NOW-GMBH.DE

Fraunhofer IPT

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Technologischer Deep-Dive | Die Bipolarplatte der PEM-Brennstoffzelle

Übersicht

Die Deep-Dives sind eine Ergänzung zu der Studie “Wertschöpfungskette Brennstoffzelle”

In diesem Deep-Dive werden basierend auf dem aktuellen Stand der Technik die Werkstoffe, die Fertigungsverfahren und die Wertschöpfungskette ausgewählter Komponenten der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEM-Brennstoffzellen) näher betrachtet. Es sei darauf hingewiesen, dass der vorliegende Deep-Dive als Diskussionsgrundlage für die Branche dient und neben den gezeigten Lösungen weitere Werkstoffkonfiguration und Fertigungsalternativen denkbar sind.

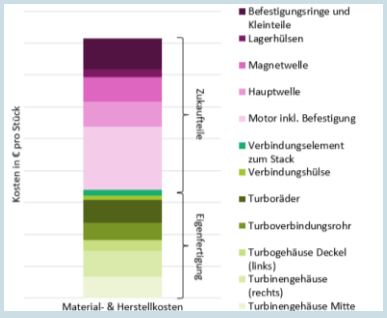
Die insgesamt drei Deep-Dives sind als Ergänzung zur Studie „Wertschöpfungskette Brennstoffzelle“ zu verstehen.

Der Fokus dieser Betrachtung liegt auf:

Metallische und Compound Bipolarplatte (BPP)

Membran-Elektroden-Einheit (MEA)

Luftverdichter



Dieses Factsheet

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

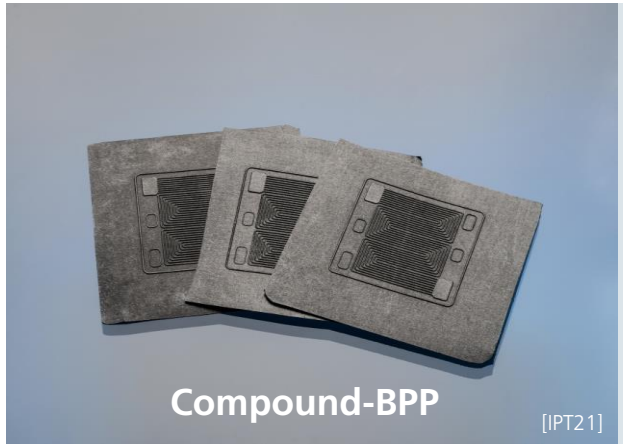
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Gliederung des technischen Deep-Dives

Der technische Deep-Dive lässt sich in 4 Bereiche unterteilen



Produkt

Werkstoffe der metallischen BPP

Fertigungsprozesse der metallischen BPP

Wertschöpfungskette der metallischen BPP

Werkstoffe der Compound-BPP

Fertigungsprozesse der Compound-BPP

Wertschöpfungskette der Compound-BPP

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT

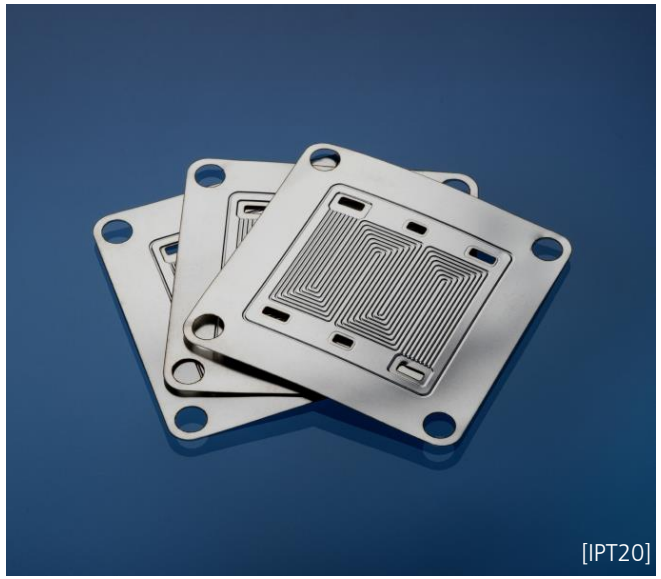
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Grundfunktionen und Anforderungen einer BPP

An die BPP werden eine Vielzahl von Anforderungen gestellt

Funktionen

- Homogene Zufuhr von Reaktionsgasen
- Kühlung des aktiven Bereichs
- Abführung der Reaktionswärme
- Räumliche Trennung der Halbzellen
- Elektrische Kontaktierung
- Mechanische Stabilität


[IPT20]

Anforderungen

- Hohe elektrische Leitfähigkeit
- Chemische, thermische und mechanische Stabilität
- Hohe Dichtigkeit gegenüber auftretenden Stoffen
- Geringe Materialdichte
- Hohe Stabilität bei geringer Materialstärke
- Niedrige Herstellungskosten

Typische Maße einer Bipolarplatte

- Typische Geometrien für Kfz-Anwendungen (Pkw/Lkw):
  - ➢ Größe der aktiven Fläche: 300 cm² (100 x 300 mm)
  - ➢ Größe der Außengeometrie: 384 cm² (120 x 320 mm)

Zielkenngrößen*

- Leistungsgewicht: 0,4 kg/kW_{net}
- H2-Permeationskoeffizient: <1,3x10^{-14} Std cm^3/(seccm²Pa)
- Elektrische Leitfähigkeit: >100 S/cm

*Für mobile Anwendungen

[DOE17]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Designfeatures einer BPP

Die verschiedenen Geometrien einer BPP erfüllen unterschiedliche Funktionen

Port (Anode/Kathode)

Zu- und Abführung der Reaktionsmedien aus dem Stack in die Zuführung und das Flowfield der BPP

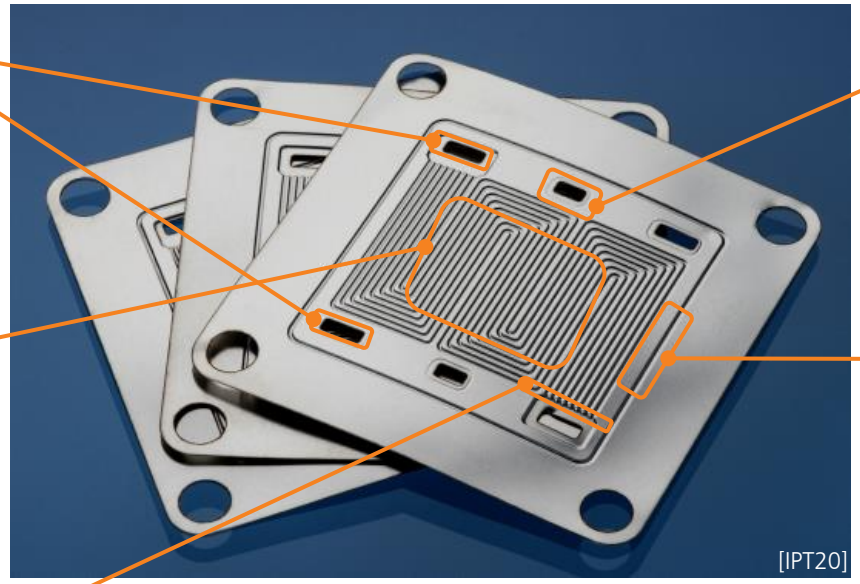
Flowfield

Homogene Verteilung der Medien in der Zelle

Elektrische Kontaktierung zur Membran und Gasdiffussionslage

Verteilerstruktur

Leitung und Verteilung der Medien vom Port in das Flowfield



Port (Kühlmittel)

Zu- und Abführung des Kühlmittels aus dem Stack zwischen die BPP-Hälften

Dichtungsnut

Struktur zur Positionierung und Stützung der auf die BPP aufgebrachten Dichtung

ggf. weitere Features

Positionierungsgeometrie*

Ausrichtung und Positionierung der BPP im Produktions- / Stackingprozess

Stützstruktur*

Struktur zur Abstützung der Bipolarplatte gegenüber der Gasdiffusionslage

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

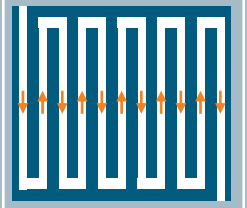
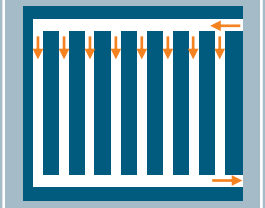
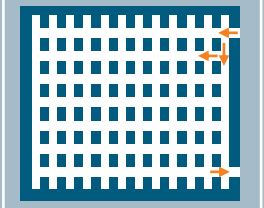
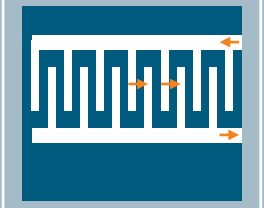
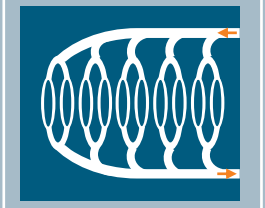
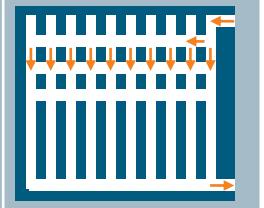
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Mögliche Designs des Flowfields der BPP

Bei der Entwicklung der BPP können verschiedene Designs in das Flowfield eingebracht werden

Flowfield Designs							
	Mäander	**Kanal**	**Pins**	**Verzweigt**	**Fraktal**	**Biometrisch**	**Kombination**
Schema							
Beschreibung	Parallele Kanäle mit Umlenkungen senkrecht zur Hauptströmungs-richtung	Parallele Kanäle in Haupt-strömungsrichtung	Regelmäßig angeordnete Pins	Strömungsleitung z.T. senkrecht zur Hauptströmungs-richtung durch die Diffusionsschicht	Basiert auf einem Algorithmus (FracTherm), der die Verluste durch Stofftransport minimiert	Adaption des Prinzips von Blattadern	Kombination verschiedener Flowfielddesigns
Eigenschaft	Homogene Reaktanden-verteilung im Stack; Hohes ΔP	Homogene Reaktandenver-teilung bei geringem Druckverlust	Erlaubt Strömungen quer zur Haupt-strömungs-richtung	Die Konvektion dominiert den Stofftransport	Homogene Reaktanden-verteilung	Kein Betrieb im Überschuss	Nutzung von Vorteilen bei Beseitigung von Nachteilen jeweiliger Designs

Das Flowfield ist das **zentrale Element** der BPP. Es ist für die **homogene Verteilung** der Medien in der Zelle und die elektrische **Kontaktierung** zur Membran/GDL verantwortlich. Bei der Auslegung müssen unterschiedliche Aspekte berücksichtigt werden, u.a.:

- Sicherstellung der Herstellbarkeit des Designs
- Optimiertes Wassermanagement
- Strömungsverhalten innerhalb der Zelle
- Minimierung der Druckverluste

[BEN10]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Gliederung des technischen Deep-Dives | Metallische BPP

Der technische Deep-Dive lässt sich in 4 Bereiche unterteilen

Produkt

Werkstoffe der metallischen BPP

Fertigungsprozesse der metallischen BPP

Wertschöpfungskette der metallischen BPP

Werkstoffe der Compound-BPP

Fertigungsprozesse der Compound-BPP

Wertschöpfungskette der Compound-BPP

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Substratwerkstoffe für die metallische BPP

Für die metallische BPP können unterschiedliche Werkstoffe verwendet werden

	Edelstahl	Titan	Aluminium
Dichte	8,0 kg/dm³	4,51 kg/dm³	2,7 kg/dm³
Elektr. Widerstand	0,75 Ωmm²/m	0,47 Ωmm²/m	0,028 Ωmm²/m
Kosten*	8.500 – 8.750 €/t	120.000 – 170.000 €/t	12.320 – 23.300 €/t
Vorteile	⊕ Geringe Kosten ⊕ Hohe Korrosionsbeständigkeit ⊕ Geringer elektrischer Widerstand ⊕ Gute Beschichtungseigenschaften	⊕ Geringe Dichte ⊕ Gute mechanische Eigenschaften (Festigkeit, Härte) ⊕ Hohe Korrosionsbeständigkeit	⊕ Geringer Kosten ⊕ Geringe Dichte ⊕ Hohe Wärmeleitfähigkeit
Nachteile	⊖ Beschichtung notwendig	⊖ Kostenintensiv	⊖ Beschichtung notwendig ⊖ Entwicklungsbedarf
Key Learnings	Aufgrund seiner positiven Materialeigenschaften befasst sich ein Großteil der Forschung und Entwicklungsarbeiten auf BPP aus Edelstahl.	Titan ist insbesondere für Applikationen geeignet, in denen eine hohen Lebensdauer in Verbindung mit einem geringen Leistungsgewicht gefordert ist.	Die geringe Dichte und die moderaten Kosten begünstigen einen Einsatz von Aluminium als Substrat. Die hohe Korrosionsanfälligkeit stellt jedoch noch eine Herausforderung dar.

