josef Hochreiter, Günter Kroiß (NGR), Heinrich Dratwa (DB Systemtechnik), Christian Suhren, Frank Wanke und Richard Baum (DB Netz AG). Das Interesse bei der DB an der Kunststoffschwelle ist sehr hoch. Sie könnte die Holzschwellen im Bereich von Brücken Tunneln und Weichen ersetzen. Voraussetzung ist auch hier die Zulassung bzw. die Versuchszulassung für Testzwecke.

Intensive Kontakte zur PKP (Polnische Eisenbahn) bestehen und werden weiterhin gepflegt.

Die Zulassung bei der DB ist Voraussetzung einer Prüfung des Einsatzes bei der PKP.

Informationen über die ausgeschriebenen Strecken erhält PAV nach Zulassung.

Interesse besteht außerdem bei der ungarischen und irländischen Staatsbahn.

Die Rheintalgruppe ist interessiert, dass die Trassen mit schallabsorbierenden Schwellen erneuert werden.

Bahnen mit eigenen Gleisen sind interessiert, insbesondere wenn die Streckenführung in Gebäudenähe trassiert ist.

Die Langlebigkeit und die Schallabsorption ist ein entscheidendes Verkaufsargument.

Die Ergebnisse der Tests in Dresden veranlassten die PAV die Schwellen zur weiteren Prüfung der Deutschen Bahn zur Verfügung zu stellen. Sollten die Ergebnisse zufriedenstellend ausfallen, kann die Planung für eine Produktion von Schwellen seitens der PAV für eine Teststrecke aufgenommen werden.

Zum Einsatz würden dann HDPE aus Abfällen kommen um eine Qualität wie bei den zuletzt produzierten Forschungsschwellen zu erreichen. Abfälle dieser Art stehen im ausreichenden Maße zur Verfügung. Ebenso verhält es sich mit der Schnittglasfaser. Der Einsatz von Mischkunststoffen wurde verworfen, da die Lunkerbildung zu groß ist.

Weitere notwendige Prüfungen für die Marktreife der Schwelle sind erforderlich. Die Veröffentlichung der Ergebnisse ist auf einem Workshop in Berlin geplant. Zu diesem Treffen werden auch Vertreter von Netzbetreibern erwartet.

Das im folgenden Kapitel dokumentierte Memo⁵ unterstreicht die ökonomischen und ökologischen Möglichkeiten einer neuen Kunststoffschwelle.

3.4.2 Inhalt Memo TEN-V

Die EU hat unter Präsidentin Loyola de Palacio Daten für das „Transeuropäische Verkehrsnetz (TEN-V)“ erarbeitet.

Demnach sind 78.000 km Schienenstrecken in TEN-V erneuerungsbedürftig und werden von der EU finanziell unterstützt. Dies betrifft nur die alte EU-Mitglieder-Liste. Die Mitgliedslisten sind im Anhang aufgeführt.

Vorrangige Vorhaben

Die Gruppe hat eine Reihe neuer vorrangiger Vorhaben und anderer wichtiger Vorhaben ermittelt, die für die Erleichterung des grenzüberschreitenden Austauschs im Binnenmarkt entscheidend sind und die Intermodalität im Hinblick auf den territorialen Ausgleich in der erweiterten Union fördern.

Wichtig ist, zwischen der Vorrangigkeit und der Förderfähigkeit durch Finanzmittel der Gemeinschaft zu unterscheiden. Die Förderfähigkeit ist für jedes Finanzierungsinstrument gesondert geregelt und wird von Fall zu Fall geprüft. Zahlreiche andere Projekte, die nicht in den Bericht der Gruppe aufgenommen wurden, sind nicht minder wichtig und werden durchaus förderfähig sein. Es müssen jedoch Auswahlentscheidungen getroffen werden.

Die Gruppe empfiehlt der Kommission, sich bei den vorrangigen Vorhaben auf zwei Hauptziele zu konzentrieren: fünf der vierzehn vorrangigen Vorhaben, die 1994 von der Christophersen-Gruppe festgelegt und von den Tagungen des Europäischen Rats in Essen und Dublin bestätigt worden waren, bis 2010 fertigzustellen und 22 neue vorrangige Vorhaben, die bis 2020 abgeschlossen sein sollen, zu beginnen.