*Hochrechnung auf Basis verfügbarer Marktzahlen

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Mechanische Eigenschaften der Substratwerkstoffe

Die Substratwerkstoffe unterscheiden sich hinsichtlich Umformbarkeit und Korrosionsbeständigkeit

	Werkstoff	E-Module [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Dehnung [%]
Edelstahl	SS304	193	>515	>40
	SS316	193	>515	>40
	SS316L	193	>485	>40
	SS434	200	~540	>0,32
	SS436	200	~540	>0,32
Titan	TA1	105	>240	>0,24
	TA2	105	>400	>0,2
	TC4	110	>895	>0,1
Aluminium	Al1050	70	>75	~0,3
	Al5052	70	>170	~0,25
	Al6061	69	>290	~0,25

[XU20]

Info-Box

- Bei der Umformung von metallischen BPPs haben die **maximale Dehnung**, der **E-Modul** und die **Zugfestigkeit** einen Einfluss auf die Umformbarkeit des Substrates.
- Aluminiumlegierungen weisen eine relativ **niedrige Zugfestigkeit** unter 300 MPa und eine Dehnung zwischen 25 und 30 % auf. Der E-Modul ist mit 70 GPa gering.
- Titanlegierungen weisen je nach Legierung die größten Unterschiede auf. **TA1** zeigt die **höchste Dehnung** von 24 % und die **niedrigste Zugfestigkeit** von 240 MPa, während **TC4** die **niedrigste Dehnung** von 10 % und die **höchste Zugfestigkeit** von 895 MPa aufweisen. Der E-Modul von Titan ist mit 105-110 GPa liegt deutlich **unter** dem vom Edelstahl.
- Edelstähle haben die **höchste Dehnung** von **40 %** und ein **Zugfestigkeits-Niveau** im Bereich von 480 - 520 MPa. Der E-Modul liegt bei ca. 200 GPa. Diese mechanischen Eigenschaften führen zur einer guten Umformbarkeit.

- Bedingt durch gute Umformbarkeit und die vergleichsweise geringen Materialkosten ist Edelstahl ein geeigneter Werkstoff für metallische BPP. Da Edelstahl jedoch Nachteile hinsichtlich **der Korrosionsbeständigkeit** aufzeigt, ist eine **Beschichtung** erforderlich.
- Der geringere E-Modul von Titan führt zu einem stärkeren **Einfluss der Rückfederung** bei der Umformung. Gleichzeitig verhindern die **geringen Dehnungen** hohe Umformgrade, wodurch die Umformung des Materials erschwert wird.

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT | WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Beschichtungswerkstoffe für die metallische BPP

Für die metallische BPP können unterschiedliche Beschichtungsmaterialien verwendet werden

	Goldbasiert	Kohlenstoffbasiert	Metall-Nitride
Dichte	19,32 g/cm³	2,25 g/cm³	5,22 g/cm³
Elektr. Widerstand*	2,2e-6 Ωcm	3,5e-3 Ωm - 6e-3 Ωm	2,5e-5 Ωcm
Kosten	> 47,000 €/kg	~ 700 €/t	~ 500 €/kg**
Vorteile	⊕ Sehr geringer elektrischer Widerstand ⊕ Hohe Korrosionsbeständigkeit	⊕ Hohe Schichtqualität ⊕ Elektronische Leitfähigkeit steigt mit zunehmender Temperatur ⊕ Bereits erprobt	⊕ Erhöhung der Oberflächenhärte des Substrates ⊕ Geringe Kosten
Nachteile	⊖ Im Vergleich zu anderen Beschichtungsmaterialien sehr kostenintensiv	⊖ Adhäsion zwischen Substrat und Beschichtung herausfordernd ⊖ Mehrschichtsysteme für ausreichende Korrosionsresistenz erforderlich	⊖ Geringere Korrosionsresistenz als kohlenstoffbasierten Beschichtungen ⊖ Elektrische Leitfähigkeit hängt von Material und Beschichtungsverfahren ab
Key Learnings	Goldbasierte Beschichtungen bieten die besten elektrischen Eigenschaften, sind jedoch mit hohen Kosten verbunden.	Kohlenstoffbasierte Beschichtungen stehen im Fokus der Entwicklung und stellen eine günstige und massen-produktionstaugliche Alternative dar.	Metallnitride bieten vor allem wirtschaftliche Vorteile bei ausreichenden Oberflächeneigenschaften.

*Bei den angegebenen Werten handelt es sich um den elektr. Widerstand der Werkstoffe. Der Kontaktwiderstand hängt von zahlreichen Faktoren wie bspw. Anpressdruck und Oberflächenzustand ab.

**Preis für TiN mit einer Korngröße von <10 µm

[GOL19, MAT19a]

[MAT19c,MAT21]

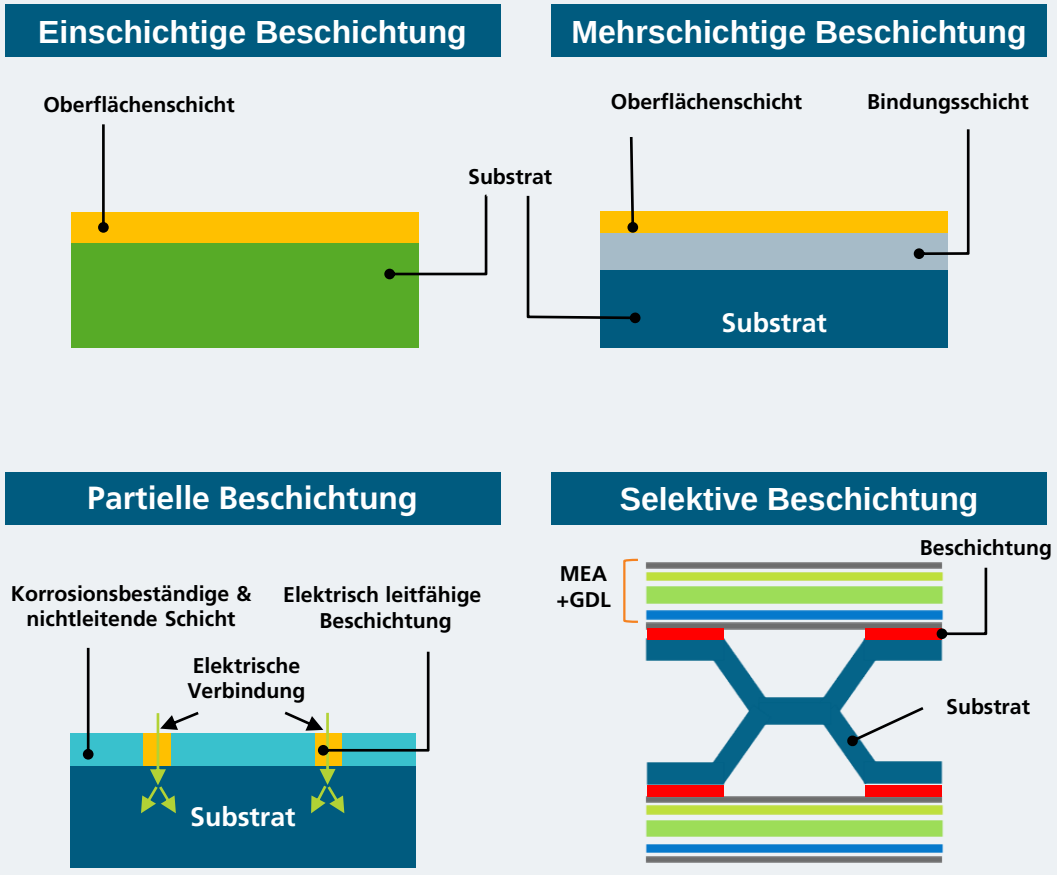
Im Auftrag der: [CHE06; MAT19b; IWS20]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Beschichtungswerkstoffe für die metallische BPP

Auswahl unterschiedliche Beschichtungskonzepte und Materialien für metallische BPP



[FCI20,ZHA04]

Beschichtungskombinationen

Substrat	Beschichtung
Edelstahl	Edelmetall
	Titan
	Kohlenstoff
	Keramik
Titan	Edelmetall
	Kohlenstoff
Aluminium	ZrN/CrN-Mehrschicht (Gegenstand aktueller Forschung)
	TiN/TiCN/TiC/Cr-Mehrschicht multi layer (Gegenstand aktueller Forschung)

- Für die metallische BPP sind eine Vielzahl von Substrat- und Beschichtungskombinationen denkbar.
- Die aktuellen Entwicklungsherausforderungen, insbesondere für Edelstähle und Aluminiumlegierungen, liegen in der Steigerung der Korrosionsbeständigkeit der Materialkombinationen und damit in der Erhöhung der Lebensdauer der BPP und des Brennstoffzellenstacks.

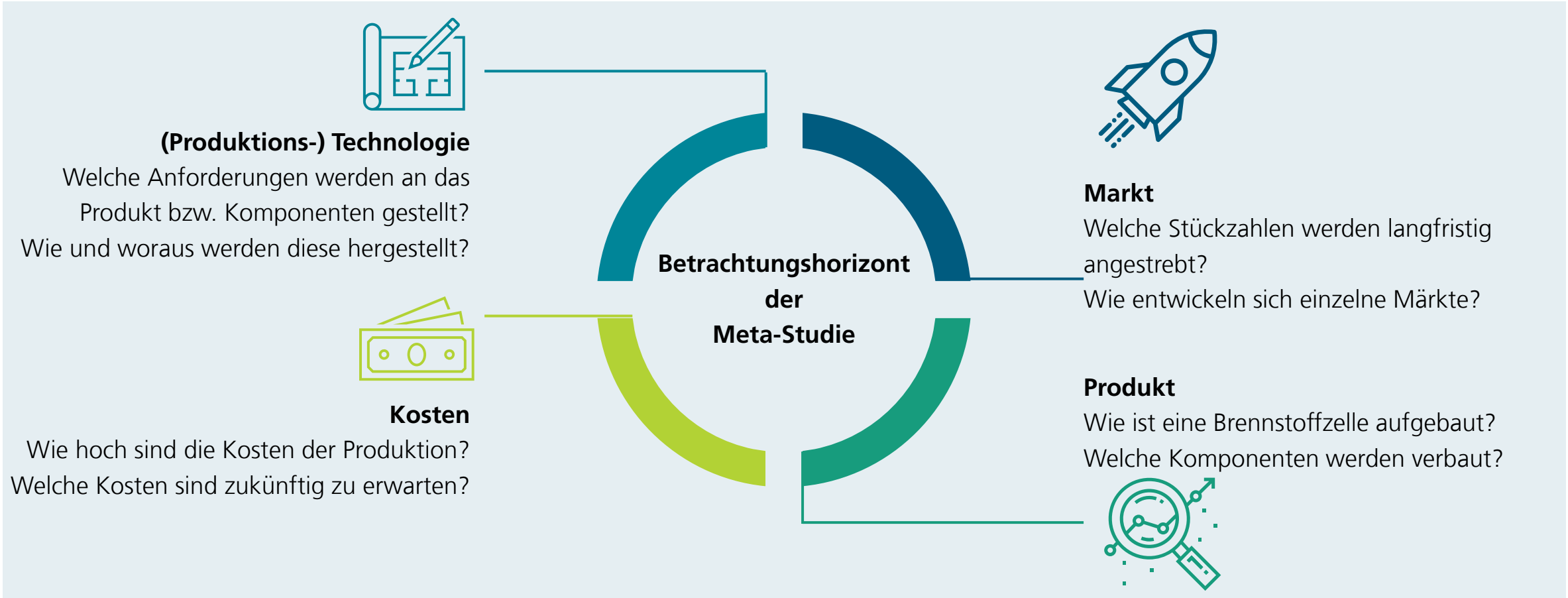
© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT | WZL RWTH AACHEN UNIVERSITY

Produktionskonzepte für die metallische BPP

Die Auswahl geeigneter Fertigungsprozesse erfolgt auf Basis von vier Faktoren

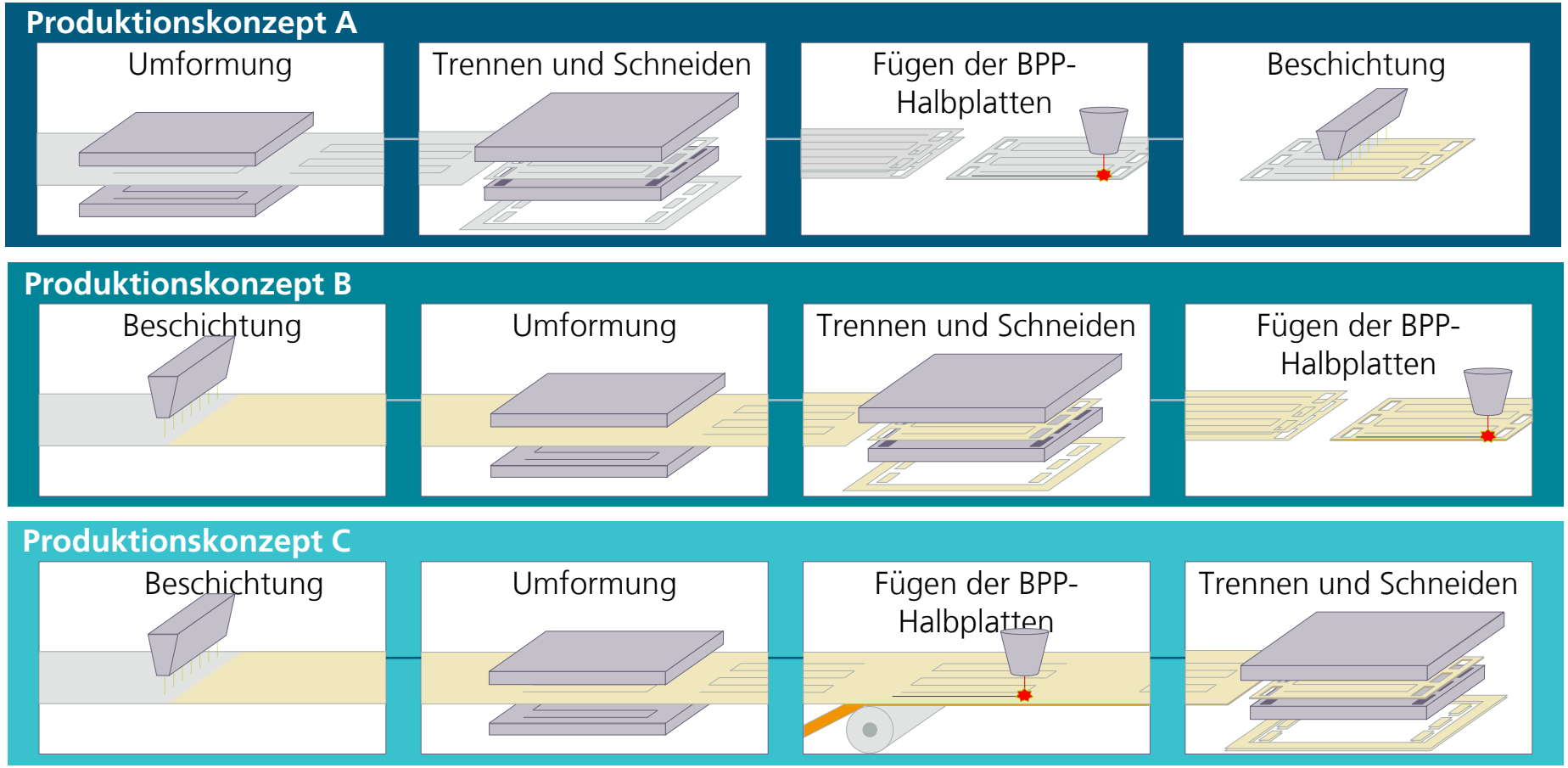


© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der:
NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Auswahl an Produktionskonzepten für metallische BPP

Für die Produktion der metallischen BPP sind unterschiedliche Prozessrouten denkbar



[IPT20, FCI20]

Kurzerklärung zur Prozesskette

Die Produktion metallischer Bipolarplatten lässt sich in die Produktionsschritte **Umformung**, **Trennen**, **Fügen** und **Beschichten** unterteilen. Hierbei sind verschiedene Prozessabläufe möglich. Zum heutigen Standpunkt gibt es **keinen einheitlichen Stand der Technik zur Abfolge** der einzelnen Prozessschritte, jedoch kann Produktionskonzept A als Referenz angesehen werden. Bei der Auslegung der Produktionskette müssen die Materialauswahl, die Vor- und Nachteile einzelner Technologien und jeweiligen **Hochskalierungspotenziale** berücksichtigt werden.

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

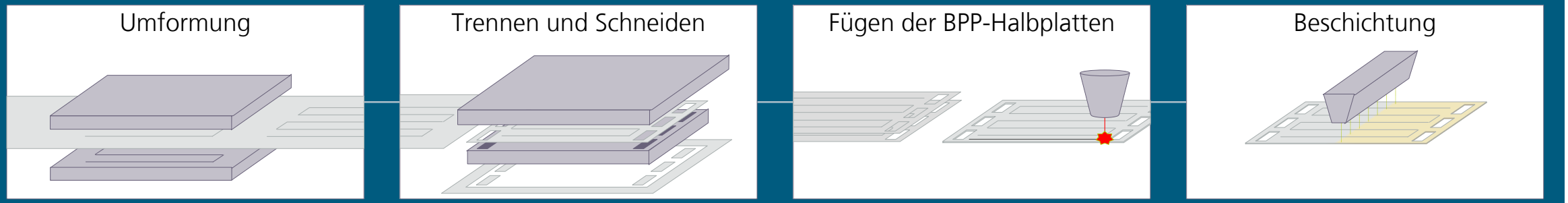
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT | WZL RWTH AACHEN UNIVERSITY

Produktionskonzepte für metallische BPP

Detaillierung Produktionskonzepte

Produktionskonzept A



Vorteile

- Trenn- und Schneidprozesse können direkt nach der Umformung erfolgen
  - ➢ Umform- und Schneidprozess können in einem einzelnen Werkzeug integriert werden
- Die Beschichtungsqualität wird durch vorgelagerte Produktionsschritte nicht beeinflusst. Hierdurch reduziert sich die Anforderungen an die weiteren Prozessschritte.

Nachteile

- Die Beschichtung muss auf die eingebrachte Kanalgeometrie aufgebracht werden
  - ➢ Realisierung von homogener Beschichtungsdicke in Kanalgeometrie kann herausfordernd sein
- Parallele Beschichtung von Anoden- und Kathodenseite ist erforderlich
- Handhabung von Einzelteilen beim Beschichtungsprozess

Die nachgelagerte Beschichtung stellt eine **hohe Qualität** der Beschichtung sicher.

Durch eine **Integration** von **trennender und umformender Bearbeitung** kann die Komplexität der Produktionskette reduziert werden.

[IPT20]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

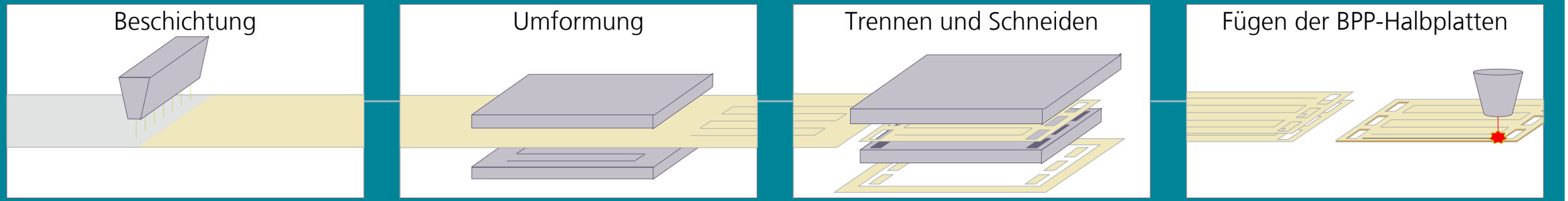
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT | WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Produktionskonzepte für metallische BPP

Detaillierung Produktionskonzepte

Produktionskonzept B



Vorteile

- Verwendung von vorbeschichtetem Material möglich. Hierdurch können Kosten in der Produktionskette eingespart werden.
- Trenn- und Schneidprozesse können direkt nach der Umformung erfolgen
  - ➢ Umform- und Schneidprozess können in einem einzelnen Werkzeug integriert werden

Nachteile

- Beschichtung kann durch nachfolgende Produktionsprozesse beschädigt werden.
- Keine Beschichtung des Materials an Schnittkanten und Schweißpunkten
  - ➢ Ausreichende Korrosionsbeständigkeit muss gewährleistet werden

Durch den nachgelagerten Schneid- und Fügeprozess ist eine vollständige Beschichtung der BPP-Oberfläche nicht möglich. Dies kann **negative Auswirkungen** auf die **Lebensdauer** der BPP haben.