Auswahlkriterien

Alle ausgewählten Vorhaben mussten

- auf einer transeuropäischen Hauptachse des erweiterten Europa liegen, wobei besonders natürliche Barrieren, Überlastungsprobleme und fehlende Verbindungen berücksichtigt wurden.
- eine europäische Dimension aufweisen und ein Volumen von 500 Mio. € überschreiten.
- potentielle wirtschaftliche Bestandsfähigkeit und andere sozioökonomische Vorteile aufweisen
- von den betreffenden Mitgliedstaaten gemäß Zusage innerhalb eines vereinbarten Zeitrahmens fertiggestellt werden.

Als zusätzliche qualitative Kriterien galten:

- der europäische Zusatznutzen des Projekts hinsichtlich seiner Bedeutung für die Erleichterung des Austauschs zwischen Mitgliedsstaaten.
- Stärkung des Zusammenhalts

⁵Erstellt vom Referat Information und Kommunikation der Generaldirektion Energie und Verkehr.

- Beitrag zur nachhaltigen Verkehrsentwicklung unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten und des Umweltschutzes durch die Förderung der Intermodalität.

Vorgeschlagene Liste vorrangiger Vorhaben

Liste 1: neue und eindeutig definierte Prioritäten mit einem hohen europäischen Zusatznutzen sowie hinsichtlich der Finanzierung und des rechtzeitigen Baubeginns realistisch sind. Wichtige Abschnitte von sechs Projekten von Essen wurden in diese neuen vorrangigen aufgenommen. Die Länder haben fest zugesagt mit den Arbeiten in allen Abschnitten dieser Vorhaben spätestens 2010 zu beginnen, um sie spätestens 2020 betriebsbereit fertigzustellen.

Liste 2: Vorhaben mit einem besonders hohen europäischen Zusatznutzen, die zwar für einen längeren Zeitrahmen ausgelegt sind, aber ein besonderes Augenmerk verdienen.

Liste 3: für den territorialen Zusammenhalt wichtige Vorhaben, die zu den Zielen des wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Zusammenhalts beitragen.

Liste 1

1. GALILEO
2. Beseitigung von Engpässen auf Rhein-Main-Donau
3. Hochgeschwindigkeitsseewege
4. Schienenstrecke für Güter-/Personenverkehr Lyon-Triest/Koper-Ljubljana-Budapest
5. Schienenstrecke für Güter-/Personenverkehr Berlin-Verona-Neapel/Mailand-Bologna
6. Schienenstrecke für Güter-/Personenverkehr griechisch-bulgarische Grenze-Sofia-Budapest-Wien-Prag-Nürnberg
7. Hochgeschwindigkeits-Schienenstrecke Südwest
8. Schienenstrecke für Güter-/Personenverkehr Danzig-Warschau-Brünn/Zilina
9. Schienenstrecke für Güter-/Personenverkehr Lyon/Genua-Basel-Duisburg-Rotterdam-Antwerpen
10. Schienenstrecke für Güter-/Personenverkehr Paris-Straßburg-Stuttgart-Wien-Bratislava
11. Interoperabilität des Hochgeschwindigkeitszugnetzes der iberischen Halbinsel
12. Eisenbahn/Straßenbrücke über die Straße von Messina
13. Feste Querung (Schiene/Straße) Fehmarnbelt

Liste 2

1. Neue Pyrenäen-Eisenbahnquerung mit hoher Kapazität
2. Rail Baltica: Helsinki-Tallin-Riga-Kaunas-Warschau
3. Schienegüterverkehrsstrecke Danzig-Bydgoszcz-Kattowitz-Zwardon

Liste 3

1. Netzzugänglichkeit und Netzverbund

- Schienenstrecke Bari-Durres-Sofia-Varna/Bourgas (Schwarzes Meer)
- Schienenstrecke Neapel-Reggio Calabria-Palermo

2. Grenzüberschreitende Verbindungen

- Schienenstrecke Prag/Linz
- Schienenstrecke Maribor-Graz

Die Gruppe ermittelte auch eine Reihe von Verbindungen zu Drittländern, die für die Entwicklung des Außenhandels der Europäischen Union und zur Verbesserung der Transitbedingungen für einige der neuen Mitgliedstaaten von Interesse sind. Folglich empfiehlt die Gruppe diese Verbindungen auszubauen, insbesondere mit Hilfe struktureller Finanzinstrumente für Abschnitte im Gebiet der Europäischen Union oder im Rahmen von Transit- oder Assoziierungsabkommen zwischen der Gemeinschaft und den betreffenden Drittländern bei Abschnitten außerhalb der Union.