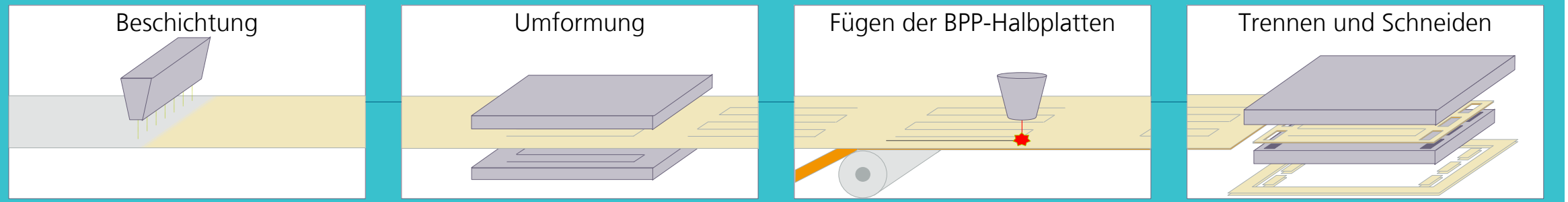
[IPT20]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Produktionskonzepte für metallische BPP

Detaillierung Produktionskonzepte

Produktionskonzept C



Vorteile

- Verwendung von vorbeschichtetem Material möglich. Hierdurch können Kosten in der Produktionskette eingespart werden.
- Reduzierung Anzahl Trenn- und Schneidoperationen
- Reduktion der Handlingschritte durch kontinuierliche Produktionskette

Nachteile

- Beschichtung kann durch nachfolgende Produktionsprozesse beschädigt werden
- Keine Beschichtung des Materials an Schnittkanten und Schweißpunkten
  - ➢ Ausreichende Korrosionsbeständigkeit muss gewährleistet werden
- Schneidoperation kann nicht in Umformprozess integriert werden
- Das Fügen der BPP erfolgt kontinuierlich, dies erfordert hohe Genauigkeiten

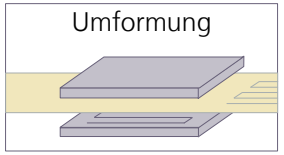
Durch den nachgelagerten Fügeprozess ist eine **durchgängige Beschichtung** der BPP **nicht möglich**. Durch die späte Trennung der einzelnen BPP müssen die vorgelagerten Prozesse alle kontinuierlich betrieben werden, wodurch die Komplexität der Prozesskette erhöht wird.

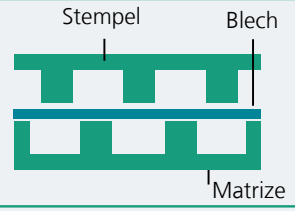
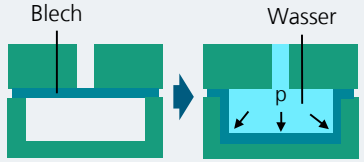
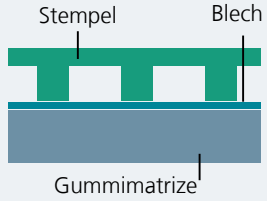
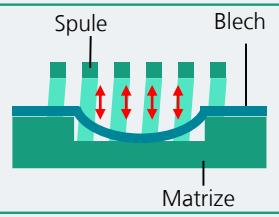
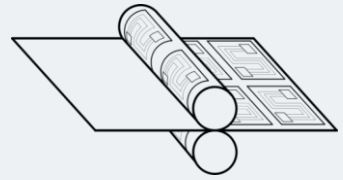
[IPT20]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Technologieübersicht | Umformung

Die Umformtechnologien unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer Prozesszeiten



Auswertung	Stamping	Hydroforming	Rubber forming	Hochgeschwindigkeits-umformen	Rolle-zu-Rolle-Umformung
Technology Readiness Level	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 **9** Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 7 8 **9**	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 **9** Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 7 **8** 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 **9** Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 **6** 7 8 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 **9** Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 **7** 8 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 **6** 7 8 9 Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 7 8 **9**
Prozessdauer / Zykluszeit	Zykluszeit: 1 – 2,5 s Platten pro Hub: 1 Presskraft: 16.000 kN* (*abhängig von Größe, Kanalgeometrie, Materialart und Dicke)	Zykluszeit : 5 – 10 s Platten pro Hub: Skalierbar Presskraft: <3.000 bar Interviews, [JAM17]	Zykluszeit: 5 – 10 s Platten pro Hub: Skalierbar Presskraft: ~ 20.000 kN* Lebensdauer-Gummimatrizen: 1.000 – 5.000 Zyklen *geschätzt für eine Plattenfläche von 312 cm²	Zykluszeit: < 20 s Platten pro Hub: Skalierbar Umformungs-Geschwindigkeit: bis zu 50 m/s Interviews, [JAM17]	Geschwindigkeit: bis zu 9m/min (3 s pro Platte) Platten pro Hub: Skalierbar Blechdicke: ~0,1 mm
Vor-/Nachteile	⊕ Hoher TRL ⊕ Kurze Zykluszeit ⊖ Werkzeugverschleiß	⊕ Geringer Werkzeugverschleiß ⊖ Reinigung von Emulsion	⊕ Bekanntes Verfahren ⊖ Nicht für hohe Produktionsmengen empfohlen	⊕ Geringer Werkzeugverschleiß ⊖ Nicht für hohe Produktionsmengen empfohlen ⊖ Lange Zykluszeit	⊕ Großes Potenzial für hohe Produktionsmengen ⊖ Derzeit niedriges TRL
Schema					

[nach INO22] [nach IIF16]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

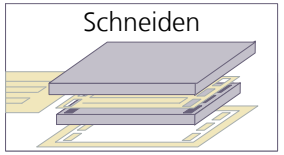
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

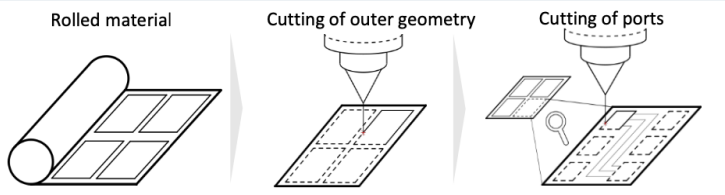
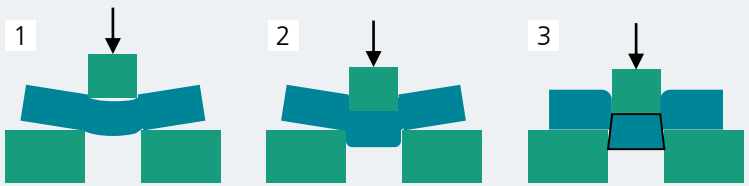
Fraunhofer IPT

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Technologieübersicht | Schneiden

Laserbasierte Technologien ermöglichen einen präzisen und werkzeuglosen Schneidprozess



Auswertung	Laserschneiden	Scherschneiden
Technology Readiness Level	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 **9** Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 7 **8** 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 **9** Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 7 **8** 9
Prozessdauer / Zykluszeit	Schnittgeschwindigkeit: > 100 m/min für 0,1 mm Blechdicke möglich Genauigkeit: +/- 3 µm	Zykluszeit: <1 s Schneidoperationen pro Hub: 1 - 2 (parallele Schnitte sind möglich) Lebensdauer Werkzeug: > 500.000 Hübe (geschätzter Wert)
Vor- /Nachteile	⊕ Eigenständiger Prozess, werkzeugloser Prozess ⊖ Reinigung von Werkstück erforderlich	⊕ Einfache Kombination mit Stanzverfahren ⊕ Einbindung im Folgeverbund- oder Transferwerkzeug möglich ⊖ Werkzeugverschleiß zu berücksichtigen
Schema		

[BRO16]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

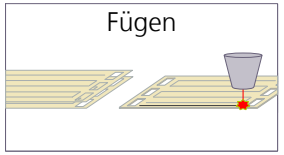
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

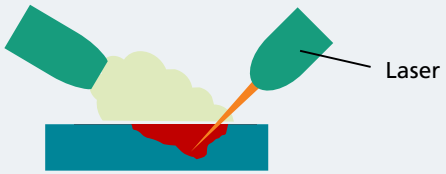
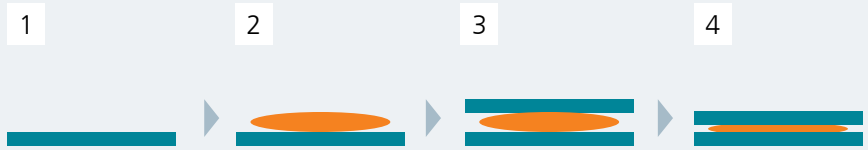
Fraunhofer IPT

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Technologieübersicht | Fügen

Laserschweißen und Verkleben eignen sich als Fügetechnologien für metallische BPP



Auswertung	Laserschweißen	Verkleben
Technology Readiness Level	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 **9** Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 7 **8** 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 **9** Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 **7** 8 9
Prozessdauer / Zykluszeit	Zykluszeit: 3 - 16 s Geschwindigkeit: < 80 m/min Interviews, [JAM18]	Zykluszeit (Roll-to-Roll): Mindestens 2 s je nach Klebstofftyp +Aushärtezeit (Abhängig von Klebstofftyp) [JAM17]
Vor-/Nachteile	⊕ Großes Potenzial für hohe Produktionsmengen ⊖ Reinigung von Werkstück erforderlich	⊕ Keine Verunreinigung ⊕ Kein thermischer Eintrag ins Bauteil ⊖ Vorbereitung der Fügeflächen erforderlich
Schema		

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

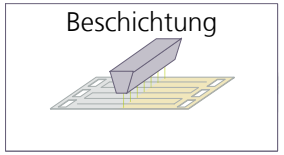
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

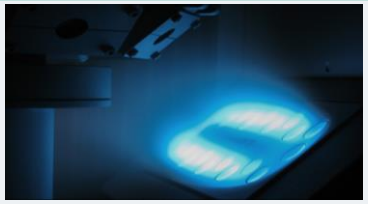
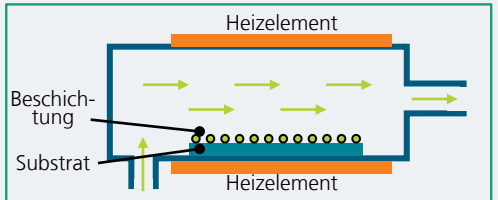
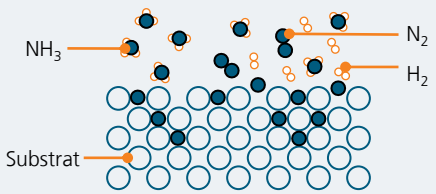
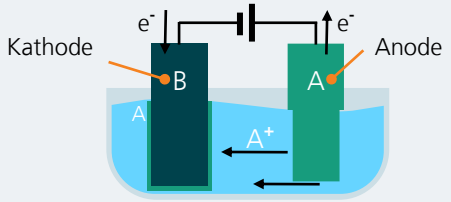
Fraunhofer IPT

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Technologieübersicht | Beschichten

Für die Beschichtung der metallischen BPP eignen sich vier unterschiedliche Verfahren



Auswertung	Physical vapor deposition	Chemical vapor deposition	Nitrieren	Galvanische Beschichtung
Technology Readiness Level	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 **9** Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 **7** 8 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 7 8 **9** Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 **6** 7 8 9	Für Brennstoffzellenproduktion: 1 2 3 4 5 6 **7** 8 9 Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 **5** 6 7 8 9	Für Brennstoffzellenproduktion: **1** 2 3 4 5 6 7 8 9 Industrialisierungspotenzial: 1 2 3 4 5 6 **7** 8 9
Prozessdauer / Zykluszeit	Zykluszeit: 2 - 5 min	Zykluszeit: ~ 3.33 min	Zykluszeit: N/A	Zykluszeit: N/A
Vor- /Nachteile	⊕ Gute Schichthaftung ⊕ Hohe Schichthärte ⊕ Geringe Prozesstemperaturen ⊖ Hohe Kosten aufgrund der intensiven Erhitzung und Kühlung ⊖ Prozess erfordert Vakuumkammer	⊕ Hohe Abscheidungsrate ⊕ Kein Vakuum erforderlich ⊖ Hohe Prozesstemperaturen ⊖ Höhere minimal Beschichtungsdicke als PVD ⊖ Toxische Nebenprodukte, hohe Nachbearbeitskosten	⊕ - ⊖ Nicht geeignet für hohe Produktionsmengen	⊕ Hohes Potenzial für kontinuierliche Beschichtung ⊖ Derzeit Forschungsthema ⊖ Nur für Batchproduktion geeignet
Schema	 [IPT22]			

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der:
NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Kostenanalyse in der Wertschöpfungskette

Die Fertigung der BPP macht mindestens 55 % ihrer Wertschöpfung aus

Ausgangsmaterial	
Edelstahl SS 304L	**1,92 €/kWnet***

Wertschöpfungskette der metallischen BPP

Endprodukt	
	4,37 €/kWnet**

Prozess Technologie	**Material**	**Umformen**	**Schneiden**	**Fügen**		**Beschichten**	***Gesamtkosten (inkl. Material)***
	SS 304L	*Stamping*	*Scherschneiden (Integration in Werkzeug zur Umformung der BPP)*	*Laserschweißen*	*Testing*	*Physikalische Gasabscheidung*	
Stacks pro Jahr							
1.000	1,92	6,21		4,78	7,29	7,05	**27,25**
10.000	1,92	1,35		2,11	3,55	1,53	**10,46**
20.000	1,92	1,35		1,27	0,17	0,84	**5,55**
50.000	1,92	1,27		1,10	0,07	0,65	**5,01**
100.000	1,92	1,16		0,79	0,04	0,60	**4,51**
500.000	1,92	1,16		0,78	0,03	0,48	**4,37**

Kosten für die jeweiligen Prozessschritte in €/kWnet*

Durch eine Hochskalierung lassen sich die Kosten für die metallische BPP um 84 % senken.
Bei geringen Stückzahlen werden durch die Dichtheitstests der BPP hohe Kosten verursacht.

*Bezogen auf einen Stack mit einer Netto-Leistung von 80 kW im Jahr 2020 **Bei einer produzierten Stackzahl von 500.000 Stacks p.a.

[JAM18]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT | WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Industrielandschaft im Bereich der metallischen BPP

Entlang der Wertschöpfungskette etablieren sich eine Vielzahl unterschiedlicher Industrien

- Entlang der Wertschöpfungskette der metallischen BPP sind eine Vielzahl von Zulieferern aktiv.
- Zusätzlich dazu bereiten sich viele Unternehmen aus dem produzierenden Gewerbe auf einen Markteintritt vor
- Insbesondere Unternehmen aus dem Anlagenbau fokussieren eine Einbringung ihrer Technologien/Prozesse in die Wertschöpfungskette
- Neben den etablierten Zulieferern, die bereits in anderen Branchen aktiv sind, entwickeln Start-Ups spezifische Lösungen für die Produktion von metallischen BPP

Wertschöpfungskette der metallischen BPP

Prozesse	Material	Umformen	Schneiden	Fügen	Beschichten
Materialhersteller + Anlagenbau	Metalllieferanten	Pressenhersteller Werkzeugbauer	Schweißanlagen-hersteller Werkzeug-bauer Stanz-anlagenhersteller	Schweißanlagen-hersteller Prüf-technik Klebstoff-hersteller	Beschichter
Produzent BPP	Start-Ups für BSZ-spezifische Lösungen		Gesamtsystemanbieter		Automatisierungs experten

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Zusammenfassung für die metallische BPP

Metallische BPP

1

Die metallische BPP ist, insbesondere bei mobilen Anwendungen, den Stand der Technik dar. Sie bietet ein hohes Industralisierungs- und Kostensenkungspotenzial. Aufgrund der Vielzahl an umzuformenden Geometrien bei gleichzeitig dünnem Ausgangsmaterial und hohen Toleranzanforderungen ist die Bipolarplatte ein **komplexes Bauteil** mit **hohen Anforderungen** an die Fertigung.

Werkstoffe

2

Für die Produktion der metallischen Bipolarplatte kommen unterschiedliche **Edelstähle** (hauptsächlich 1.4404/SS316L) sowie **Titan** zum Einsatz. **Aluminium** ist zur Zeit Gegenstand von Forschungsarbeiten. Bei der Materialauswahl steht vor allem die Beschichtung / Korrosionsbeständigkeit bzw. Lebensdauer im Vordergrund. Insbesondere die Lebensdaueranforderungen von >25.000 Stunden im Heavy-Duty-Bereich stellt bei der Entwicklung eine Herausforderung dar.

Fertigungs-prozesse

3

In Abhängigkeit der **Stückzahlen** und **Bauteilanforderungen** eignen sich unterschiedliche Produktionstechnologien und Prozessketten. Herausfordernd hierbei sind die geringen Toleranzketten und hohen Qualitätsanforderungen bei gleichzeitig hohen geforderten Taktzeiten. Bedingt durch dich die noch **geringen Stückzahlen** im Markt sind zum heutigen Zeitpunkt nur wenige großserientaugliche Verfahren umgesetzt. Bisher fehlt es an Produktionslinien, in denen die Einzelprozesse durchgängig verbunden sind.

Wertschöpfungs-kette

4

Der Zulieferermarkt für metallische BPP ist verglichen mit anderen Brennstoffzellenkomponenten groß. Im deutschem Maschinenbau etablieren sich **Konsortien** aus unterschiedlichen Kompetenzträgern, um die Entwicklung und Produktion von metallischen BPP voranzutreiben. Für die **Hochskalierung** positionieren sich Unternehmen, die bereits andere Produkte in Großserie fertigen.

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

White Spots und Trends in der Entwicklung und Produktion metallischer BPP

White Spots

Produkt	1	▪ Ansätze des **Design-for-Manufacturing** werden nur wenig eingesetzt ▪ Engere Zusammenarbeit bei der **Auslegung** von BPP und der **Konzeptionierung** der Produktion bietet Kosteneinsparpotenzial
Werkstoffe	2	▪ Beschichtungsentwicklung zur **Lebensdauererhöhung** ▪ Einsatz **nachhaltiger** und ressourcenschonender Beschichtungs**werkstoffe**
Fertigungs-prozesse	3	▪ Nachhaltigkeit in der Produktion, z. B. über Reduktion der benötigten Energie ▪ **Reduktion des Aufwands** für Qualitätsprüfung und Tests durch optimierte Prüfstrategie
Wertschöpf-ungskette	4	▪ **Automation** und Durchgängigkeit in der Produktion ▪ Investition in großserientaugliche Verfahren ▪ **Marktunsicherheit bzgl. Nachfrageszenarien**

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Quellen

Kürzel	Quelle
[BEN10]	Bendzulla; Von der Komponente zum Stack: Entwicklung und Auslegung von HT-PEFC-Stacks der 5 kW-Klasse; 2010
[BLE21]	https://www.krafthand.de/truck/artikel/metallische-bipolarplatten-fuer-brennstoffzellen-stacks-29752/
[BRO16]	https://docplayer.org/122813807-Fertigungstechnik-ii-umformtechnik-zerteilen-scherschneiden.html
[CHE06]	https://www.chemie.de/lexikon/Spezifischer_Widerstand.html
[DOE17]	https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-polymer-electrolyte-membrane-fuel-cell-components
[FEI21]	https://www.feintool.com/de/newsroom/news/2021-09-17-swissmem/strategische-zusammenarbeit-von-feintool-und-sitec-in-china/
[GOL19]	https://goldprice.org/
[IIF16]	https://i2fg.iul.eu/impulse-forming/joining-by-high-velocity-forming/
[INO22]	https://www.inoxveneta.it/de/hydroforming-blech/
[IPT20]	Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie; 2020
[IPT21]	Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie; 2021
[IPT21]	Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie; 2022
[IWS20]	Fraunhofer IWS: https://www.iws.fraunhofer.de/de/newsundmedien/presseinformationen/2020/presseinformation_2020-09.html
[JAM17]	Brian D. James et al: Bipolar Plate Cost and Issues at High Production Rate; 2017
[JAM18]	Brian D. James et al: Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update; 2018
[KAP21]	https://www.graebener.com/de/blog/brennstoffzellen-hoffnungstraeger-fuer-die-energiegewinnung-der-zukunft
[MAT19a]	http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=d2a2119a08904a0fa706e9408cddb88e&ckck=1
[MAT19b]	https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3f64b985402445c0a5af911135909344&ckck=1
[MAT19c]	https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=ffbf753c500949db95e502e043f9a404

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

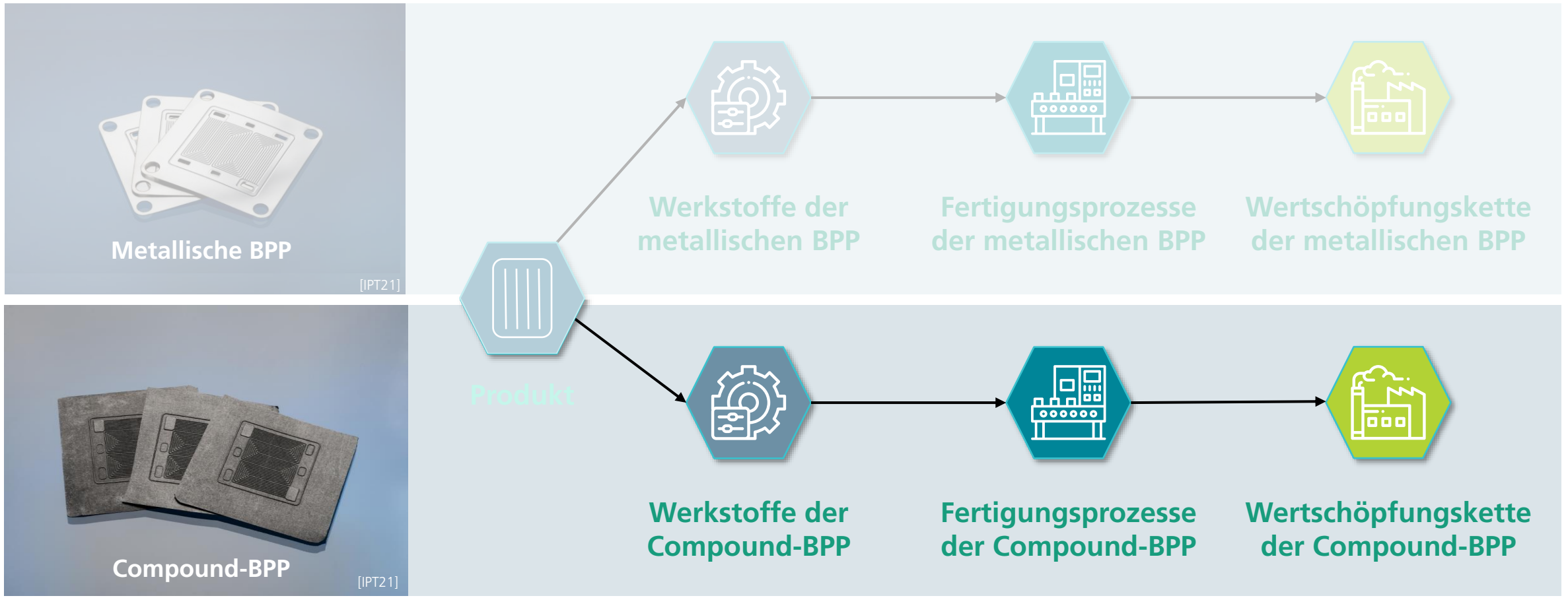
Quellen

Kürzel	Quelle
[MAT21]	https://mateck.com/titan/pulver-495/, abgerufen am 28.07.2022
[OTS21]	https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20211007_OTS0105/dana-neu-ulm-und-bosch-langfristiger-vertrag-zur-produktion-metallischer-bipolarplatten-fuer-brennstoffzellen-stacks-foto
[SCH22]	https://www.schulergroup.com/unternehmen/presse/pressemeldungen/tab/archiv/2021/20210929_brennstoffzellen/index.html
[SCHa22]	https://www.schaeffler.de/de/news_medien/pressemitteilungen/pressemitteilungen_detail.jsp?id=87820352
[WEI22]	https://weil-technology.com/media/pages/blechexpo-qr/e9cc146d69-1634915897/bipolarplatte_de.pdf
[XU10]	Zhutian Xu, et al. Towards mass applications: A review on the challenges and developments in metallic bipolar plates for PEMFC, 2020
[ZHA04]	Jinping Zhang, et al. SELECTIVE COATINGS FOR PEM CELL ELECTRODE CONTACTS, 2004 (US Patent: US 2004/0033408A1)