Den Ausbau des transeuropäischen Netzes erleichtern

Die von der Gruppe ausgewählten vorrangigen Vorhaben sind mit einem Finanzierungsbedarf von rund 235 Mrd. € ab jetzt bis 2020 verbunden. Die Gesamtkosten des Netzes (vorrangige Vorhaben und andere Vorhaben) werden auf über 600 Mrd. € geschätzt.

Die Investitionen zur Durchführung der empfohlenen vorrangigen Vorhaben machen durchschnittlich 0,16% des BIP aus. Es handelt sich jedoch dabei um maßgebende das Wachstumspotential der Wirtschaft stärkende Produktivinvestitionen. Die Entscheidungsträger sind in diesem Zusammenhang darauf aufmerksam zu machen, welche Inkongruitäten auf lange Sicht zwischen dem, was bei der Durchführung dieses Vorhabens auf dem Spiel steht, und den Sparzwängen, die eine öffentliche Finanzierung begrenzen, bestehen. Die Gruppe hat deshalb auch Empfehlungen zur Finanzierung vorgelegt.

- Die Haushaltsbehörden sollten eine entsprechend Mittelzuweisung für den Zeitraum 2007-2013 vornehmen. Die Mittel müssen ausreichende Anreizwirkung entfalten und auf vorrangige Vorhaben konzentriert werden.
- Erhöhung des Anteils der Gemeinschaftsfinanzierung bei grenzübergreifenden Projekten. Nach Auffassung der Gruppe sollte ein System erwogen werden, das eine stärkere Differenzierung des Finanzierungsanteils je nach dem Nutzen für andere Länder erlaubt, vorrangig zur besseren Unterstützung grenzübergreifender Projekte. Der Vorschlag der Kommission, den Anteil der TEN-Haushaltsmittel bei bestimmten wichtigen grenzübergreifenden Abschnitten von 10% auf 20% zu erhöhen, ist als Mindestmaß anzusehen und sollte noch einmal überprüft werden.
- Die Finanzierungskapazität der Europäischen Investitionsbank könnte durch verschiedene finanztechnische Maßnahmen erhöht werden, insbesondere durch die Schaffung der neuen TEN-Investitionsfazilität mit einem Umfang von bis zu 50 Mrd. € für grenzübergreifende Projekte, was die Gewährung langfristiger Darlehen ermöglichen würde.
- Öffentlich-private Partnerschaften sollten gefördert werden. Ein entsprechender rechtlicher Rahmen, insbesondere hinsichtlich der Konzessionsrechte und der Entgelte für die Infrastrukturnutzung, muss auf Gemeinschaftsebene geschaffen werden. Neue Garantiemechanismen sollten eingerichtet werden. Dies kann z. B. in Form eines Risikofonds auf Gegenseitigkeit, um unter anderem die Risiken einer Verzögerung oder Nichtfertigstellung bestimmter Abschnitte abzudecken und so die Bestandsfähigkeit eines Projekts zu sichern.

Die nächsten Stufen des Netzaufbaus vorbereiten

Von der Gruppe wurden vorrangig die den grenzüberschreitenden Verkehr auf den transeuropäischen Hauptachsen am stärksten fördernden Vorhaben ausgewählt. Zusätzlich sind diese durch einen großen, aus geographischen oder wirtschaftlichen Gründen unvermeidlichen Verkehrsfluss gekennzeichnet. Die Ermittlung und Benennung dieser Achsen erleichtert den Prioritäten eine Rangfolge zuzuordnen und die einzelstaatlichen Pläne aufeinander abzustimmen. Diese anfängliche Benennung sollte durch eine detailliertere Analyse der

Verkehrsflüsse in einer europäischen Union von 27 Ländern sowie durch die Festlegung eines Kernnetzes unter Einschluss dieser Achsen ergänzt werden. Dies wird ein unabdingbares Werkzeug für die Begleitung der empfohlenen vorrangigen Vorhaben und die künftige Überarbeitung der Liste sein.