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Gliederung des technischen Deep-Dives | Compound-BPP

Der technische Deep-Dive lässt sich in 4 Bereiche unterteilen

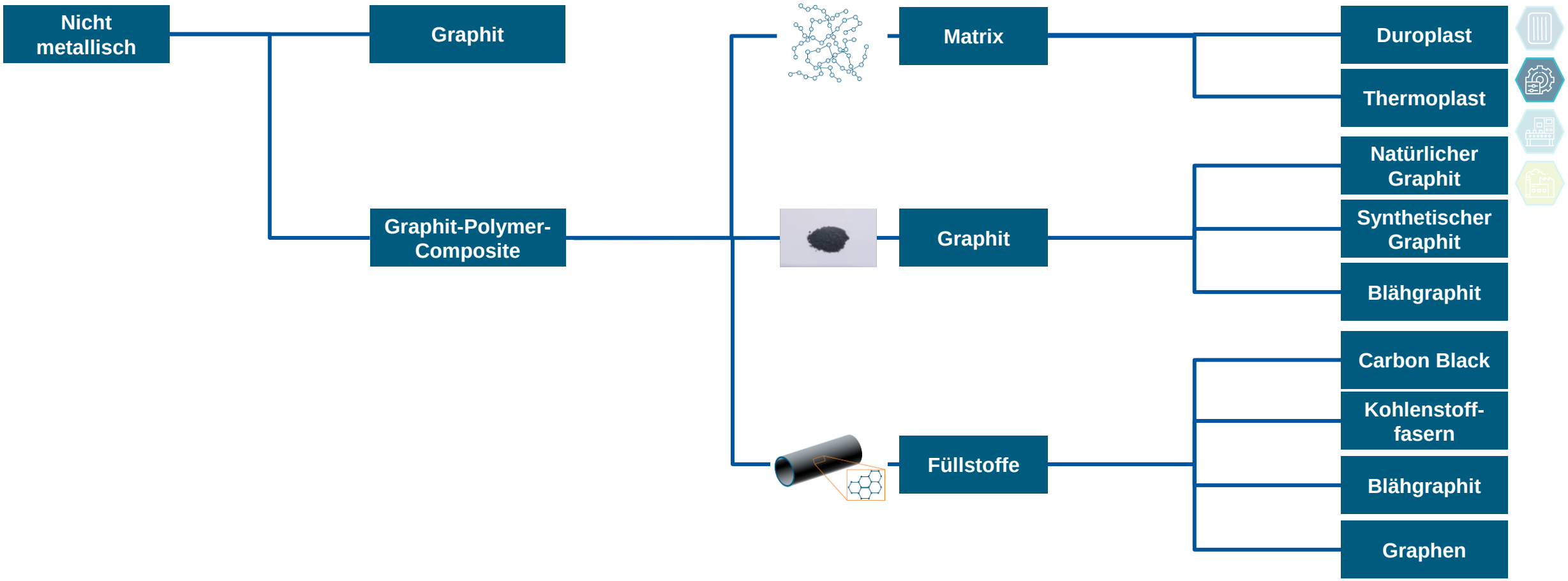


© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der:
NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Rohmaterialien für die Compound-Bipolarplatte (BPP)

Nicht metallische Platten werden aus reinem Graphit oder Graphit-Compound-Materialien gefertigt



© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der:
NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL RWTH AACHEN UNIVERSITY

Rohmaterialien für die Compound-BPP

Nicht-metallische BPPs können nach ihren Werkstoffen unterschieden werden

Exemplarische Bipolarplatte aus einem Graphit-Polymer-Composit

[IPT21]

Steckbrief

- Die gängigsten nichtmetallischen BPP-Werkstoffe basieren auf **Graphit**
  - **Reiner Graphit** ist in den heutigen Anwendungen nur noch selten zu finden, da er nur in langsamen Bearbeitungsprozessen für die BPP-Herstellung verarbeitet werden kann.
    - ➢ Reiner Graphit als BPP-Material ist nicht für die Massenproduktion geeignet und wird daher nicht näher untersucht
  - **Graphit-Polymer-Composites (kurz: GPC**) als BPP Werkstoff ermöglicht eine im Vergleich zu reinem Graphit wesentlich schnellere Bearbeitungszeit. GPCs wird daher deutlich häufiger als reiner Graphit verwendet.
- Vorteile von graphitischen BPPs gegenüber metallischen BPPs
  - Hohe **Lebensdauer** von über >30.000 Stunden bereits nachgewiesen
  - Gute Eignung für stationäre und mobile Schwerlastanwendungen
  - Hohe **Korrosionsbeständigkeit**
  - Geringe **Dichte** des Materials (1,8-2,0 g/cm²)
- Nachteile von graphitischen BPPs im Vergleich zu metallischen BPPs
  - Höhere Gas (H_2)-**Durchlässigkeit**
  - Hohe **Materialstärken** erforderlich → geringes Leistungsgewicht trotz geringer Dichte
  - Geringere **elektrische Leitfähigkeit**
  - Geringere **Festigkeit**

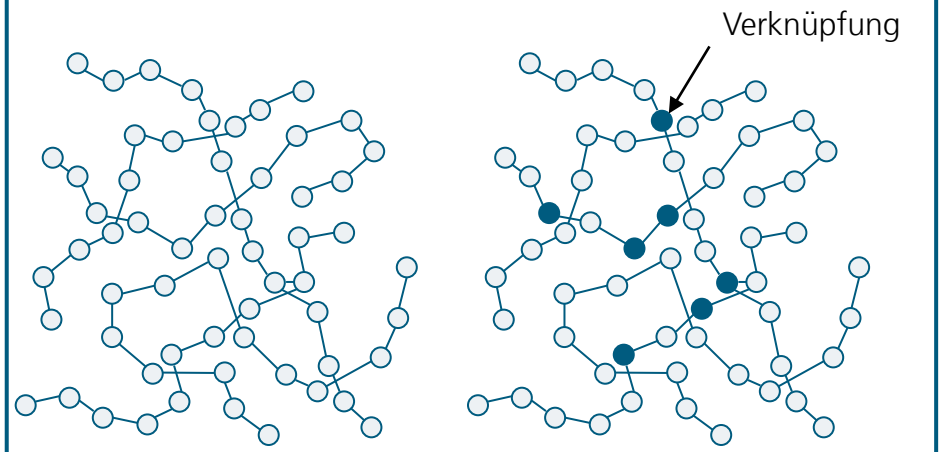
[ANT11, POR20]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Matrixwerkstoffe für die Compound-BPP

Als Matrix können sowohl duroplastische als auch thermoplastsische Kunststoffe verwendet werden

Matrixstruktur



(A) Themoplastisch (B) Duroplastisch

Vergleich zwischen thermoplastischem und duroplastischem Polymernetzwerk:
A) Thermoplast unvernetzt
B) Duroplast vernetzt

[PLA20]

Info-Box

In Compound-BPP werden als Matrixsystem vor allem **thermoplastische** und **duroplastische** Kunststoffe eingesetzt

Duroplastische GPC-Verbindungen

- Einsatz von vernetzten, nicht aufschmelzbaren Polymerketten
- Erfordern ein Aushärten nach dem Formgebungsprozess, wodurch die Zykluszeit erhöht wird.
- Füllstoffgehalt >80 % möglich
- Typisches Herstellungsverfahren: Formpressen
- Häufig verwendete Harze: Phenolharze, Vinylester, Epoxid

Thermoplastische GPC-Verbindungen

- Schmelzbare Formgebung oberhalb der Schmelztemperatur
- Schmelztemperatur/Glasübergangstemperatur bestimmt die maximale Betriebstemperatur
- Mögliches Herstellungsverfahren: Spritzgießen / Konventionelle Pressverfahren
- Typischer Füllstoffgehalt niedriger als bei duroplastischen Compounds, da eine hohe Matrixviskosität die Verarbeitbarkeit erschwerterforderlich ist: 70 % - 80 %.
- Da Thermoplaste geschmolzen werden können, bieten sie die Möglichkeit des Recyclings
- Häufig verwendete Thermoplaste
  - Niedertemperatur-PEM-FC: PE, PP, PVDF, PET, PA 6
  - Hochtemperatur-PEM FC: PPS

[ANT11, POR20, EIS20]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Füllwerkstoffe für die Compound-BPP

Graphit wird als elektrisch leitender Füllstoff in GPC-BPPs verwendet

Der größte Teil des leitfähigen Füllstoffs in Graphit-Polymer-Verbundwerkstoffen besteht aus Graphit. Hierzu werden unterschiedliche Graphit-Arten genutzt.

Natürliches Graphit

- Hoher Kristallinitätsgrad
- Hohe elektrische Leitfähigkeit
- Materialeigenschaften hängen stark von Herkunft und Abbaugebiet ab
- Hohe Potenzialunterschiede zwischen einzelnen Varianten

Synthetisches Graphitpulver

- Erhältlich in verschiedenen Reinheitsgraden, Korngrößen, Oberflächenbereichen und intrinsischen elektrischen Leitfähigkeiten
- Sorten mit höherer elektrischer Leitfähigkeit im Vergleich zu Naturgraphit erhältlich
- Konstante Eigenschaften innerhalb einer Qualitätsstufe

Blähgraphit

- Hergestellt aus natürlichem Graphit
- Poröse Struktur
- Hohe Benetzung der Polymermatrix
- Gute elektrische Kontaktierung zwischen benachbarten Partikeln aufgrund des hohen Seitenverhältnisses

[ANT11]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

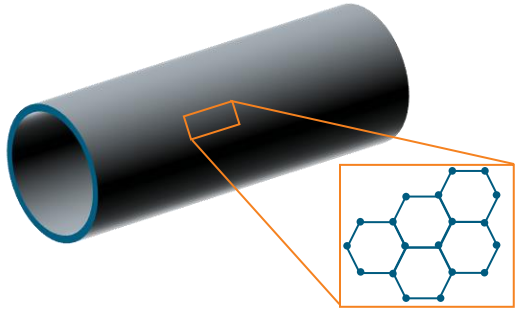
Füllwerkstoffe für die Compound-BPP

Zusätzliche Füllstoffe werden eingesetzt, um die Eigenschaften des Compounds zu optimieren

Ruß

[IPT22]

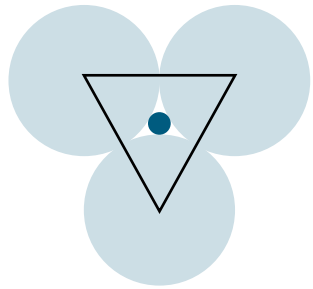
Molekulare Struktur einer Kohlenstoffnanoröhre



Kohlenstofffasern

[IPT22]

Schematische Skizze der leitenden Kanalbildung



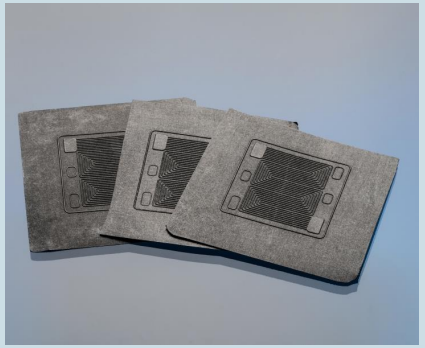
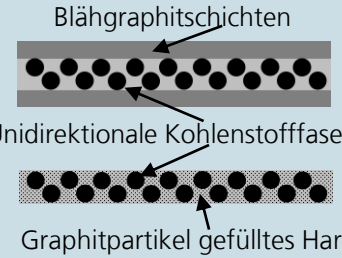
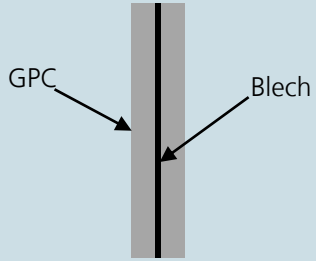
- Neben Graphit werden häufig weitere leitfähige Füllstoffe auf Kohlenstoffbasis verwendet, um die Leistung des GPC-Compounds anzupassen
- Das Füllmaterial beeinflusst die elektrische **Leitfähigkeit**, die mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie die **Wasserstoffdurchlässigkeit** der Bipolarplatte
- Üblicherweise werden folgende Füllstoffe verwendet:
  - **Ruß**: Kleine Kohlenstoffpartikel mit hohem Seitenverhältnis (Verhältnis Oberfläche/Volumen)
    - ➢ Effekt: Kleine Rußpartikel bilden leitende Kanäle zwischen größeren Graphitpartikeln
  - **Kohlenstoffnanoröhren**: Röhrenförmige molekulare Kohlenstoffstrukturen mit einem Durchmesser von 1 nm - 50 nm
    - ➢ Effekt: Ähnlich wie bei Carbon Black bilden sich leitfähige Kanäle zwischen einzelnen Graphitpartikeln
    - ➢ Hohe Materialkosten, geringer Füllstoffgehalt von 1 Vol.-% kann bereits zu einer Verdoppelung der elektrischen Leitfähigkeit führen
  - **Kohlenstofffasern:** zufällig verteilte oder unidirektional eingebrachte Fasern
    - ➢ Effekt: Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit durch Kanalbildung und Erhöhung der Festigkeit und Steifigkeit
  - **Blähgraphit:** Kann als untergeordneter Füllstoff in GPCs verwendet werden

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Werkstoffe für die Compound-BPP

Stand der Technik und aktuelle Forschungsthemen im Bereich der Compound-BPP

	Stand der Technik	Aktuelle Forschung und Entwicklungsprojekte		
		 Schematische Darstellung von GPCs mit eingearbeiteten unidirektionalen Kohlenstofffasern	Graphen-Nanoplättchen	 Schematische Darstellung der Hybrid Metall/GPC-BPP
	Graphite Polymer Composites (GPC)	**Kohlenstofffaserverstärkter GPC**	**Graphene – GPC**	**Hybrid Metall / GPC Composites**
Fokus	Duroplastische oder thermoplastische Polymere, gefüllt mit Graphit (> 70% Füllstoffgehalt)	Graphit Polymer Composites in Kombination mit unidirektionalen Kohlenstofffasern	Einarbeitung von Graphen als zusätzlicher Füllstoff in GPC für verbesserte elektrische Leitfähigkeit und geringere Wasserstoffdurchlässigkeit	Kombination von metallischen und nicht-metallischen Werkstoffen zur Optimierung der Bauteileigenschaften
	[MUL06, FUE17]	[PRO20, WEL20]		
TRL	**9**	**5 – 7**	**1 – 3**	**3 – 4**

[ANT11, POR20, YUH11, TOP18, YEE20, PHU18, SIN19]

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

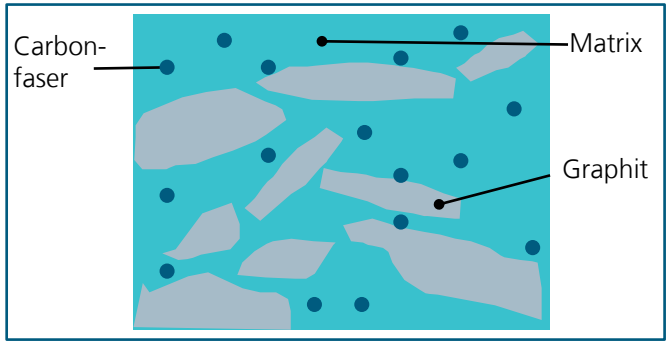
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT | WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Produktionskonzepte für Compound-BPP

Die Produktion unterteilt sich in die Compoundierung, Formgebung und Nacharbeit

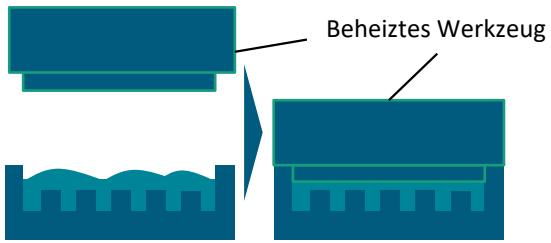
Compound-Material



Zur Herstellung von Graphit-Polymer-Verbundwerkstoffen werden in der Regel duroplastische oder thermoplastische Formmassen verarbeitet. Für die Herstellung der Masse gibt es verschiedene Verfahren.

Beispielhafte Verfahren:
Schmelzmischung, Lösungsmischung und Nassverlegung

Formgebung

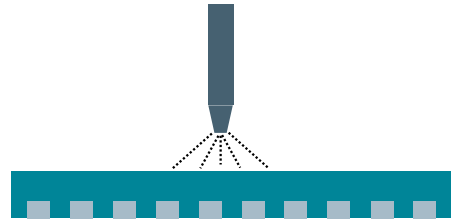


Formpressen

Der Verbundstoff wird in der Regel in einem Verfahren geformt, das auch aus der Standardpolymerproduktionstechnik bekannt ist, wie z. B. Formpressen oder Spritzgießen.

Stand der Technik:
Formpressen und Spritzgießen

Nacharbeit



Nacharbeit zum Entfernen der Gusshaut

Bei den üblichen Formgebungsverfahren entsteht eine Gießhaut, d. h. eine Matrixschicht an der Oberfläche des Verbundwerkstoffs. Um die geforderten Kontaktwiderstandsziele zu erreichen, muss die harzreiche Oberfläche entfernt werden.

Beispielhafte Verfahren:
Plasmabehandlung, mechanische Nachbearbeitung mit Schleifmitteln

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der:
NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Formgebungsprozesse zur Fertigung von Compound-BPP

Formpressen und Spritzgießen sind etablierte Prozesse zur Produktion von Compound-BPPs

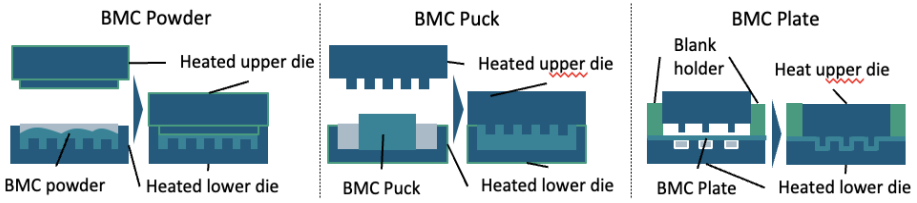
Formpressen

Technische Parameter

Zyklusdauer	1 min (Thermoplast) 1 – 20 min (Duroplaste)

- **Pressformen** von Bulk Molding Compounds (BMC) unter **Hitze** und **Druck**
- Am weitesten verbreitetes Verfahren für Graphit-Polymer-Compounds
- Kann für **duroplastische** und **thermoplastische** Compounds verwendet werden
- Es können verschiedene Arten von Compounds verarbeitet werden: **Pulver, Pucks, flache Werkstücke**
- Hoher **Füllstoffgehalt von > 80 %** möglich
- Duroplastische Materialien müssen unter Hitze und Druck **aushärten**
  → **Erhöhung der Zykluszeit**

Prinzip



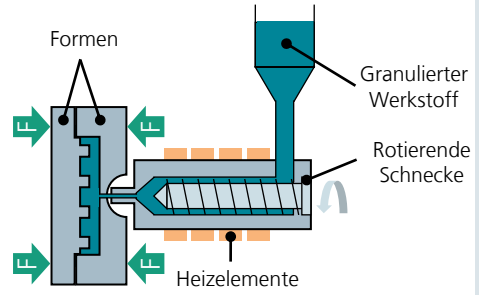
Spritzgießen

Technische Parameter

Zyklusdauer	~ 20 s - 1 min

- Stand der Technik für die BPP-Produktion aus Graphit-Polymer Compounds
- Keine Aushärtung nach der Formgebung notwendig
  → signifikant **niedrigere Zykluszeiten** im Vergleich zum Formpressen von Duroplasten
- **Vollständig automatisierter** Herstellungsprozess
- Verarbeitung erfordert niedrige Viskosität des Substrats
  → **Einschränkung des Füllstoffgehalts**
- Begrenzte **Auswahl an Compounds** einsetzbar
- **Zyklusdauer liegt noch deutlich über den Umformverfahren für metallische BPPs** wie z.B. Stanzen oder Hydroforming [MUL06]

Prinzip



© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Formgebungsprozesse zur Fertigung von Compound-BPP

Fräsen und Additive Fertigungsverfahren weisen eine hohe Zyklusdauer auf

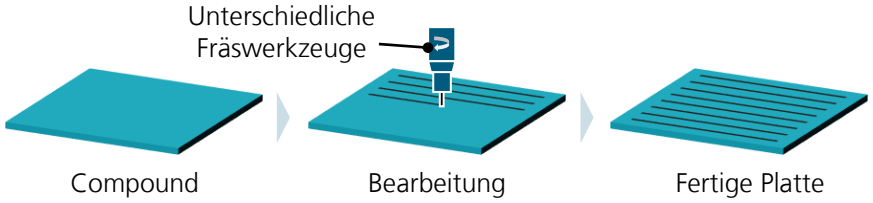
Fräsen

Technische Parameter

Zyklusdauer	Einige Minuten, bis zu 1 Stunde

- Kann verwendet werden, um Strömungsfelder in **reinen Graphit und duroplastisch/thermoplastisch** geformte **Graphit-Polymer Compounds** einzubringen
- Verarbeitung von Halbzeugen mit **hohem Füllstoffgehalt** möglich
- **Hohe Zyklusdauer** → nicht für die Massenproduktion geeignet
  - Fokus liegt auf kleinen Stückzahlen und experimentellen BPP-Designs (Prototyping)
- **Hoher Werkzeugverschleiß** durch **abrasives Verhalten** des Materials → Überwachung des Werkzeugs erforderlich