Eine ähnliche hochrangige Gruppe sollte regelmäßig eingesetzt werden und sich der Synchronisierung dieser Arbeiten mit der periodischen Überprüfung der finanziellen Vorausschau der Gemeinschaft annehmen, um den bei den vorrangigen Vorhaben erzielten Fortschritt zu bewerten, die Aufnahme neuer Vorhaben in die Liste oder die Streichung von zu sehr verzögerten Vorhaben aus der Liste zu erwägen. Die Gruppe regt eine Abhandlung dieser Punkte für 2010 an.“

4 Zusammenfassung

Eisenbahnschwellen werden als ein Teil der Gleisanlage verwendet, um die Schienen in einem definierten Abstand zu halten und um mechanische Belastungen auf das Gleisbett zu übertragen. Damit sind die wichtigsten Eigenschaften der Schwellen eine definierte Geometrie (typische Abmessungen sind ca. 2,6 m x 0,3 m x 0,2 m), Witterungsbeständigkeit, mechanische Belastbarkeit und geringe Wartungskosten. Bis heute werden Schwellen hauptsächlich aus Holz, Beton oder zu einem geringen Teil aus Stahl gefertigt. Das Ziel des Projektes war es, die Machbarkeit von Bahnschwellen aus einer intelligenten Mischung verschiedener Abfallströme zu zeigen. Der Einsatz von Mischkunststoffabfällen (MPW) als Matrixmaterial ist ein Beitrag zur nachhaltigen Nutzung von Sekundärrohstoffen. Die Kombination von MPW mit Glasfasern für die Verstärkung der Schwellen wurde als Grundlage für die Optimierung der Materialeigenschaften wie Festigkeit, Temperaturbeständigkeit und Langzeitstabilität gewählt. Im Vergleich mit konventionellen Schwellen wird erwartet, dass die Kunststoffschwelle eine bessere Witterungsbeständigkeit (ca. 40% längere Lebensdauer als Holzschwellen) und einen deutlich niedrigeren Verbrauch an Rohstoffen (aufgrund der Verwendung von Abfällen) zusammen mit verbesserten akustischen Dämpfungseigenschaften (gegenüber Metall- und Betonschwellen) zeigt.

Der Schwerpunkt des Projekts lag auf der Verwendung von in Deutschland anfallenden Kunststoff- und Glasfaserabfällen. Kriterien für die Auswahl der Sekundärkunststoffe waren sowohl das Aufkommen und der Preis wie auch die Intention, verschiedene Materialtypen und –qualitäten (mechanische Eigenschaften) zu verwenden. Von der Firma PAV wurden die Altkunststoffe gewaschen oder ungewaschen als Agglomerat oder Mahlgut für die Versuche zur Verfügung gestellt. Als Glasfasern wurden verschiedene Typen von Produktionsreststoffen gewählt.

Am Fraunhofer ICT wurden systematische Versuche zur Ermittlung einer für die Bahnschwellen geeigneten Materialkombination durchgeführt.

In einer ersten Versuchsreihe wurde dabei ermittelt, welche der Glasfaserreststoffe für eine Verstärkung von Kunststoffen geeignet sind. Weiter wurde untersucht welcher Glasfasergehalt im Hinblick sowohl auf die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften als auch die Verarbeitbarkeit am Extruder optimal ist. In den Versuchen mit einer PE-Neuware und verschiedenen Glasfasertypen erwies sich eine Zuführung von Glasfaserstoffen als förderlich für die mechanischen Eigenschaften. Die Zugabe eines Haftvermittlers brachte keine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und wurde deshalb ausgeschlossen.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden die mechanischen Eigenschaften der Altkunststoffe und gezielter binärer Mischungen der Altkunststoffe ermittelt. Außerdem wurden verschiedene Additive zur Verbesserung der Temperaturstabilität getestet. Die Ergebnisse zeigten keine Indikation für die Verwendung dieser Additive. Anhand der Ergebnisse wurden mehrere Mischungen für die Versuche zur Schwellenextrusion ausgewählt. Dort zeigte sich allerdings, dass ein Teil der Ausgangsstoffe trotz guter Materialeigenschaften nicht für die

Großprofilextrusion geeignet war, da unkontrollierte Blasen im Profil entstanden. Auch das Vortrocknen der Materialien verbesserte das Resultat nicht. Daher wurde angenommen, dass die Lunker durch das Ausgasen beispielsweise von Druckfarben gebildet wurden. Es wurden weitere Versuche mit definierten Altkunststoffmahlködern und deren Mischungen durchgeführt.

Insgesamt konnte damit ein geeigneter Werkstoff für die Schwellenextrusion identifiziert werden.

Bei der Firma NGR in Feldkirchen (Österreich) wurde die Verfahrenstechnik der Schwellenextrusion entwickelt und angepasst. Hierzu wurden im Hinblick auf eine gleichmäßige Durchmischung der Materialschmelze verschiedene Dosiereinheiten zur Zugabe der Altkunststoffe und Glasfasern an einen Einschneckenextruder angebracht sowie eine Entgasungseinheit vorgesehen. Im Anschluss an die Düse des Extruders wurden eine Kalibriereinheit zur Erzeugung des Profilquerschnitts sowie eine Kühlstrecke und ein Rollentisch zum Transport des festen Profils angebaut. Mit Hilfe dieser Anlage gelang es ein maßhaltiges Schwellenprofil zu erzeugen. Nach verschiedenen Bearbeitungsversuchen wurden schließlich mit der endgültigen Materialmischung mehrere Großprofile gefertigt.

Nach der optischen Beurteilung erfolgte eine Prüfung der Großprofile durch thermographische Untersuchung am Fraunhofer ICT. Die Methode erwies sich als geeignet zur Identifikation von größeren Lunkern in den Profilen.

Schließlich erfolgte die mechanische Prüfung der Schwellenprototypen an der HTW in Dresden. Die zur Prüfung vorgelegten Schwellen wurden als verwendbar eingestuft.

Insgesamt wurde mit den Ergebnissen:

- Identifikation einer thermoplastischen Materialmatrix auf der Basis von Mischkunststoffabfällen, die die technischen Anforderungen einer Bahnschwelle erfüllt
- Entwicklung und Umsetzung einer Pilotanlage für die kontinuierliche Produktion der MPW-Schwelle
- Produktion von mehreren 2,6 m langen Schwellen
- Beauftragung und Durchführung von Schwellenprüfungen

das Projektziel voll erreicht. Die nächsten Schritte nach Abschluss des Projekts sind der Scale-up des Prozesses und die Entwicklung eines Geschäftsmodells.

5 Literatur

Bayer (2008): German premiere for polyurethane railway ties in the Leverkusen CHEMPARK. Bayer MaterialScience AG. News Release.

Bundesverband Glasindustrie e. V. (2008): „Jahresbericht 2008“, http://www.bvglas.de/fileadmin/media/Presse/Publikationen/Jahresberichte/jahresbericht_2008.pdf

Fib (2006) *Precast concrete railway track systems*. State of art report. Bulletin 37. Fédération internationale du béton.

Kohler, M.; Künniger, T. (2003): Emissionen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) aus teerölbehandelten Eisenbahnschwellen und ihre Bedeutung bei der Ökobilanzierung. Zeitschriftenartikel aus: Holz als Roh- und Werkstoff, Jg.: 60, Nr.2, 2003, S.117-124

Plasticseurope 2009: http://www.plasticseurope.org/Documents/Document/20100225141556-Brochure_UK_FactsFigures_2009_22sept_6_Final-20090930-001-EN-v1.pdf

Scheibe, T. (2008) *CFT-Sitzung zum Thema: Eisenbahngleisschwellen aus recyceltem Kunststoff*. Deutsche Bahn AG – DB Mobility, Networks and Logistics, Germany.

- Staatl. Umweltamt Herten (2003): Jahresbericht 2002,
<http://www.stua-he.nrw.de/download/pdfs/jahresbericht.pdf>
- Weisemann, U.; Großmann, S. (2010): Prüfungen an der Schwelle „Typ RailPlastTie“, Zentrum für angewandte Forschung und Technologie e. V. an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
- Werner F et al. (2008) *Ökobilanzstudie Langfassung*. Vergleich von Schwellen aus Buchenholz, Eichenholz, Beton und Stahl. Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau e.V.
- Wisewood (2008) Contact made directly with the Wisewood Soluções Ecológicas Company, Campinas, São Paulo, Brazil.
- Wülknitz (2008) Persönliche Mitteilung der Imprägnierwerk Wülknitz Company, Germany.

6 Anhang

Listen der EU-Mitglieder des Transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V)

Alte Mitglieder

Vorsitz	Herr Karel VAN MIERT Ehem. Vizepräsident der Kommission und Kommissar für Verkehr
Österreich	Herr Gerold ESTERMANN Direktor „Gesamtverkehrsmanagement, Logistik und Telematik“, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Belgien	Herr Luc MARECHAL Chef de cabinet du Ministre de la mobilité et des transports
Dänemark	Herr Thomas EGEBO Permanent Secretary, Ministry of Transport Vertreter: Herr Jorn HOLDT
Deutschland	Herr Ulrich SCHÜLLER Direktor Grundsatzabteilung, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
Spanien	Herr Antonio LOPEZ-CORRAL Director General de Programacion Economica
Finnland	Herr Juhani TERVALA Direktor of infrastructures, Ministry of transport and Communication Vertreter: Herr Juha PARANTAINEN
Frankreich	Herr Claude MARTINAND Vice President du Conseil General des Ponts et Chaussees, Ministre de

l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer

Griechenland	Herr Yiannis ROUBATIS Ehemaliger Regierungssprecher und ehemaliges Mitglied des Europäischen Parlaments Vertreter: Herr Christos DIONELIS
Irland	Herr Andrew CULLEN Director General Public Transport Planning and Investments, Dept. of Transport
Italien	Herr Ercole INCALZA , cabinet advisor to M. Lunardi Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
Luxemburg	Herr Paul SCHMIT Commissaire du gouvernement Secrétaire general du Ministre des Transports
Niederlande	Frau Dr. Neelle KROES Ehemalige Verkehrsministerin Vertreter: Mr. GANS
Portugal	Herr Dr. Romeo REIS Director do Gabinete para os Assuntos Europeus e Relações Exteriores-GAERE
Schweden	Herr Jonas BJELFVENSTAM State Secretary, Ministry of Industry, Employment and Communications Vertreter: Herr Ulf LUNDIN
Vereinigtes Königreich	Herr Willy RICKETT Director general of Transport Strategy, Roads and Local Transport Vertreter: David Mc MILLAN , John STEVENS

Neue Beitrittsländer

Bulgarien	Herr Dimitar ZOEV Director Transport Policy, Infrastructure and Construction Directorate of the Ministry of Transport and Communications
Tschechische Republik	Herr Antonin TESARIK Ministry of Transport and Communications of the Czech Republic Vertreter: Herr Karel STEINER
Zypern	Herr Symeon NATSIS Permanent Secretary, Ministry of Communication and Works Vertreter: Herr Iacovos PAPADOPOULOS
Estland	Herr Anti MOPPEL Head of Department of Development Logistics Ministry of Economic Affairs and Communication
Ungarn	Herr Zoltan KAZATSAY Deputy State Secretary, Ministry of Economy and Transport
Lettland	Herr Vigo LEGZDINS State Secretary, Ministry of Transport of Latvia
Litauen	Herr Alminas MACIULIS State Secretary of the Lithuanian Ministry of Transport and Communications Vertreter: Herr Albertas ARUNA
Malta	Herr Dr. Marc BONELLO Chairman Malta Maritime Authority Ministry of Transport and Communication

Polen	Herr Sergiusz NAJAR Undersecretary of State, Ministry of Infrastructure
Rumänien	Herr Sergiu SECHELARIU State Secretary Ministry of Transport Vertreterin: Frau Virginia TANASE
Slowakei	Herr Branislav OPATERNY State Secretary of Ministry of Transport, Posts & Telecommunication Vertreter: Herr Rudolf KORONTHALY
Slowenien	Herr Boris ZIVEC State Secretary for Transport Policy, Ministry of Transport
EIB	Herr Ewald NOWOTNY , Vizepräsident

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Holzpelletpreise 2006	9
Abbildung 2: Schnittglas.....	23
Abbildung 3: Postindustrielle Glasfaser	24
Abbildung 4: E-Module der MPW-Mischungen mit und ohne RC-Glasfasern	24
Abbildung 5: Biegemodule der MPW-Mischungen mit und ohne RC-Glasfasern.....	25
Abbildung 6: Wärmeformbeständigkeiten der MPW-Mischungen mit und ohne RC-Glasfasern	25
Abbildung 7: Schäumversuche: Extruderdüse mit austretendem Schaumstrang	27
Abbildung 8: Thermogravimetrische Analyse des Treibmittels, kontinuierliches Temperaturprofil (Anheizgeschwindigkeit: 20 K/min)	27
Abbildung 9: Thermogravimetrische Analyse des Treibmittels, Temperaturstufe bei 100 °C	28
Abbildung 10: Längsschnitt der Versuchsanlage.....	29
Abbildung 11: Querschnitt der Probe 2 aus Testlauf 1.....	32
Abbildung 12: Querschnitt der Probe 3 aus Testlauf 2.....	33
Abbildung 13: Längsschnitt der Probe 3 aus Testlauf 2	33
Abbildung 14: Querschnitt der Probe 4 aus Testlauf 3.....	33
Abbildung 15: Querschnitt der Probe 5 aus Testlauf 4.....	34
Abbildung 16: Querschnitt der Probe 6 aus Testlauf 5.....	34
Abbildung 17: Querschnitt der Probe 7 aus Testlauf 6.....	34
Abbildung 18: Längsschnitt der Probe 7 aus Testlauf 6	34
Abbildung 19: Querschnitt der Probe 8 aus Testlauf 7.....	35
Abbildung 20: Längsschnitt der Probe 8 aus Testlauf 7	35
Abbildung 21: Querschnitt der Probe 9 aus Testlauf 8.....	35
Abbildung 22: Längsschnitt der Probe 9 aus Testlauf 8	35
Abbildung 23: Querschnitt der Probe 10 aus Testlauf 9.....	36
Abbildung 24: Längsschnitt der Probe 10 aus Testlauf 9	36
Abbildung 25: Querschnitt der Probe 11 aus Testlauf 10.....	36
Abbildung 26: Längsschnitt der Probe 11 aus Testlauf 10	36
Abbildung 27: Oberseite (30 min)	37
Abbildung 28: Linke Seite (30 min)	37
Abbildung 29: Profil 1 - abgeschnittene Scheiben	38
Abbildung 30: Profil 1 - Blick auf die Lunker	38
Abbildung 31: Profil 1 - Schnitte von oben.....	38
Abbildung 32: Profil 1 - Teile nebeneinander	38
Abbildung 33: Profil 1 - Schnitt oben und vorne	39
Abbildung 34: Profil 1 - Oberseite (30 min)	39
Abbildung 35: Profil 1 – Detail (Lunker).....	39

Abbildung 36: Profil 1 - Lunker	39
Abbildung 37: Profil 2 - Erstes Aufheizen	40
Abbildung 38: Profil 2 - nach dem zweiten Aufheizen.....	40
Abbildung 39: Profil 2 - Oberseite (30 min)	40
Abbildung 40: Profil 2 - Linke Seite (30 min)	40
Abbildung 41: Profil 2 - Teile nebeneinander	40
Abbildung 42: Profil 2 - Detail (Lunker)	40
Abbildung 43: Schwelle 1	41
Abbildung 44: Schwelle 2	41
Abbildung 45: Schwelle 2 (Rückseite).....	41
Abbildung 46: Schwelle 2 (oben 1h)	42
Abbildung 47: Schwelle 2 (unten 1h).....	42
Abbildung 48: Schwelle 1 (hinten)	42
Abbildung 49: Schnittbild von Großprofil 2 und thermografische Aufnahme.....	42
Abbildung 50: Schnittbild zur Probenahme bei der Bestimmung des Glührückstandes über den Schwellenquerschnitt (Profil aus Testlauf 5).....	43
Abbildung 51: Frost-Tau-Wechsel-Prüfung eines Schwellenabschnitts	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lebensdauer und Preise für Bahnschwellen in Deutschland	5
Tabelle 2: Glasfaserproduktion in Deutschland (Bundesverband Glasindustrie e. V. 2008).....	5
Tabelle 3: Vergleich verschiedener Kunststoffschwellen mit der Railwaste-Entwicklung	6
Tabelle 4: Analysenergebnis teerölbehandelter Holz-Bahnschwellen (Staatl. Umweltamt Herten 2003)	8
Tabelle 5: Übersicht über die Arbeitspakete des Vorhabens	11
Tabelle 6: Arbeitsplanung, Zuständigkeiten und Balkenplan	12
Tabelle 7: Verwendete Sekundärstoffe (Preise: Stand Juli 2009)	20
Tabelle 8: Anforderungen für mechanische Kennwerte von Schwellenmaterialien aus Patentschriften	26
Tabelle 9: Glasfaserverteilung über den Schwellenquerschnitt	43