Prinzip



Additive Fertigung

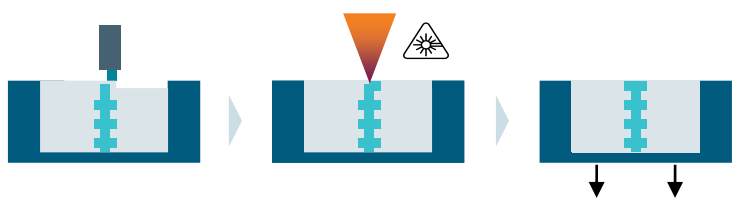
Technische Parameter

Zyklusdauer	Einige Minuten, bis zu 1 Stunde

- **Alternativprozess** für die Produktion von Compound BPP
  - Technologisch bspw. über ein selektive Laserschmelzen (SLM) umsetzbar
- Die **Zyklusdauer** der additiven Fertigungsverfahren sind vergleichsweise **hoch** → **nicht für die Massenproduktion geeignet**
  - Jedoch geeignet für kleine Mengen und experimentelle BPP-Designs (Prototyping)
- Generell geeignet für metallische Werkstoffe und **duroplastische und thermoplastische** GPCs

[DAW15, POR20]

Prinzip



© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Formgebungsprozesse zur Fertigung von Compound-BPP

Die kontinuierliche Umformung von Compound-BPP bietet ein großes Skalierungspotenzial

Kontinuierliche Umformung

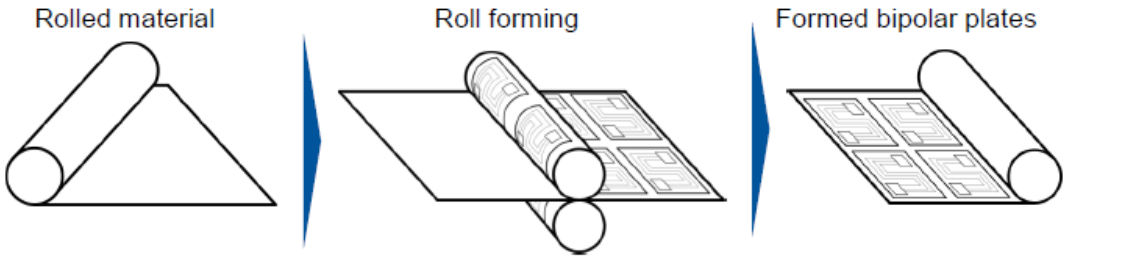
Technische Parameter

Zyklusdauer bis zu 9 m/min (entspricht ca. 1 BPP alle 3 s)

- **Kontinuierliches Verfahren**, bei dem das Strömungsfeld in ein **Bahnmaterial** eingeprägt wird
- Generell geeignet für metallische Werkstoffe, **thermoplastische** und **duroplastische** Compounds
  - ➢ Herausforderungen mit Aushärten bei duroplastischen Compounds
- Noch nicht vollständig in industriellen Fertigungsumgebungen eingeführt
- Es wird an Blähgraphitblechen und neuen Verbundwerkstoffen die u.a. ohne mechanische Nachbearbeitung auskommen geforscht

[HAN19]

Prinzip



© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer IPT

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Formgebungsprozesse zur Fertigung von Compound-BPP

Qualitative Bewertung der Prozesse

Form-pressen

- Das Verfahren ist aktuell **zu langsam**, um die Produktivitätsanforderungen für die erwartete steigende BPP-Nachfrage in den kommenden Jahren zu erfüllen, bietet jedoch ein hohes Optimierungspotenzial
- Mehrere Kavitäten pro Werkzeug und schnell aushärtende Harze sind Möglichkeiten zur Steigerung der Produktionsraten

Spritz-gießen

- **Vielversprechenderer Ansatz**, um zukünftige Produktivitäts-anforderungen zu erfüllen
- Durch Prozessentwicklungen bietet das Spritzgießen ein **gewisses Optimierungspotenzial** zur Produktivitätssteigerung
- Verfahren bedingt Einschränkung bzgl. des **Füllstoffanteils**

Fräsen

- Aufgrund der sehr **hohen Zykluszeiten** nicht für die Massenfertigung geeignet

Kont. Um-formung

- Größtes Potenzial für die Großserienproduktion von GPC BPPs
- **Geometrische Genauigkeit** für die Serienproduktion muss noch verbessert werden
- Kann als Schlüsseltechnologie fungieren, um die zukünftige Nachfrage nach GPC BPPs zu erfüllen (für die industrielle Großserienproduktion allerdings noch nicht ausgereift)

Neben der Entwicklung der Einzelprozesse steht bei Compound-BPPs die **Materialentwicklung** im Vordergrund. Während die Herausforderungen bei Duroplasten in der Verkürzung der **Aushärtezeit** liegen, wird in der Thermoplastentwicklung die **Erhöhung der Füllgrade** und Erweiterung **geometrischen Grenzen** fokussiert.

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Industrielandschaft im Bereich der metallischen BPP

Entlang der Wertschöpfungskette etablieren sich eine Vielzahl unterschiedlicher Industrien

Wertschöpfungskette der Compound-BPP

Prozesse	**Material**	**Formgebung & Nacharbeit**
Materialhersteller + Anlagenbau	Polymerproduzenten Graphitproduzenten Compoundierer	Pressenhersteller Prüftechnik Werkzeugbauer Hersteller von Fräsmaschinen Hersteller von Spritzgussmaschinen Klebstoffhersteller
Produzent BPP	**Start-Ups für BSZ-spezifische Lösungen**	**Gesamtsystemanbieter**

- Firmen aus der **Kunststoffverarbeitung** und dem **Anlagenbau** lassen Aktivitäten in der Produktion von Compound-BPP erkennen.
- Durch die Vielzahl an möglichen Ausgangsmaterialien und Prozessketten ist die Zuliefererlandschaft wesentlich **heterogener** als bei der metallischen BPP
- Insgesamt sind auf dem Markt der Compound-BPP **weniger Firmen** "aktiv" als bei der metallischen BPP

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Zusammenfassung für die Compound-BPP

Compound-BPP

1

Nichtmetallische BPP bieten im Vergleich zu metallischen BPP eine hohe Korrosionsbeständigkeit und damit hohe Lebensdauern. Der Fokus der Produktentwicklung liegt in der **Reduzierung der H_2-Permeabilität** und **Materialstärke der Werkstoffe** und damit des **Leistungsgewichts** der Bipolarplatten.

Werkstoffe

2

Für die Produktion der Compound-Bipolarplatten werden sowohl **Duroplaste** und **Thermoplaste** (Matrix) als auch unterschiedliche **Graphitformen** eingesetzt. Während die Herausforderungen bei Duroplasten in der Verkürzung **der Aushärtezeit** liegen, wird in der Thermoplastentwicklug die **Erhöhung der Füllgrade** und **Erweiterung geometrischen Grenzen** fokussiert. Zusätzlich wird eine **Reduzierung** der **H_2-Permeabilität** angestrebt.

Fertigungs-prozesse

3

Die Auswahl der Produktionstechnologie hängt maßgeblich vom **gewählten Werkstoff** ob und erfordert materialspezifische Anlagenlösungen. Die Technologien unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer **Prozesszeiten und Investitionskosten**. Die hohen Prozess- bzw. Aushärtezeiten (nur bei Duroplasten) **von bis zu einer Stunde** stellen die größte Hürde bei der Hochskalierung der Produktion von Compound-Bipolarplatten dar. Der maximale Füllstoffanteil bzw. Graphitanteil im Compound ist u.a. durch die Wahl der Produktionstechnologie limitiert.

Wertschöpfungs-kette

4

Entlang der Wertschöpfungskette der Compound-Bipolarplatten haben sich bislang insbesondere Industrien aus der **Kunststoffverarbeitung** positioniert. Durch die Vielzahl an möglichen Ausgangsmaterialien und der Materialabhängigkeit der Prozessketten ist die Zuliefererlandschaft wesentlich **heterogener** als bei der metallischen BPP.

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

White Spots und Trends in der Entwicklung und Produktion der Compound-BPP

White Spots

Produkt	1	▪ Erhöhtes spezifisches Leistungsgewicht durch hohe Materialstärke in Vergleich zu metallischen BPP ▪ Reduktion der H2-Permeablität zur Steigerung des Leistungsgewichts
Werkstoffe	2	▪ **Duroplast:** Schnell und energieeffizient aushärtende Materialien für Compound-BPP noch **nicht identifiziert,** Duroplastische Materialien sind Stand der Technik ▪ **Thermoplast:** Werkstoffkombinationen für **hohe Füllgrade** noch **nicht identifiziert**
Fertigungs-prozesse	3	▪ **Reduktion des Prozesszeiten** zur Steigerung der Skalierbarkeit der Produktion ▪ **Thermoplast:** Nachweis von Großserienverfahren für neue Werkstoffe
Wertschöpf-ungskette	4	▪ **Hohe Anzahl** an unterschiedlichen Materialien und Prozesslösungen **erschweren** bei geringer Stückzahl die **Hochskalierung** einzelner Produktionsverfahren ▪ Unsicherheit bzgl. Investitionsentscheidungen durch die hohe Anzahl an Prozesslösungen

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen
Im Auftrag der: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer IPT
WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Quellen

Kürzel	Quelle
[ANT11]	Renato A. Antunes, Mara C.L. de Oliveira, Gerhard Ett, Volkmar Ett, Carbon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of the main challenges to improve electrical performance, Journal of Power Sources, Volume 196, Issue 6, 2011, Pages 2945-2961, ISSN 0378-7753
[BEN10]	Bendzulla; Von der Komponente zum Stack: Entwicklung und Auslegung von HT-PEFC-Stacks der 5 kW-Klasse; 2010
[DAW15]	https://link.springer.com/article/10.1007/s10800-015-0832-1
[DOE17]	https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-polymer-electrolyte-membrane-fuel-cell-components
[EIS20]	https://eisenhuth.de/en/components-for-fuel-cells-redox-flow-batteries-and-electrolysers/
[FUE17]	https://www.fuelcellstore.com/blog-section/low-temperature-bipolar-plates
[GRA17]	https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/fcto_biploar_plates_wkshp_norley.pdf
[HAN19]	https://www.hannovermesse.de/en/news/news-articles/flexible-bipolar-polymer-plates-open-the-way-for-compact-batteries
[KUN20]	https://www.kunststoffweb.de/_assets/images/nachrichten/ki/w243155A.jpg
[MUL06]	A. Müller, P. Kauranen, A. von Ganski, B. Hell, Injection moulding of graphite composite bipolar plates, Journal of Power Sources, Volume 154, Issue 2, 2006, Pages 467-471, ISSN 0378-7753
[NGS20a]	https://www.graphit.de/graphit-info/
[PHU18]	https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.47183
[PLA20]	https://www.protolabs.com/resources/design-tips/thermoplastic-versus-thermoset-materials/
[POR20]	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S152661252030709X

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen

Quellen

Kürzel	Quelle
[PRO20]	https://www.graphite-shop.com/images/product_images/original_images/6350%20pulver%20.jpg
[SAU22]	https://www.saueressig.com/en/matthews-international-advance-bi-polar-plate-production-technology/
[SIN19]	https://link.springer.com/article/10.1007/s11706-019-0465-0
[STA15]	http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/kumar1/
[TOP18]	https://www.researchgate.net/publication/339677759_A_Review_on_Composite_Materials_Usage_in_Bipolar_Plates_of_Proton_Exchange_Membrane_Fuel_Cells_PEMFCs
[WEI20]	https://www.weltderphysik.de/typo3temp/assets/_processed_/f/0/csm_20160321_Graphen3_Lips_WikimediaCommons_aeff04d7ef.jpg
[YEE20]	https://www.degruyter.com/view/journals/polyeng/ahead-of-print/article-10.1515-polyeng-2020-0019/article-10.1515-polyeng-2020-0019.xml
[YUH11]	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775311015230

© Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen