

Schlussbericht – Gesamtbericht

Datum: 30.06.2025

Autoren: Norbert Heyer, Jan Hirz, Julian Kraft, Stefan Seiß, Florian Wittemann, Manuel Fessler, Martin Hohberg, Carsten Schmidt, Peter Brantsch

| | |
|------------------------|---|
| Förderkennzeichen | 03LB3015A bis H |
| Zuwendungsempfänger | <p>KraussMaffei Technologies GmbH Krauss-Maffei-Straße 1 85599 Parsdorf (vormals Krauss-Maffei-Straße 2, 80997 München)</p> <p>Baumgarten automotive technics GmbH Carl-Benz-Str. 46 57299 Burbach</p> <p>Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Hansastraße 27c 80686 München <i>Leistungserbringer:</i> Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7 76327 Pfinztal</p> <p>GHD-Präzisions-Formenbau GmbH & Co. KG Gewerbegebiet Rosenberg 2 91622 Rügland</p> <p>Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Kaiserstraße 12 76131 Karlsruhe <i>Leistungserbringer:</i> Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) Rinheimer Querallee 2 76131 Karlsruhe</p> <p>race result AG Joseph-von-Fraunhofer-Straße 11 76327 Pfinztal</p> <p>Simutence GmbH Rinheimer Querallee 2 76131 Karlsruhe</p> <p>technotrans solutions GmbH Scherl 10 58540 Meinerzhagen (vormals gwk Gesellschaft Wärme Kältetechnik mbH)</p> |
| Förderinitiative | „Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB)“ |
| Vorhaben | Verbundprojekt: „Leichtbau durch ressourcen- und CO ₂ -effizientes balanciertes Spritzgießen von duromeren Formmassen (Lite ₂ Duro)“ |
| Laufzeit des Vorhabens | 01.08.2021 bis 31.12.2024 |

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderinitiative:

Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB)

Projekträger:



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter den Förderkennzeichen 03LB3015A bis H gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das Projektkonsortium bedankt sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), beim Technologietransfer-Programm Leichtbau und beim Projekträger Jülich (PtJ) für die Förderung, Unterstützung und Betreuung des Projekts Lite₂Duro. Ebenfalls möchten wir uns bei allen Beteiligten bedanken, die bei der Durchführung des Projekts mitgewirkt haben.

Projektpartner:

- KraussMaffei Technologies GmbH
- Baumgarten automotive technics GmbH
- Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT)
- GHD-Präzisions-Formenbau GmbH & Co. KG
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
- race result AG
- Simutence GmbH
- technotrans solution GmbH



assoziiert:

- Sumitomo Bakelite Europe NV (vormals Vyncolit N.V.)



Sachbericht Lite₂Duro

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Im Projekt Lite₂Duro sollen drei prozesstechnische Hemmnisse bei der Duromer-Verarbeitung erforscht und die Lösungen in zwei industrielle Anwendungen transferiert werden, um die Vorteile duromerer Kunststoffe zu erschließen und die CO₂-Effizienz zu steigern.

Als erster Aspekt soll eine aktive Kavitätsbalancierung entwickelt werden, welche die prozesssichere Herstellung mehrerer Bauteile aus duromeren Formmassen in einem Zyklus (Mehrkavitäten-Spritzgießen) ermöglicht, sodass eine gleichmäßige Füllung sämtlicher Kavitäten erreicht wird.

Der zweite Schwerpunkt ist eine begleitende Plastifizierungsentwicklung, durch welche das verarbeitbare Kunststoffvolumen pro Zyklus gesteigert werden soll, um somit insgesamt eine wirtschaftlichere und energieeffizientere Großserienfertigung im Duromer-Spritzgießen zu erreichen.

Als dritter Aspekt soll eine Recyclingstrategie für den Angussverteiler entwickelt werden, welche auf einer Granulierung des ausgehärteten Angussmaterials und einer direkten Rückführung als Füllstoff in den Spritzgießprozess basiert.

Diese drei Prozessinnovationen sollen an zwei Produkten demonstriert werden, welche repräsentativ für viele branchenübergreifende Anwendungen von duromeren Formmassen stehen. Zum einen wird eine funktionsintegrierte Elektronik-Umspritzung für einen Transponder verfolgt, zum anderen soll eine neuartige Elektromotor-Getriebe-Einheit mit einem Leichtbau-Kunststoffgehäuse anstelle Metall entwickelt werden. Die ökologische Vorteilhaftigkeit der beschriebenen Prozess- und Produktentwicklungen soll mittels einer lebenszyklusübergreifenden CO₂-Bilanz unter Beweis gestellt werden.

Prozessinnovationen

Durch die zu entwickelnde Balanciertechnologie für duromere Formmassen soll eine gleichmäßige Füllung sämtlicher Kavitäten innerhalb eines Mehrkavitäten-Spritzgießwerkzeugs erreicht werden, um Schwankungen der gefertigten Bauteile bezüglich ihrer Funktionsmerkmale zu minimieren. Dafür wird im ersten Schritt die Formfüllung durch geeignete Sensorik im Spritzgießwerkzeug erfasst. Bei der Detektion einer Abweichung zwischen den Kavitäten soll eine Beeinflussung des Fließverhaltens der duromeren Formmasse durch eine gezielte Temperierung des Fließkanals vorgenommen werden, um ein gleichmäßiges Formfüllverhalten zu gewährleisten. Aufgrund der zu erwartenden Trägheit der Temperierung handelt es sich hierbei um eine langsamere Regellungsmaßnahme, die Tendenzen über mehrere Zyklen hinweg ausgleichen kann, beispielsweise aufgrund von Chargschwankungen der Formmasse. Maßgebliches Werkzeug für diese Entwicklung ist eine detaillierte Prozesssimulation.

Die zweite Prozessinnovation bezieht sich auf die Entwicklung einer größeren Plastifizierung, durch welche das verarbeitbare Kunststoffvolumen pro Zyklus (Schussvolumen) gesteigert werden soll. Diese Entwicklung ist eine Grundvoraussetzung, um großvolumige Bauteile in einer Mehrkavitätenfertigung herstellen zu können. Aufgrund der chemischen Vernetzungsreaktion der Formmasse beim Duromer-Spritzgießen ergeben sich erhöhte Anforderungen an den Plastifiziervorgang. Eine prototypische Plastifiziereinheit mit vergrößertem Schussvolumen soll gebaut und für die Demonstratorherstellung in diesem Projekt verwendet werden.

Als dritte Prozessinnovation soll eine Recyclingstrategie für den Angussverteiler entwickelt werden. Da beim Duromer-Spritzgießen die gesamte Formmasse, die in das beheizte Werkzeug eingespritzt wird, irreversibel aushärtet, werden der Anguss und die gegebenenfalls vorhandenen Angussverteiler nach aktuellem Stand der Technik als Produktionsabfall entsorgt. Durch eine Granulierung des ausgehärteten Angussmaterials und einer direkten Rückführung als Füllstoff in den Spritzgießprozess soll diese Verschwendung von Ressourcen vermieden werden. Im Projekt sollen die Auswirkungen einer Rückführung von ausgehärtetem und gezielt zerkleinertem Angussmaterial in Abhängigkeit von der Zerkleinerungsstrategie untersucht und quantifiziert werden.

Produktinnovationen

Diese drei Prozessinnovationen sollen an zwei Produkten demonstriert werden, welche repräsentativ für viele branchenübergreifende Anwendungen von duromeren Formmassen stehen. Zum einen wird eine funktionsintegrierte Umspritzung von Elektronik für einen Transponder mittels Electronic Packaging verfolgt, zum anderen soll für eine neuartige Elektromotor-Getriebe-Einheit ein Leichtbau-Kunststoffgehäuse entwickelt werden.

Die Demonstrationsanwendung Transponder stammt aus dem Bereich des Electronic Packaging, d.h. der mediendichten Umspritzung von elektronischen Bauteilen. Es wurde ein Transponder zur Zeitmessung bei Sportveranstaltungen ausgewählt. Dieser Transponder wird vom Sportler direkt am Körper oder am Sportgerät befestigt und während des Wettkampfs getragen. Er besteht aus einer mit elektronischen Bauteilen bestückten Platine, welche zum Schutz vor äußeren Einflüssen mediendicht mit einer Epoxidharz-Formmasse mittels einer einzigen Umspritzung verkapselt werden soll, wobei eine Reduzierung der Bauteilmasse zusätzlich auch angedacht ist.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die geplante Elektromotor-Getriebe-Einheit basiert auf dem erfolgreich abgeschlossenen Projekt „Direktgekühlter Elektromotor mit integralem Leichtbaugehäuse (DEmil)“ (Förderkennzeichen P2016-0211), welches unter anderem von den Konsortialpartnern Fraunhofer ICT sowie dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) abgeschlossen wurde [1, 2]. In Lite₂Duro soll der Motor durch ein Getriebe und ein neues Elektromotorgehäuse mit Funktionsintegration weiter entwickelt werden, was neben der Metallsubstitution zu einem höheren Leichtbaugrad führen soll.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Am Anfang des Projekts standen die Bauteilkonzeption und -konstruktion der Produkte Transponder (AP 2.1) und Elektromotorgehäuse (AP 2.2). Anschließend wurden die Werkzeuge von GHD konstruiert und gebaut (AP 5.1). Besonders beim Elektromotorgehäuse musste das Werkzeug bei der Konstruktion mit der Spritzgießzelle von KraussMaffei abgestimmt werden. Beim Bauteilvolumen wurde dabei die neu zu entwickelnde Plastifiziereinheit (AP 3.4) berücksichtigt.

Vor der Bauteilkonzeption wurden Transponder inklusive Umspritzung einer Platine mit Batterie von Race Result auf einem Versuchswerkzeug am Fraunhofer ICT hergestellt, nachdem Machbarkeitsuntersuchungen stattgefunden hatten. Anschließend wurde der Einfluss des Prozesses auf die Funktionsfähigkeit der Batterie untersucht. Da sich herausstellte, dass die umspritzte Batterie nicht ausreichend bzw. sicher Strom liefern konnte, wurde entschieden, das Demonstrator-Werkzeug mit einem neuen Design zu bauen, jedoch nur mit Umspritzung einer Platine ohne Batterie (AP 2.1, AP 5.1).

Parallel dazu wurden im Arbeitspaket 3 seitens Fraunhofer ICT und KIT-FAST die Grundlagen bezüglich der Kavitätsbalancierung erarbeitet (AP 3.1) und in einem von GHD gebauten Versuchswerkzeug mit 2 Rechteckplatten als Wechseleinsatz umgesetzt (AP 3.2). Der Regler wurde vom KIT-FAST programmiert und manuell beim Fraunhofer ICT mit dem Versuchswerkzeug und Temperiergeräten von Technotrans getestet. Weiterhin wurden im AP 3.3 die Simulationmethoden von Simutence mit Unterstützung vom KIT-FAST in ein kommerzielles Softwarepaket transferiert.

In AP 3.4 wurde die neue Duromer-Plastifizierung von KraussMaffei konstruiert, gefertigt, montiert und auf der für den Demonstrator geplanten Spritzgießmaschine mit einem vorhandenen Versuchswerkzeug erprobt.

Auch parallel zu den bisherigen Arbeiten wurde im Arbeitspaket 4 die Rezyklat-Zumischung untersucht. Das Fraunhofer ICT hat die Grundlagen zur direkten Rückführung bzw. Rezyklat-Zumischung ermittelt (AP 4.1). Dazu wurden mit dem GHD-Versuchswerkzeug Zugstäbe (2. Wechseleinsatz) gespritzt. Diese wurden zermahlen und mit unterschiedlichem Anteil der Neuware beigemischt. Es wurden anschließend daraus wieder Zugstäbe gespritzt, welche geprüft wurden. Nach diesen Vorversuchen wurde im Rahmen vom AP 4.1 eine Versuchskampagne mit einem Serienbauteil in der Produktion bei Baumgarten durchgeführt. Anschließend erfolgte dafür eine ganzheitliche Bilanzierung (AP 4.2) und Design-Richtlinien wurden erstellt (AP 4.3).

Nach Fertigstellung wurde das von GHD neu gebaute 4-fach-Transponder-Werkzeug bei Baumgarten zusammen mit dem Fraunhofer ICT und Race Result abgemustert (AP 5.2) und es wurden Musterteile hergestellt. Dabei wurden auch Daten zum Füllverhalten für die Kavitätsbalancierung erfasst und der Energieverbrauch gemessen.

Die Spritzgießmaschine von KraussMaffei zur Herstellung des Elektromotorgehäuses wurde für das AP 5.3 definiert und die Voraussetzungen für die Abmusterung wurden geschaffen (Einbau der neuen Duromer-Plastifizierung, Software, Umbaumaßnahmen, Stromversorgung für die Peripherie, usw.). Die Pilotzelle im Spritzgießtechnikum von KraussMaffei wurde mit der benötigten Peripherie aufgebaut. Die Komponenten des automatischen Regelkreises für die Kavitätsbalancierung inklusive der Temperiergeräte von Technotrans wurden zusammen mit dem Fraunhofer ICT und Technotrans installiert und getestet. Das 2-fach-Werkzeug von GHD wurde eingebaut.

Anschließend wurde der Prozess zusammen mit den Projektpartnern Fraunhofer ICT und GHD bei KraussMaffei erarbeitet und optimiert (AP 5.3). Dabei wurde das Werkzeug zweimal bei GHD überarbeitet, d.h. es fanden 3 Abmusterungsschleifen statt.

Nachdem störungsfrei akzeptable Bauteile hergestellt werden konnten, wurden die Energiemessungen für AP 5.4 und Versuche zur Kavitätsbalancierung (Validierung AP 3.2) und zur Rezyklat-Zumischung (Validierung AP 4) durchgeführt. Der Regler der Balancierung wurde seitens KIT-FAST angepasst. Nach weiterer Optimierung wurden Musterteile hergestellt.

Von der im AP 2.2 konstruierten Elektromotor-Getriebe-Einheit wurde vom Fraunhofer ICT ein Demonstrationsmodell, u.a. auch als Schnittmodell mit einem Elektromotor aus dem DEmiL-Projekt [1, 2], angefertigt. Das hergestellte Gehäuse aus AP 5.3 wurde dazu verwendet.

Zum Schluss wurde die ganzheitliche Bilanzierung der Ressourcen- und CO₂-Einsparungen für die beiden Produktinnovationen vom Fraunhofer ICT ermittelt (AP 5.4). Dazu wurden Lebenszyklenanalysen (Life Cycle Analysis (LCA)) erstellt.

1.4 wissenschaftlicher und technischer Stand, an denen angeknüpft wurde

Das Spritzgießen mit duromeren Kunststoffen ist seltener verbreitet als das von Thermoplasten, obwohl hier grundsätzlich ein ähnliches Potential zur Herstellung von Leichtbaustrukturen besteht. Zudem weisen die Duromere Vorteile bezüglich der Medien- und Temperaturbeständigkeit auf. Phenolharz-Formmassen werden in der Regel für strukturelle Anwendungen wie Gehäusebauteile verwendet [3], wohingegen Epoxidharz-Formmassen vorwiegend für funktionelle Anwendungen wie beispielsweise die Umspritzung von elektronischen Komponenten eingesetzt werden (Electronic Packaging) [1].

Rezyklat-Zumischung und direkte Rückführung

Die irreversible Vernetzung der duromeren Formmasse beim Spritzgießen bedeutet, dass das Material im Angussverteiler nicht erneut aufgeschmolzen werden kann wie beim Thermoplast-Spritzgießen, wo eine direkte Rückführung von Angüssen häufig durchgeführt wird. In aller Regel wird der duromere Angussverteiler heute als Abfall entsorgt [4]. Duromere Formmassen können z.B. mittels Shredder, Hammer- und Schneidmühlen zerkleinert werden. Eine direkte Rückführung des Materials, wodurch Transport- und Lagervorgänge minimiert werden, war bisher unüblich bzw. wurde nicht realisiert.

Spritzgießverarbeitung von duromeren Formmassen in Mehrkavitätenwerkzeugen und Kavitätsbalancierung

Die Anwendung von Mehrkavitäten-Werkzeugen gehört schon heute für viele Anwendungen zum Stand der Technik. Dies gilt insbesondere für die Thermoplast-Verarbeitung, wo normalerweise bei der Prozessfindung die Kavitäten bei einem Heißkanal mittels manueller Temperatureinstellung oder durch einen angepassten Angussverteiler balanciert werden. Bei Duromer-Werkzeugen gibt es jedoch keinen Heißkanal und der Angussverteiler sollte während der Produktion nicht geändert werden. Die grundsätzlichen Zusammenhänge zu Beeinflussung des Fließverhaltens für duromere Formmassen sind bekannt und untersucht [5], jedoch wurden diese noch nicht zur Balancierung von Kavitäten verwendet.

Die Verarbeitung von duromeren Formmassen auf Spritzgießmaschinen bis zu einem Schneckendurchmesser von 80 mm ist im Stand der Technik etabliert [6].

Prozesssimulation von duromeren Formmassen

Bei der Prozesssimulation lässt sich das viskose Verhalten duromerer Formmassen bereits gut als Funktion von Temperatur, Scherrate und Aushärtungsgrad beschreiben. Neueste Modelle erlauben sogar die Modellierung des Einflusses von Faserlänge und Faserorientierung, während kommerzielle Software nur ein isotropes Werkstoffverhalten erlaubt [7]. Das thermische Verhalten und die thermische Interaktion mit der Werkzeugwand werden dahingegen noch nicht derartig detailliert modelliert. In kommerzieller Software wird in der Regel eine Dirichlet-Randbedingung für die Materialtemperatur angenommen, die besagt, dass das Material am Werkzeugrand direkt die Temperatur des Werkzeugs annimmt. Dadurch wird eine unrealistische Temperaturverteilung während der virtuellen Formfüllung erzeugt, was sich direkt auf die simulierte Viskosität und Aushärtung auswirkt.

Des Weiteren werden nach dem Stand der Technik die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität konstant oder nur als Funktion der Temperatur beschrieben. Die sich während der Aushärtung bildenden kovalenten Bindungen beeinflussen allerdings nicht nur das viskose, sondern auch das thermische Verhalten der duromeren Formmassen. Um das thermische Verhalten gut abzubilden, sollten die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität auch als Funktion des Aushärtungsgrades modelliert werden [8].

Eine Prozesssimulation sollte neben der Aushärtung auch adäquate Modelle für Viskosität, Temperatur und bei gefüllten Materialsystemen auch für die Faserorientierung enthalten.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit der Projektpartner war sehr gut. Der Informationsaustausch mit den Herstellern von Formmassen, Zubehör wie Knopfzellenbatterien und Geräten wie z.B. Mühlen war produktiv.

Durch die Bereitstellung der Spritzgießmaschinen durch KraussMaffei Technologies, Fraunhofer ICT bzw. Baumgarten und der Werkzeuge durch GHD wurden die Projektpartner generell in die Lage versetzt, die Technologien industriennah zu untersuchen bzw. zu demonstrieren.

1.6 wesentliche Ergebnisse

Produktinnovation Transponder (AP 2.1, AP 5.1, AP 5.2)

Mit einer ersten Variante des Transponders von Race Result wurden bei Baumgarten zusammen mit dem Fraunhofer ICT Platinen mit einer Batterie umspritzt. Der Prozesseinfluss des Umspritzens auf die Batterie wurde untersucht. Da keine Einstellung gefunden wurde, bei der die Leistung der Batterie ausreichend bzw. akzeptabel war, wurde entschieden, eine neue Variante als Demonstrator anzufertigen. Dazu wurde ein 4-fach-Transponder-Werkzeug von GHD hergestellt und bei Baumgarten zusammen mit dem Fraunhofer ICT und Race Result abgemustert. Von der Produktinnovation Transponder mit Platine ohne Batterie wurden Musterteile hergestellt und erfolgreich die Funktionalität getestet.

Prozessinnovation Kavitätsbalancierung (AP 3.1, AP 3.2, AP 5.3)

Ein Regelalgorithmus wurde vom KIT-FAST entwickelt und ein automatischer Regelkreis bzw. Konzept zusammen mit dem Fraunhofer ICT und Technotrans definiert. Es wurde die Machbarkeit der Kavitätsbalancierung bzw. des Reglers mittels eines Versuchswerkzeugs, welches von GHD mit einem Kontureinsatz von Technotrans gebaut wurde, beim Fraunhofer ICT manuell nachgewiesen.

Bei der Pilotanlage für das Elektromotorgehäuse wurde der automatische Regelkreis von Fraunhofer ICT, Technotrans, KraussMaffei und KIT-FAST umgesetzt und getestet. Die Funktionsweise der Regelung wurde verifiziert. Jedoch konnte das Füllverhalten bei dem Demonstrator-Werkzeug nicht durch einen Temperaturunterschied von bis zu 30°C beeinflusst werden.

Simulationen

Das KIT-FAST und Simutence verbesserten für das Duomer-Spritzgießen die Simulationsmethoden bzw. entwickelten Algorithmen für die Prozessinnovationen, welche mit den Projektpartnern validiert wurden. Simutence überführte in AP 3.3 die Methodik für die virtuelle Kavitätsbalancierung in eine kommerziell verfügbare Simulationssoftware. Weiterhin wurden Simulationen, insbesondere Füllsimulationen, für die verschiedenen Arbeitspakete durchgeführt.

Entwicklung einer Duomer-Plastifizierung für größere Schussvolumen (AP 3.4)

KraussMaffei konzipierte, konstruierte und fertigte eine neue Prototyp-Plastifizierung für rieselfähige Duomere mit dem Schneckendurchmesser 90 mm an. Diese wurde mittels eines Versuchswerkzeugs mit verschiedenen Duomeren erprobt und im Arbeitspaket 5.3 für die Herstellung des Elektromotorgehäuses verwendet.

Prozessinnovation Rezyklat-Zumischung bzw. direkte Rückführung (AP 4)

Am Fraunhofer ICT wurden Untersuchungen zur Granulierung bzw. Zerkleinerung von Duomeren durchgeführt und dabei ein Verfahren im Labor erarbeitet. Mit einem Versuchswerkzeug „Zugstäbe“ wurde u.a. der mechanische Einfluss von Rezyklat-Zumischung untersucht. An einer Serienproduktion bei Baumgarten wurde eine Rezyklat-Rückführung umgesetzt und untersucht. Dabei wurde bis zu 8% Rezyklatanteil erreicht.

Ein Konzept zur direkten Rückführung und Richtlinien wurden vom Fraunhofer ICT und Baumgarten erarbeitet. Beim Demonstrator Elektromotorgehäuse wurde jedoch wegen grenzwertigem Spritzdrucks prozesstechnisch nur 2% Rezyklatanteil erreicht.

Produktinnovation Elektromotorgehäuse (AP 2.2, AP 5.1, AP 5.3)

Nach Erstellung des Konzepts für die Elektromotor-Getriebe-Einheit wurde das Gehäuse für den Elektromotor vom Fraunhofer ICT konzipiert und konstruiert. Ein 2-fach-Werkzeug wurde von GHD konstruiert und gebaut. Die

Pilot-Spritzgießzelle wurde bei KraussMaffei aufgebaut und das Werkzeug wurde in mehreren Schleifen abgemustert. Dabei wurde der grenzwertige Spritzdruckbedarf u.a. durch Vergrößerung der Anschnitte bzw. Stangenangüsse reduziert. Nach der Werkzeug- und Prozessoptimierung wurden Musterteile hergestellt. Es fanden anschließend weitere Versuche zu den Arbeitspaketen AP 3, AP 4 und AP 5.4 statt.

Elektromotor-Getriebe-Einheit – Konstruktion und Modell (AP 2.2)

Die Elektromotor-Getriebe-Einheit wurde vom Fraunhofer ICT „Neue Antriebssysteme“ (ICT-NAS) konstruiert und Demonstrator-Modelle von der Elektromotor-Getriebe-Einheit wurden unter Verwendung der im AP 5.3 gespritzten Gehäuse angefertigt.

Ganzheitliche Bilanzierung (AP 4.2, AP 5.4)

Die Ökobilanzen wurden vom Fraunhofer ICT „Umwelt Engineering“ (ICT-UE) erstellt. Von beiden Produktinnovationen (AP 5.2, AP 5.3) und von der Rezyklat-Untersuchung in der Serienfertigung (AP 4.1) wurde der Energieverbrauch für die Bilanzierungen gemessen und Daten erfasst. Mit den Daten aus den Versuchen wurden dann die Lebenszyklusanalysen (LCA) erstellt.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Darstellung der durchgeführten Arbeiten

Nachfolgend werden die Arbeiten und erzielten Ergebnisse beschrieben, wobei diese bei Abweichung mit der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung verglichen werden.

Bei allen Arbeitspaketen haben sich die Projektpartner gegenseitig unterstützt bzw. beratend agiert.

Übersicht der Arbeitspakete und Meilensteine

| AP | Titel |
|--------|--|
| AP 1 | Koordination, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit |
| AP 2 | Konstruktion der Leichtbau-Demonstrationsanwendungen |
| AP 2.1 | Bauteilkonzeption und -konstruktion Transponder |
| AP 2.2 | Bauteilkonzeption und -konstruktion Elektromotor-Getriebe-Einheit |
| AP 3 | Prozess- / Anlagenentwicklungen |
| AP 3.1 | Entwicklung und Simulation Balancierung, Definition Anforderungen |
| AP 3.2 | Entwicklung, Umsetzung Balancierkonzept in Versuchswerkzeug |
| AP 3.3 | Transfer Simulationsmethoden in kommerzielles Softwarepaket |
| AP 3.4 | Anlagenentwicklung Steigerung Volumen pro Zyklus |
| AP 4 | Grundlagenuntersuchungen direkte Rückführung |
| AP 4.1 | Ermittlung Einfluss Rezyklatanteil / -gestalt auf Eigenschaften |
| AP 4.2 | Ganzheitliche Bilanzierung direkte Rückführung |
| AP 4.3 | Ableitung Design-Richtlinien für Verwendung direkter Rückführung |
| AP 5 | Aufbau Pilotanlagen, Demonstration entwickelter Technologien |
| AP 5.1 | Werkzeugkonstruktion und -fertigung Transponder |
| AP 5.1 | Werkzeugkonstruktion und -fertigung Elektromotor-Getriebe-Einheit |
| AP 5.2 | Aufbau / Inbetriebnahme Pilotanlage Transponder-Umspritzung |
| AP 5.3 | Aufbau / Inbetriebnahme Pilotanlage Elektromotorgehäuse |
| AP 5.4 | Ganzheitliche Bilanzierung der Ressourcen- und CO ₂ -Einsparungen |

| Meilenstein | Beschreibung |
|-------------|---|
| M1 | Bauteilkonzeption der Demonstrationsanwendungen abgeschlossen. Freigabe für Detailkonstruktion erteilt. |
| M2 | Designrichtlinien für direkte Rückführung definiert und den Bauteilkonstrukteuren zur Verfügung gestellt. |
| M3 | Detailkonstruktion der Demonstrationsanwendungen abgeschlossen. Freigabe für Werkzeugfertigung erteilt. |
| M4 | Grundlagenuntersuchungen Prozessentwicklungen abgeschlossen. |
| M5 | Inbetriebnahme der Pilotanlagen |

2.1.1 Koordination, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit (AP 1)

KraussMaffei Technologies hatte bei diesem Förderprojekt die Gesamtprojektleitung bzw. die Projektkoordination des Gesamtvorhabens. Neben den virtuellen Regelkonferenzen per Teams in jeder bzw. jeder zweiten Woche wurden die halbjährigen Konsortialtreffen und das Abschlusstreffen mit Unterstützung der Projektpartner organi-

sirt und durchgeführt. Bei den Projekt-Regelterminen wurden die bisherigen Ergebnisse und das weitere Vorgehen mit allen Projektpartnern für die nächsten ein bis zwei Wochen besprochen. Dazwischen fanden Besprechungen bezüglich der Themenbereiche bzw. Arbeitspakete mit den involvierten Partnern bzw. „bilaterale“ Besprechungen statt. Informationsaustausch, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit waren die Aufgabe aller Projektpartner.

2.1.2 Material- und prozessgerechte Konstruktion der Leichtbau-Demonstrationsanwendungen (AP 2)

In diesem Arbeitspaket wurden die beiden Demonstratoranwendungen konstruktiv umgesetzt. Das Ziel, für beide Anwendungen eine vollständige Produktentwicklung von Konzept zur abgeschlossenen Konstruktion durchzuführen, wurde erreicht und damit der Meilenstein M1 abgeschlossen.

Unter Zuhilfenahme von Kreativitäts- und Gestaltungsmethoden wurden von den Bauteilkonstrukteuren (Fraunhofer ICT, Race Result) mehrere Lösungsmöglichkeiten erarbeitet und in Abstimmung mit den Prozess-, Simulations- und Werkzeugexperten (Baumgarten, KIT-FAST, Fraunhofer ICT, GHD) bewertet. Für die beiden Anwendungen wurde schließlich jeweils ein Konzept ausgewählt, welches die Produkthanforderungen erfüllt und zugleich fertigbar ist. Nach der Freigabe wurden die Bauteilkonstruktionen detailliert ausgearbeitet und das Formfüllverhalten mit dem Ziel der Vermeidung von Bindenähten und Luftporen simuliert. Auf duromergerechte Konstruktionen (Radien, Kontursprünge, usw.) hat insbesondere Baumgarten dabei geachtet. Eine rechnerische Absicherung der Funktionen in Form von analytischen Festigkeitsberechnungen oder Struktursimulationen wurde durchgeführt.

2.1.2.1 Bauteilkonzeption und -konstruktion Transponder (AP 2.1) Vorversuche – Machbarkeitsuntersuchungen zum Umspritzen einer Batterie

Ziel des Endkunden Race Result war die Entwicklung eines kompakten und robusten Aktiv-Transponders mit integriertem Energiespeicher, bei dem die Elektronik inklusive Knopfzelle im Spritzgießverfahren mit einer duromeren Formmasse komplett umspritzt werden sollte. Der Fokus lag dabei auf der Integration aller Bauteile in einem schützenden Gehäuse, welches mechanische Stabilität, Temperaturbeständigkeit sowie Wasserdichtigkeit gewährleistet. Außerdem sollte durch die Substitution von spritzgegossenem Thermoplastgehäuse und dem aufwendigen Vergussprozess der Elektronik mit Polyurethan durch Umspritzen mit Epoxidharz die Ökobilanz verbessert werden. Fraglich war hierbei, ob die Batterie den Beanspruchungen im Spritzgießprozess gewachsen ist.

Dazu wurden zuerst Machbarkeitsuntersuchungen durchgeführt:

- Infrage kommende Duromere wurden hinsichtlich niedriger Verarbeitungs- bzw. Härtungstemperaturen und elektromagnetischer Eigenschaften ausgewählt. Besonders wichtig sind die Permittivität ϵ_r („Epsilon r“), welche für die problemlose Signalübertragung durch das Material hindurch entscheidend ist, und der Verlustfaktor $\tan \delta$ („Tangens Delta“), der bestimmt welcher Anteil des Signals vom Material absorbiert wird.
- Ölbadversuche beim Fraunhofer ICT

Ölbadversuche

In der frühen Projektphase wurden erste Untersuchungen von Fraunhofer ICT und Race Result zur Temperaturbelastbarkeit der eingesetzten Knopfzellen durchgeführt. Hierzu wurden Batterien in einem Ölbad in temperiertem Öl eingetaucht und für unterschiedliche Zeiträume erhitzt und anschließend entladen.

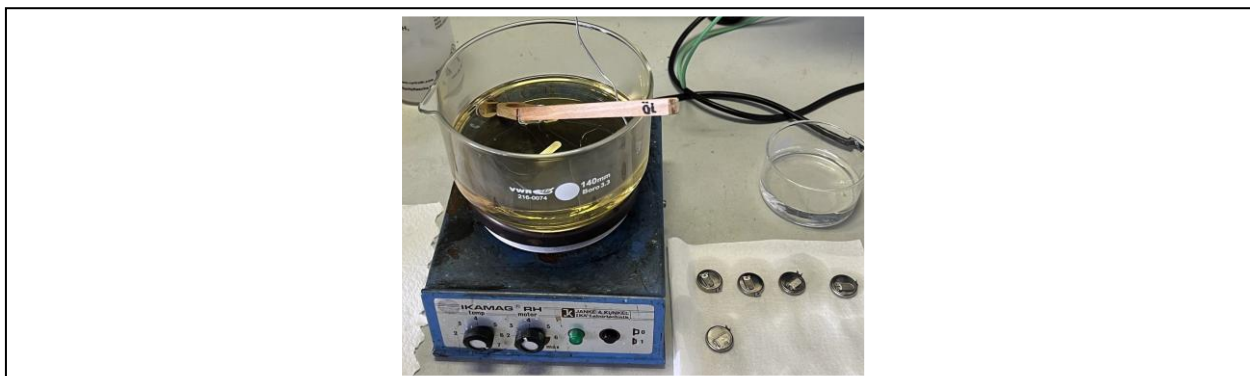


Abbildung 1: Ölbad-Experiment (Quelle: Fraunhofer ICT)

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Belastung von bis zu 300 s bei 130°C keinen signifikanten Einfluss auf Spannung und Kapazität hatte. Die verbleibende Kapazität wurde durch Entladeversuche ermittelt (siehe Abbildung 2).

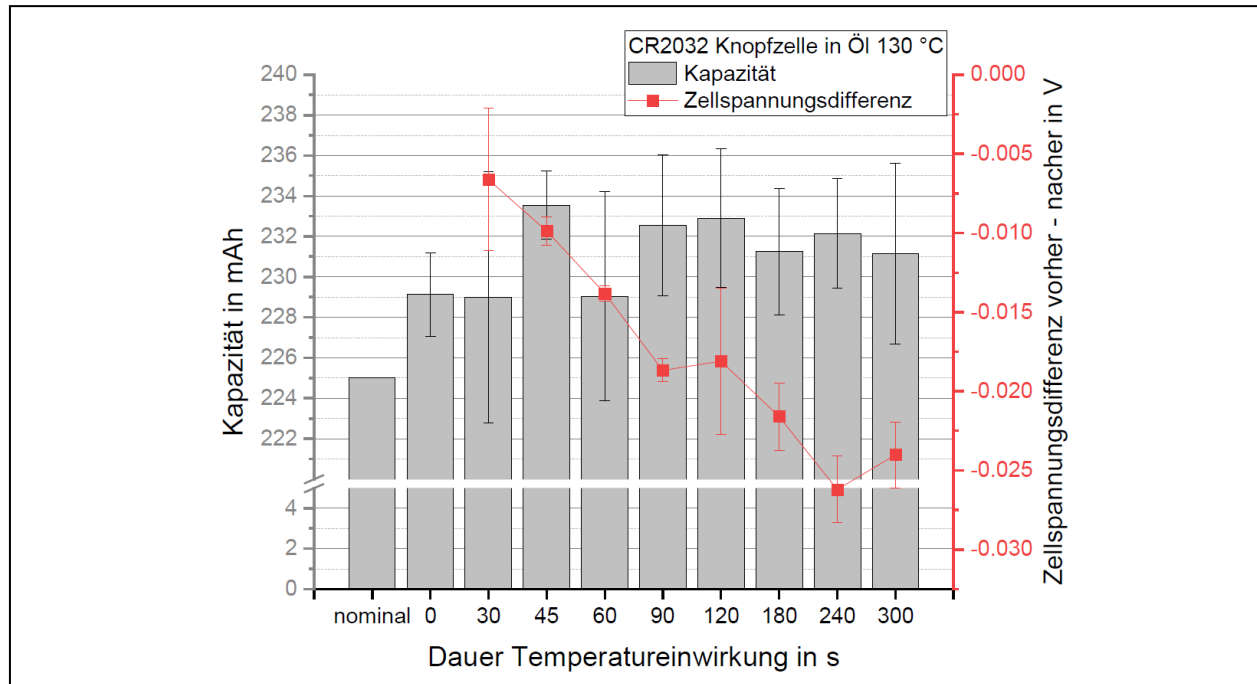


Abbildung 2: Ergebnisse der Ölbad-Experimente bei 130°C (Quelle: Fraunhofer ICT, Race Result)

Daraufhin wurden Versuche mit höheren Temperaturen durchgeführt, wobei sich ab 150°C und längeren Verweilzeiten (z. B. 300 s) eine deutlich reduzierte Restkapazität zeigte. Außerdem wurden Dichtungen der Knopfzellen beschädigt. Temperaturen über 140°C führten in einigen Fällen zu einer Beschädigung der Batteriedichtung. In der Folge wurde ein Limit von 140°C für maximal 600 s als gerade noch zulässig bestimmt. Dennoch war fraglich, ob diese Bedingungen die tatsächliche Belastung beim Spritzgießprozess ausreichend abbilden.

2.1.2.2 Bauteilkonzeption und -konstruktion Transponder (AP 2.1) Versuchskonzept – Umspritzen einer Platine mit Batterie

Für den batteriebetriebenen Transponder zur Zeitmessung bei Sportveranstaltungen wurde die Platine und der Transponder von Race Result unter Berücksichtigung des neuen Fertigungskonzepts Umspritzen neu konstruiert. Dabei haben die Projektpartner Baumgarten, GHD, KIT-FAST und Sumitomo Bakelite mit ihren jeweiligen Kompetenzen im Bereich des Werkzeugbaus, der Prozesssimulation sowie der verwendeten Epoxidharz-Formmasse unterstützt.

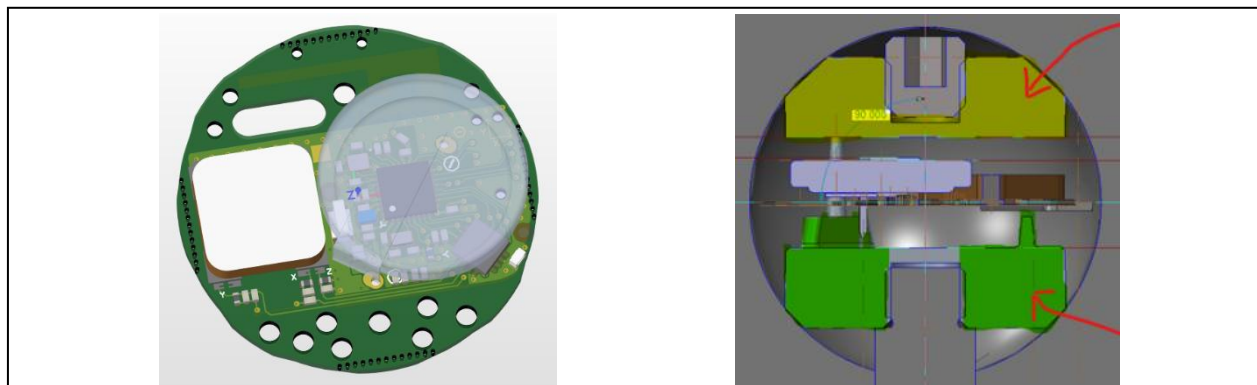


Abbildung 3: Modifizierte Platine für das Kugel-Versuchswerkzeug und Schnittansicht der Platine im Kugel-Versuchswerkzeug mit Werkstückträger (gelb, grün) (Quelle: Race Result, Baumgarten)

Ein vorhandenes Versuchswerkzeug von Baumgarten wurde angepasst bzw. umgebaut, welches dann die Integration einer funktionsfähigen Transponderplatine inklusive Batterie erlaubte. Es wurde eine Kavität mit einem

kugelförmigen Bauteil und der Platinaufnahme (Werkstückträger) eingefügt. Die Platinen wurden in Zusammenarbeit mit Baumgarten von Race Result angepasst, mit Haltepunkten versehen und teilweise bestückt.

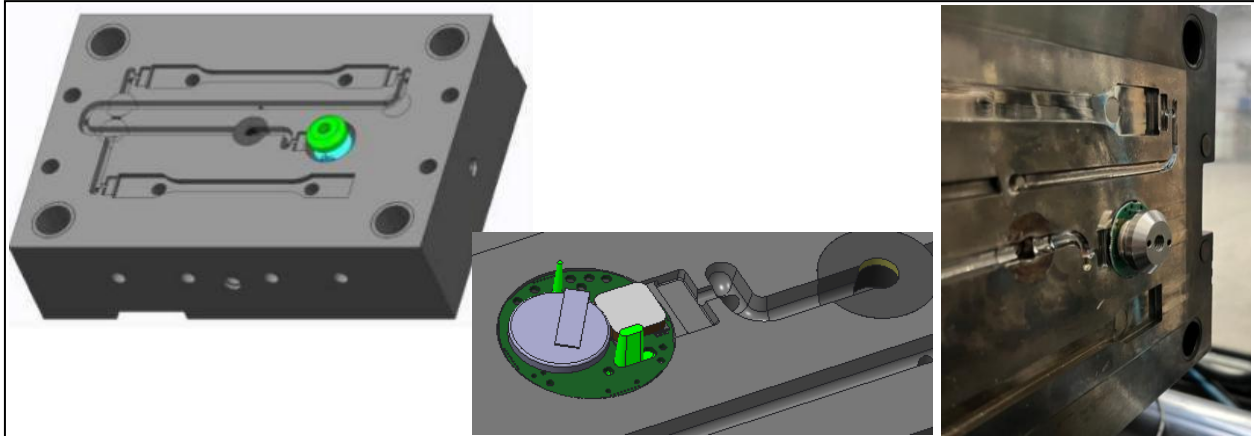


Abbildung 4: Anpassung eines vorhandenen Werkzeugs für Umspritzversuche – Bauteil Kugel (Quelle: Baumgarten)

2.1.2.3 Transponder-Umspritzung Vorversuche – Umspritzen einer Platine mit Batterie

Mit Unterstützung von Race Result und Fraunhofer ICT wurden mit dem angepassten Werkzeug bei Baumgarten Versuche bzgl. Umspritzen der Platine mit aufgelöteter Batterie inkl. Untersuchungen durchgeführt. Die Knopfzellenbatterien (Typ CR2032) und Test-Platinen wurden von Race Result bereit gestellt.

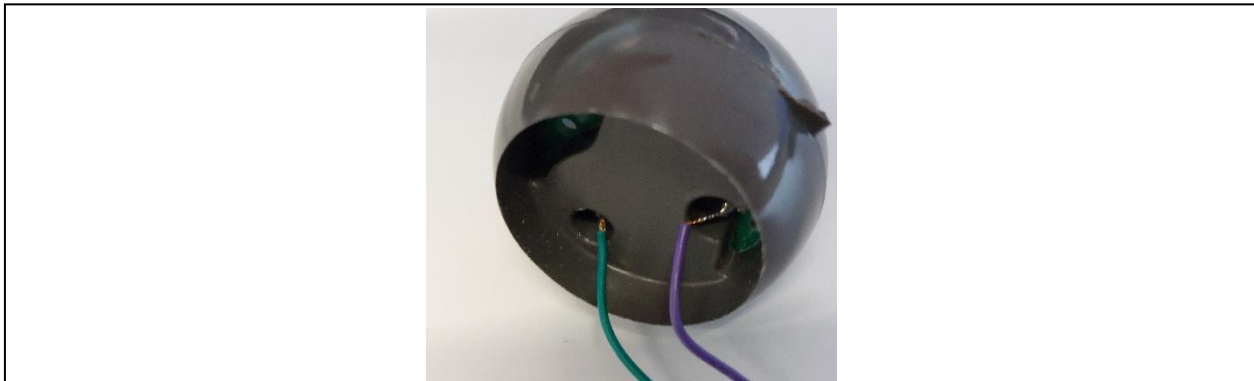


Abbildung 5: kugelförmiges Bauteil mit umspritzter Elektronik (Quelle: Fraunhofer ICT, Baumgarten)

Als Formmasse wurde ein bei niedrigen Temperaturen vernetzendes Epoxidharz von Raschig gewählt (EP 3162). Da die Werkzeuginnendrucke aufgrund von Limitationen in der Geometrie des Versuchswerkzeugs nicht messbar waren, wurde eine Abschätzung des Innendrucks simulativ beim KIT-FAST durchgeführt. Es wurden mehrere Versuchskampagnen bzw. Optimierungsschleifen bei Baumgarten durchgeführt.

Unter anderem wurde die Aufnahme für die Platine bzw. das Einlegerkonzept in mehreren Schritten optimiert. Die Druckfläche wurde vergrößert. Haltestifte wurden neu positioniert, sodass die Transponder-Platine in alle Richtungen fixiert wurde. Dazu musste auch die Platine angepasst werden. Um die Kraftereinwirkung durch den Füllprozess zu reduzieren, wurde seitens Baumgarten auch ein Strömungsstörer bzw. eine Fließsperre am oberen Werkstückträger nahe des Anspritzpunkts integriert. Ziel war dabei, die in die Kavität einströmende Kunststoffmasse abzubremesen und ein direktes Anströmen der Elektronik zu vermeiden, womit die Fließgeschwindigkeit und der Materialdruck auf die Platine mit der Batterie reduziert werden sollte.

Bei den Versuchen wurden die Spritzgießparameter systematisch variiert bzw. so angepasst, dass sich beim Umspritzungsvorgang ein möglichst geringer Innendruck einstellt, da dies vorher als wahrscheinlicher Schädigungsmechanismus isoliert wurde.

Dafür wurde durch das Fraunhofer ICT ein Versuchsplan entworfen und mit Race Result und Baumgarten abgestimmt. Der Einleger zur Fixierung der Transponder-Platine sowie die Transponder-Platine selbst wurden für eine beschädigungsfreie Fixierung von den Projektpartnern angepasst und gefertigt.

Von den Parametereinstellungen wurden jeweils mehrere Bauteile hergestellt und untersucht.

Überprüfung der umspritzten Transponder

Bei den gefertigten Aktiv-Transpondern wurde eine Funktionsüberprüfung (Kommunikation via Antenne), eine Restkapazitätsbestimmung und eine CT-Untersuchung von Fraunhofer ICT und Race Result durchgeführt und ausgewertet. Die elektrische Restkapazität wurde dabei über Entladeversuche ermittelt (definiertes Entladen über Zeit).

Viele der umspritzten Transponder schienen anfänglich noch zu funktionieren, was mit einem Kommunikationsmodul von Race Result abgesichert wurde. Das bedeutet, dass die Antenne und die Halbleiterelemente auf der Platine den Überspritzvorgang unbeschadet überstehen; jedoch war die Lebensdauer bzw. Restkapazität allerdings drastisch nach 72 Stunden verringert und bei 50% der Transponder war die Kommunikation gar nicht mehr möglich, was auf Selbstentladung der Batterien als Versagensursache hindeutet. Da alle Restkapazitäten entgegen der Prognose aus den Machbarkeitsuntersuchungen erheblich unter der Nennkapazität von 235 mAh lagen, wurde entschieden, die Transponder zusätzlich mittels Computertomographie (CT-Scan) auf mögliche mechanische Beschädigungen zu untersuchen.

CT-Untersuchung der umspritzten Transponder

Neben der Untersuchung der verbleibenden elektrischen Kapazität wurden ebenfalls CT-Scan-Bilder angefertigt. Damit war es möglich, die Beschaffenheit der umspritzten Elemente und die entsprechende Auswirkung der Umspritzung zu analysieren.

Das Fraunhofer ICT führte die CT-Scans der umspritzten Transponderplatinen durch (siehe Abbildung 6).

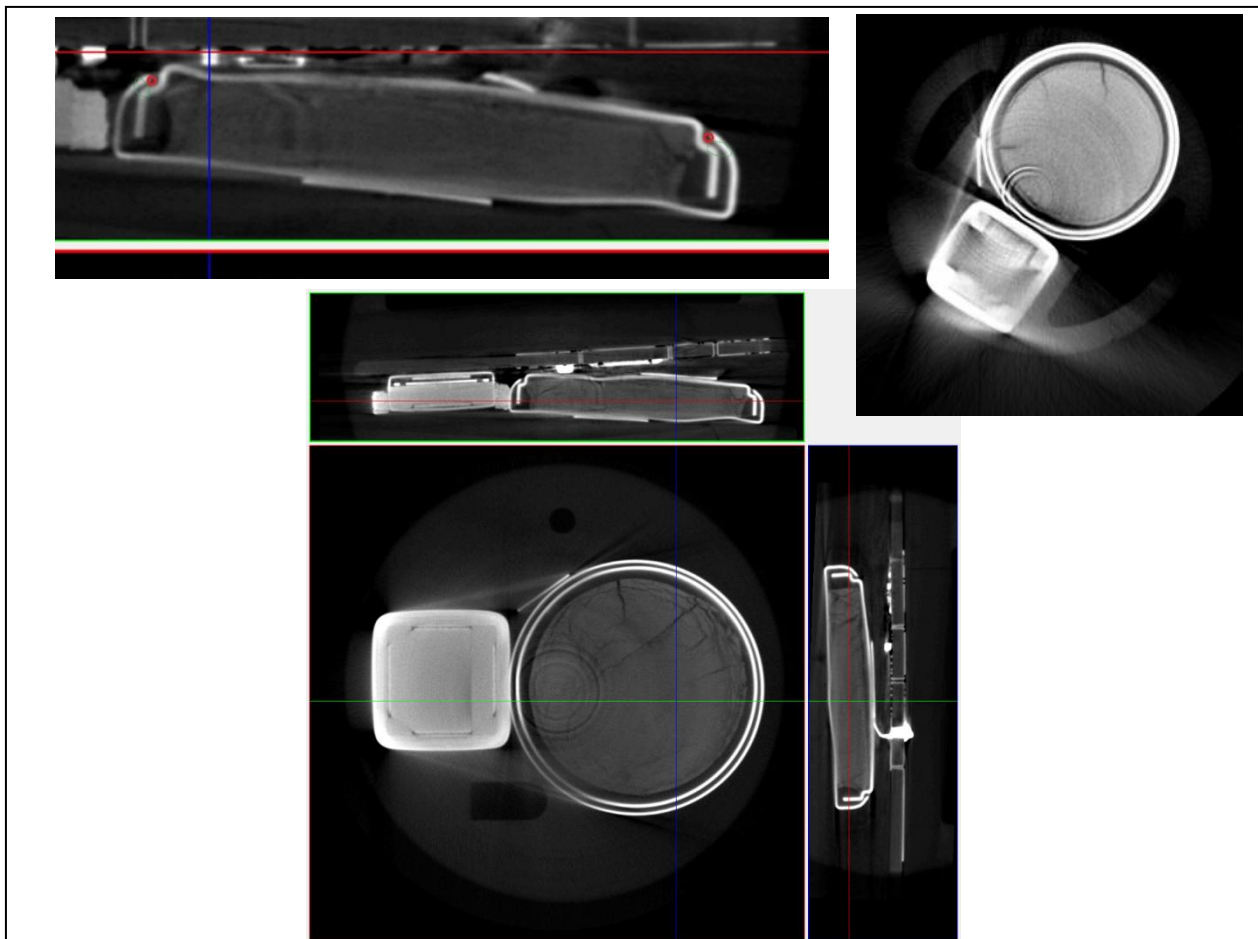


Abbildung 6: CT-Scans der Transponder (Quelle: Fraunhofer ICT)

Dabei wurden insbesondere bei voll bestückten Platinen starke Verformungen der Knopfzellen festgestellt. Teilweise zeigten sich Risse im Zellmaterial. In einigen Fällen bestand der Verdacht auf interne Kurzschlüsse durch verformte Gehäuseteile. Eine klare Trennung zwischen mechanisch bedingtem Ausfall und thermisch induzierter Degradation war nicht möglich. Es hat sich gezeigt, dass die Batterien im Test, welche eine sehr niedrige bzw. keine Restkapazität mehr aufwiesen, auch ausgeprägte Dellen und Verformungen des Blechgehäuses aufwiesen.

Nach der Optimierung der Parameter und der Platinen-Aufnahme gab es trotzdem noch mechanische Beschädigungen (wie Risse).

Ergänzende Entladeversuche mit den überlebenden Zellen zeigten deutlich reduzierte Kapazitäten. Der Batteriehersteller bestätigte, dass bei hohen Temperaturen eine Entmischung des Elektrolyten auftreten kann, was zu Gasbildung, Dampfkanälen und langfristiger Degradation führt. Warum die Ölbadversuche bessere Ergebnisse lieferten als das tatsächliche Umspritzen, konnte nicht abschließend geklärt werden.

Aufgrund der wiederholten Ausfälle nach dem Umspritzen wurde nach alternativen Batterietypen mit höherer Temperaturbeständigkeit gesucht. Eine gefundene Alternative wurde wegen zu geringer Kapazität verworfen, da sie nicht die geforderte Lebensdauer garantieren konnte.

Fazit

- Die Knopfzellen verloren bei zu hoher oder zu langer Temperaturbelastung deutlich an Kapazität oder wurden gar komplett zerstört.
- Umspritzte Knopfzellen waren oft auch mechanisch beschädigt.

Dies führte zur Erkenntnis, dass die Umspritzung der Elektronik samt Batterie zwecks notwendiger Lebensdauer und Zuverlässigkeit nicht praktikabel ist. Da die Batterien nach dem Umspritzen nicht ausreichend funktionsfähig waren, wurde die Entscheidung getroffen, für den Demonstrator das Konzept grundlegend zu ändern.

2.1.2.4 Bauteilkonzeption und -konstruktion Transponder (AP 2.1) Demonstrator-Konzept – Umspritzen einer Platine ohne Batterie

Anstatt einer kompletten Umspritzung der Platine samt Batterie wurde beim Demonstrator das Konzept umgesetzt, nur die Elektronik zu umspritzen und somit weiterhin mechanisch zu schützen und entsprechende Kontakte auf der Platine anzubringen, die das Wechseln der Batterie ermöglichen. Anschließend muss die umspritzte Elektronik in das vorhandene Transponder-Gehäuse eingeschweißt werden. Hierdurch wurden die ursprünglichen Ziele bezüglich des Schutzes der Platine erreicht, während man gleichzeitig ein einfacheres Recyceln bzw. eine Wiederverwendung des Bauteils durch einen Batteriewechsel umsetzte. Die CO₂-Bilanz wurde also beim Demonstrator durch eine Verlängerung der Lebensdauer verbessert.



Abbildung 7: neues Konzept – Platine mit Umspritzung der Elektronik ohne Batterie (Quelle: Race Result)

Das neue Konzept beinhaltet:

- eine nur teilweise Umspritzung des Transponders mit wechselbarer Batterie
- eine mechanisch durch Duromer geschützte Elektronik
- Mediendichtigkeit durch Verschweißen in ein Thermoplastgehäuse

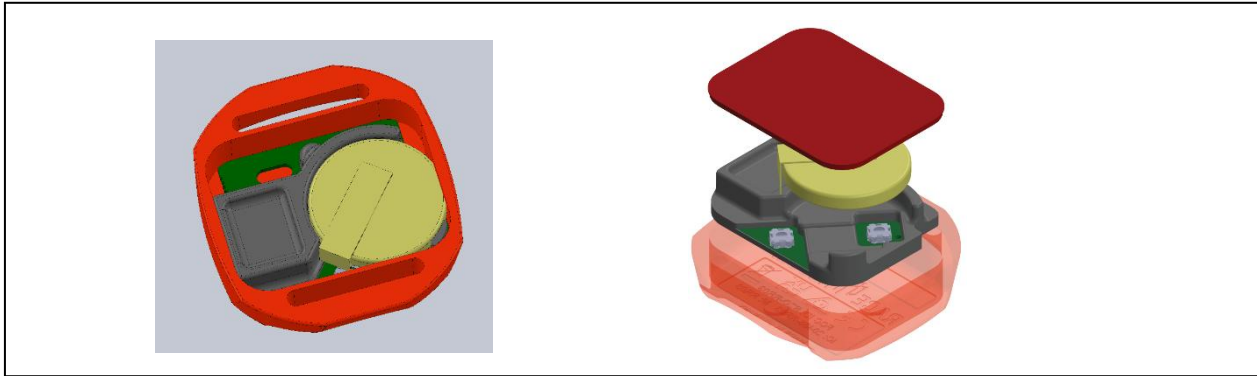


Abbildung 8: Transponder laut neuem Konzept (Quelle: Race Result)

Die Umspritzung dient somit nur noch dem mechanischen Schutz der Elektronik. Dadurch ergibt sich zusätzlich ein Vorteil hinsichtlich Recycling und Materialeinsparung. Das Duromermaterial kann reduziert werden; und durch die Trennung von Batterie, Platine und Gehäuse wird die Entsorgung vereinfacht bzw. die Komponenten können jeweils einer materialgerechten Entsorgung zugeführt werden, was diesen Umweltaspekt verbessert.

Für die Umsetzung wurde die Platinengeometrie seitens Race Result angepasst, sodass eine wechselbare Knopfzelle angeschlossen werden kann. Die mechanische Gestaltung der Umspritzung wurde mit GHD und Baumgarten abgestimmt, insbesondere im Hinblick auf Mindestwandstärken und die Kompatibilität mit dem bestehenden Gehäuse. Bei den Mindestwandstärken sowohl von Werkzeug als auch Bauteil spielten auch die Toleranzen der Platinen eine Rolle.

2.1.2.5 Bauteilkonzeption und -konstruktion Elektromotor-Getriebe-Einheit (AP 2.2) Konstruktion und Modellfertigung der Gesamteinheit

Parallel zum Transponder-Demonstrator wurde eine Elektromotor-Getriebe-Einheit (EMG) z.B. für Schwerefahrzeuge oder Fahrzeuge von der Abteilung „Neue Antriebssysteme“ (NAS) des Fraunhofer ICT mit Unterstützung von Baumgarten entwickelt. Ausgangsbasis war der vorhandene Elektromotor aus dem Projekt DEmiL [1, 2], welcher um ein direkt integriertes Getriebe erweitert wurde, um somit die Leistungsdichte auf ca. 60 kW und damit den Leichtbaugrad weiter zu steigern.

Dabei wurden folgende Funktionen integriert:

- Drehmomentabstützung
- Phasenstecker
- Rotorkühlung
- Stützlager
- Lagersitz

Kenndaten:

- Getriebeübersetzung 1:3
- Drehzahl 12.000 1/min

Als Teil der gesamten Einheit wurde das Gehäuse für den Elektromotor aus Phenolharz als Demonstrator-Anwendung ausgewählt.

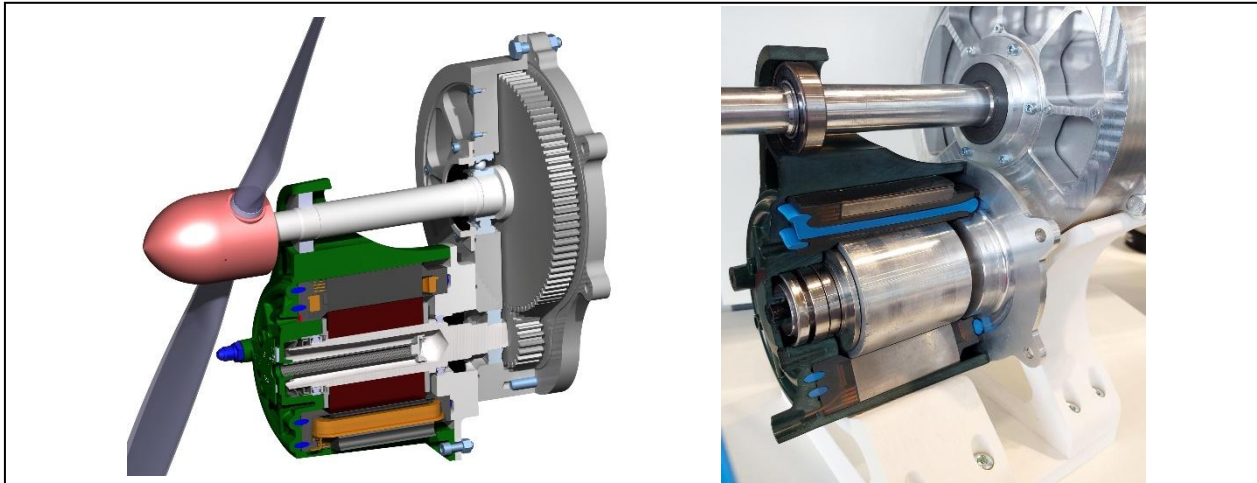


Abbildung 9: Schnittbild der Elektromotor-Getriebe-Einheit und Modell (Quelle: Fraunhofer ICT)

Erstellung von Modellen der Elektromotor-Getriebe-Einheit

Vom Fraunhofer ICT wurde auf Basis der in AP 2.2 erstellten Konstruktion der gesamten Elektromotor-Getriebe-Einheit vier Modelle angefertigt, bei denen das gespritzte Gehäusebauteil (grün) eingefügt wurde.

2.1.2.6 Bauteilkonzeption und -konstruktion Elektromotor-Getriebe-Einheit (AP 2.2) Demonstrator – Elektromotorgehäuse

Das Elektromotorgehäuse wurde vom Fraunhofer ICT mit Unterstützung vom KIT-FAST konzipiert und konstruiert. GHD und Sumitomo Bakelite waren als Formenbauer bzw. Materialhersteller ebenfalls unterstützend in Bezug auf die Produktentwicklung des Gehäuses tätig. Die Funktion des Bauteils wurde z.B. hinsichtlich der Lagerkräfte und des abzustützens Drehmoments konstruktiv umgesetzt. Als Formmasse wurde ein Phenolharz mit Glasfaser (PF-GF55), Vyncolit® X7530 von Sumitomo Bakelite, gewählt.



Abbildung 10: Bauteil Elektromotorgehäuse (Quelle: Fraunhofer ICT)

Ziel war ein Leichtbau-Design mittels Substitution von Metall mit Duromer-Compounds. Die komplexe Innenkontur des Gehäuses für Dichtnuten und Kühlkanäle kann metallisch nicht wirtschaftlich hergestellt werden. Jedoch ist auch beim spritzgegossenen Gehäuse eine anschließende mechanische Nachbearbeitung notwendig, in der der mittige Anguss ausgebohrt sowie die Bohrungen in den Laschen zur Verschraubung am Boden des Gehäuses noch eingebracht werden müssen.

Die zusätzliche Lagerstelle am Außendurchmesser wurde mittels FEM analysiert und stark versteift, um die auftretenden Kräfte aufnehmen zu können. In Zusammenarbeit mit Baumgarten und GHD wurde die Konstruktion hinsichtlich der Fertigbarkeit weiter optimiert.

Bauteilinformationen:

- Gewicht: ca. 1070 g
- Durchmesser ca. \varnothing 140 mm
- Höhe ca. 150 mm

2.1.3 Prozess- und Anlagenentwicklung für das Mehrkavitäten-Duromer-Spritzgießen (AP 3)

In diesem Arbeitspaket wurden mit der aktiven Kavitätsbalancierung sowie der Plastifizierungsentwicklung zur Steigerung des Schussvolumens zwei der insgesamt drei Prozessinnovationen bearbeitet.

Die aktive Kavitätsbalancierung wurde simulativ entwickelt sowie in einem experimentellen Versuchswerkzeug validiert. Die Anwendung der aktiven Kavitätsbalancierung wurde damit im Demonstrator-Werkzeug Elektromotorgehäuse (AP 5.3) ermöglicht. Die Simulationsmethoden wurden als Erweiterung für eine kommerziell verfügbare Simulationssoftware umgesetzt.

Beim Duromer-Spritzgießen erfolgt die Formfüllung in eine beheizte Kavität, in der eine irreversible Aushärtungsreaktion stattfindet [9]. Das Erreichen einer gleichmäßigen Füllung in allen Kavitäten bei Mehrkavitäten ist entscheidend für das Erreichen identischer Bauteileigenschaften. Im Idealfall sollten beim Duromer-Spritzgießen mit mehreren Kavitäten alle Kavitäten gleichzeitig gefüllt werden. In der Praxis ergeben sich jedoch Herausforderungen durch Faktoren wie Gravitation, inhomogene Temperaturverteilung, Schwankungen der Formoberflächenqualität aufgrund von Verschleiß und Maßunterschiede im Angussystem bzw. in den Bauteilen. Diese Faktoren führen zu einer ungleichmäßigen Füllung [10-12].

Dies erfordert eine Methode zum Erreichen einer balancierten Füllung aller Kavitäten eines Werkzeugs, um Ausschuss zu reduzieren. Es existieren bereits verschiedene Strategien zur Kavitätsbalancierung in der Thermoplastverarbeitung, wie z.B. der Einsatz verstellbarer Schieber zur Modifikation des Fließkanalquerschnitts, oder gezielte Temperaturkontrolle einzelner Verteiler in Heißkanalsystemen [10]. Diese Methoden beeinflussen die Materialviskosität sowie das Fließverhalten und helfen somit, ein ausgewogenes Füllverhalten zu erreichen. Eine Prozessüberwachung, durch Messung des Werkzeuginnendrucks und der Materialtemperatur ist bei der Anpassung des Fließquerschnitts oder der Temperatur notwendig, um die Formfüllung zu bewerten [11].

Das Arbeiten zielen darauf ab, das Problem der ungleichmäßigen Füllung beim Mehrkavitäten-Duromer-Spritzgießen mit Hilfe der Fließkanaltemperierung zu lösen. Dieser Ansatz nutzt das thermoviskose Verhalten von Duromer-Formmassen und die thermische Wechselwirkung zwischen der Formwand und dem Material. Da Temperaturänderungen die Viskosität des Harzes direkt beeinflussen, können durch gezielte Erwärmung und Abkühlung die Viskosität und die Aushärtungsgeschwindigkeit des Harzes und somit die lokale Fließgeschwindigkeit während des Formfüllprozesses modifiziert werden. Durch Kontrolle der Temperatur der Fließkanäle oder der Angussverteiler ist es möglich, eine gleichmäßige Füllung zu erreichen. Die Zieltemperaturen für die Fließkanäle zum Erreichen einer balancierten Füllung werden hier mit einem Fuzzy-Logic-Controller (FLC) berechnet [13]. Diese Vorgehensweise wurde zunächst an Vorversuchen mit einem einfachen Zwei-Kavitäten-Versuchswerkzeug erprobt. Schließlich wurde die aktive Kavitätsbalancierung am Demonstrator Elektromotorgehäuse mit zwei Kavitäten in einem automatisierten, geschlossenen Regelkreis getestet.

Der Meilenstein M4 wurde mit dem Abschluss der Grundlagenuntersuchungen (AP 3.1, AP 3.2) und der prototypischen Plastifiziereinheit für große Schussvolumen (AP 3.4) erreicht.

2.1.3.1 Entwicklung der Simulation hinsichtlich Balancierung, Definition der Anforderungen (AP 3.1)

Zur Entwicklung der aktiven Kavitätsbalancierung mussten zunächst die Simulationsmethoden für die Spritzgießsimulation von duromeren Formmassen durch das KIT-FAST weiterentwickelt werden. Technotrans unterstützte hierbei mit ihrem Wissen zur kavitätsnahen Temperierung. Ein wichtiger Bestandteil war dabei die simulative Betrachtung des prozessinduzierten Wärmetauschs zwischen duromerer Formmasse und Spritzgießwerkzeug und dessen Einfluss auf Formfüll- und Aushärteverhalten.

Auf Simulationsstudien basierend wurden die Anforderungen an die aktive Kavitätsbalancierung in Form von erforderlichen Temperaturgradienten bzw. Querschnittsänderungen festgelegt. Die technisch realisierbaren Temperaturgradienten (räumlich und zeitlich) als Eingangsparameter für die simulative Entwicklung der aktiven Kavitätsbalancierung wurden von Technotrans definiert. Anschließend erfolgte der Abgleich der benötigten Anforderungen mit werkzeug- und temperiertechnisch umsetzbaren Lösungen.

Es wurde abschließend ein Lastenheft für die Umsetzung der aktiven Kavitätsbalancierung definiert.

Entwurf des Regelkreises

Zur Demonstration der Kavitätsbalancierung bei der Mehrkavitäten-Formfüllung mit einem Zwei-Kavitäten-Versuchswerkzeug wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern Fraunhofer ICT, KIT-FAST, Simutence, GHD und Technotrans ein Regelkreis entworfen. Eine ungleichmäßige Formfüllung wurde durch eine Fließkanaltemperierung kompensiert. Als Reaktion auf eine ungleichmäßige Füllung am Ende eines Einspritzzyklus errechnet der

Regler Soll-Fließkanaltemperaturen für den nächsten Einspritzzyklus. Die Temperaturen wurden anhand der Sensordaten der Temperaturfühler des Testwerkzeugs quantifiziert. Die errechneten Fließkanal-Solltemperaturen wurden dann von einem Temperiergerät im Versuchswerkzeug geregelt (siehe Kapitel 2.1.3.3). Für die Balancierung der Kavitäten im Zwei-Kavitäten-Werkzeug wurde ein Fuzzy-Logic-Controller (FLC) [13] modelliert und dessen Funktionalität in einem virtuellen Regelkreis gegen anliegende Störgrößen verifiziert. Ein simulativer Ansatz wurde verwendet, um die Funktionalität des Fuzzy-Logic-Reglers gegen die aufgebraachte Störgröße in einem virtuellen Regelkreis zu testen, wie in Abbildung 11 dargestellt.

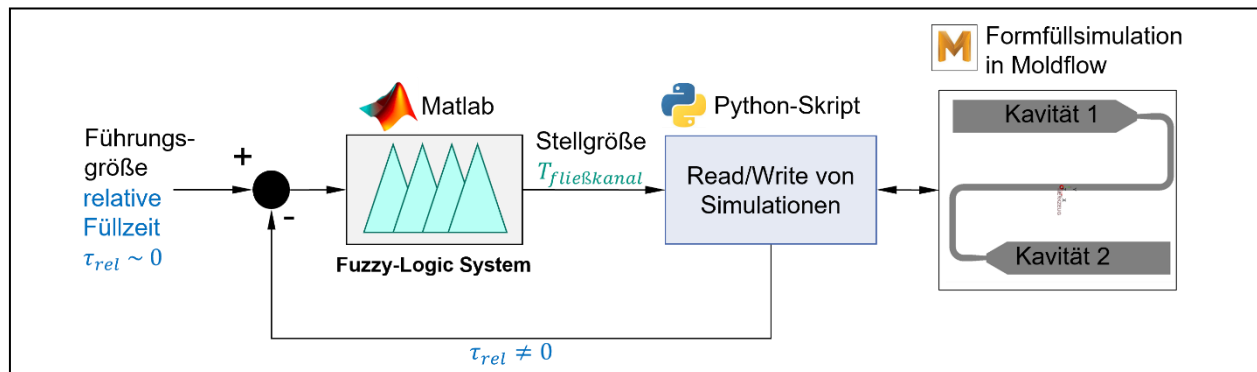


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Kavitätsbalancierung mit FLC in einem virtuellen Regelkreis (Quelle: KIT-FAST, Simutence)

Entwicklung des Fuzzy-Logic-Controllers (FLC)

Die Entwicklung des FLC umfasst mehrere Schlüsselkomponenten. Fuzzifizierung, Regelbasis, Inferenzmaschine und Defuzzifizierung [13]. Der Fuzzifizierungsprozess beinhaltet die Umwandlung eindeutiger Werte von Eingangs- und Ausgangsvariablen in Fuzzy-Sets unter Verwendung von Zugehörigkeitsfunktionen. Hier sind die Eingangs- und Ausgangsvariablen der Füllzeitdifferenz τ in s und der Temperaturdifferenz des Fließkanals ΔT_f in °C. Der Definitionsbereich für τ ist [-1,1 s, 1,1 s] und der Definitionsbereich für ΔT_f ist [-10°C, 10°C]. Hier ist $\tau = t_2 - t_1$, wobei t_1 und t_2 die Füllzeiten der Kavität 1 bzw. Kavität 2 sind. Ein positives τ bedeutet, dass Kavität 1 schneller füllt als Kavität 2, während ein negatives τ anzeigt, dass Kavität 2 schneller füllt als Kavität 1. Die Füllzeit einer einzelnen Kavität wird als der Zeitpunkt bestimmt, an dem der von Sensoren am Ende des Fließweges (vgl. Abbildung 17) überwachte Druck den Schwellenwert von 80 bar überschreitet. T_{f1} und T_{f2} sind die Fließkanaltemperaturen, die in den Fließkanälen zu Kavitäten 1 bzw. 2 eingestellt sind. Das Temperiergerät für die Vorversuche erlaubte eine minimale Änderung der Fließkanaltemperatur von $\pm 1^\circ\text{C}$, was einer einstellbaren Füllzeitdifferenz von annähernd $\pm 0,2$ s entspricht. Daher wurden die Balanciergrenzen auf $\pm 0,2$ s festgelegt. Füllzeitdifferenzen im Bereich von -0,2 s bis +0,2 s können mit diesem System nicht kompensiert werden. Wenn die Füllzeitdifferenz zwischen den Kavitäten die Balanciergrenzen von $\pm 0,2$ s überschreitet, wird die neue Temperaturdifferenz zwischen den Kavitäten ΔT_f berechnet und in analoge Steuerspannungen für die Temperiergeräte umgewandelt.

Durch das Einstellen der Temperaturdifferenz zwischen den Fließkanälen kann die induzierte Füllzeitdifferenz während der Füllphase der Kavitäten beobachtet werden. Ein Beispiel für eine induzierte Füllzeitdifferenz ist in Abbildung 12 dargestellt.

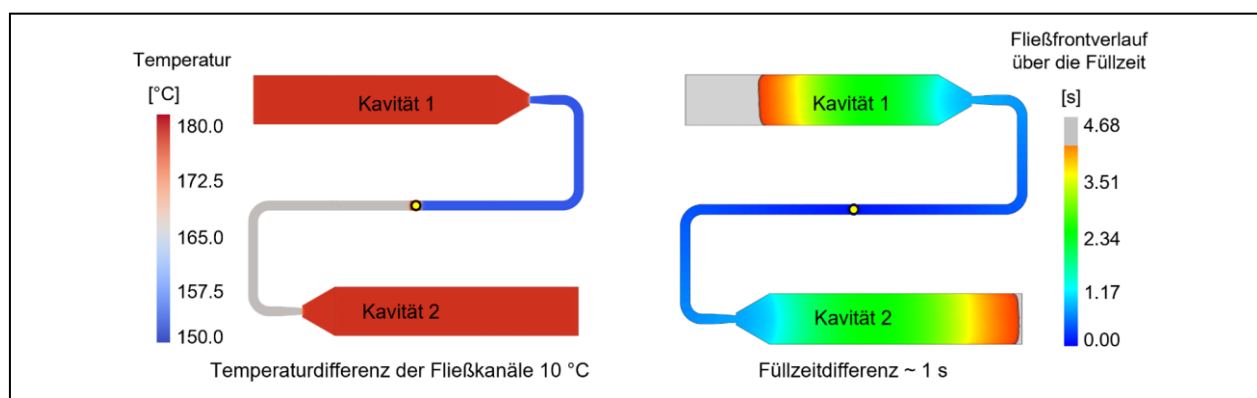


Abbildung 12: Simulation zur Erzeugung einer Füllzeitdifferenz durch inhomogene Temperaturverteilung in den Fließkanälen (Quelle: KIT-FAST, Simutence)

Verifizierung des Simulationsmodells

Die Störgrößen, wie ungleichmäßiger Fließwiderstand und Kavitätstemperaturen, wurden, wie in Abbildung 13a dargestellt, in das Simulationsmodell eingebracht. Die Formfüllsimulationen wurden in der kommerziellen Software Autodesk Moldflow 2021.1 durchgeführt.

Bei Abwesenheit von Störungen bewirkt ein Temperaturunterschied von 10°C einen Füllzeitunterschied von etwa 1 s. Die Regelbasis für den FLC wurde so definiert, dass wenn Kavität 1 oder Kavität 2 langsamer füllt, der entsprechenden Fließkanal erhitzt wird. Wenn Kavität 1 oder Kavität 2 schneller füllt, wird der entsprechende Fließkanal gekühlt.

Diese Prozesse verlaufen parallel und die zu haltende ΔT_f wird daher innerhalb der Regelbasis von $\pm 10^\circ\text{C}$ berechnet. Die Mamdani-Inferenz wurde im FLC verwendet, um die Regeln zu verarbeiten und die Ausgabe zu generieren. Die Defuzzifizierung wurde mittels der Schwerpunktmethod durchgeföhrt, um den Fuzzy-Ausgang ΔT_f in eine Steuerungsaktion umzuwandeln.

Um bewusst eine ungleichmäßige Füllung zu erreichen, wurde also der Verteiler von Kavität 1 durch einen justierbaren Stift verengt und die Temperatur in Kavität 2 erhöht, wie in Abbildung 13a dargestellt. Während zweiteres eine inhomogene Temperaturverteilung im Werkzeug darstellt, ist der justierbare Stift ein mechanischer Widerstand, welcher zum Beispiel eine rauere Oberfläche approximiert. Beide Phänomene können im realen Prozess auftreten. Durch die Manipulationen füllt sich Kavität 2 schneller (siehe Abbildung 13b).

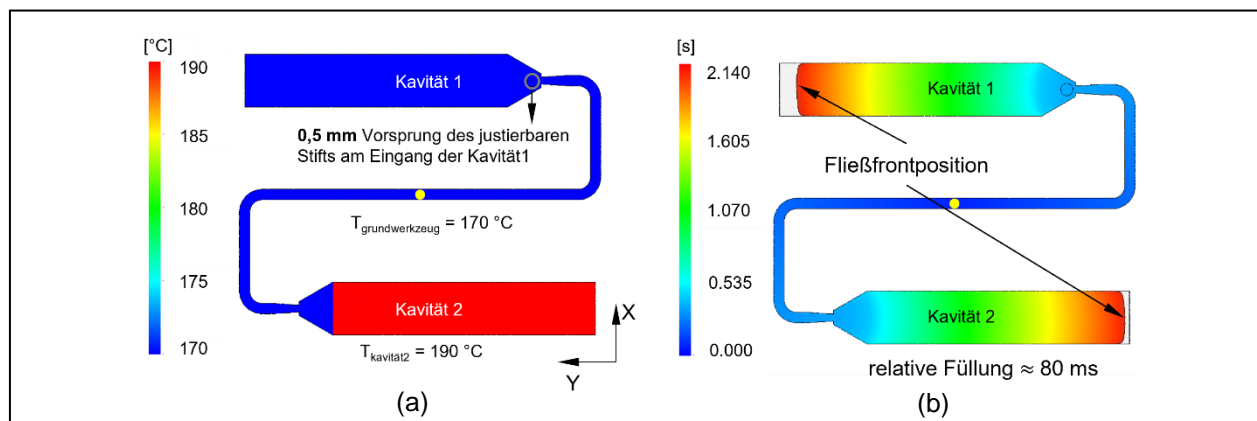


Abbildung 13: Darstellung der Kavitäten des Versuchswerkzeugs mit künstlicher Störgröße und Kavitätstemperaturen (a). Unbalancierte Füllung von Kavitäten (b) (Quelle: KIT-FAST, Simutence)

Anhand der relativen Füllzeit zwischen den Kavitäten werden die Soll-Fließkanaltemperaturen für einzelne Kavitäten im Werkzeug berechnet. Der Zusammenhang zwischen Temperatur- und Füllzeitdifferenz wurde zuvor in numerischen Studien ermittelt. Die neuen Soll-Fließkanaltemperaturen gehen als neue Randbedingung in die nächste Spritzgießsimulation ein, wie in Abbildung 14a dargestellt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Fließkanaltemperierung zu einer nahezu balancierten Füllung führen kann (Abbildung 14b).

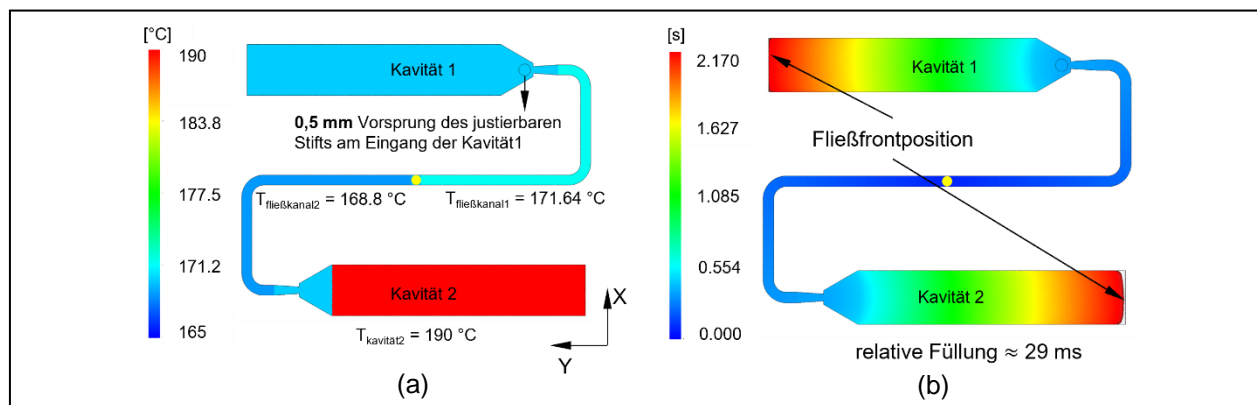


Abbildung 14: Darstellung der Kavitäten des Versuchswerkzeugs mit individuell temperierten Fließkanälen zur Balancierung (a). Nahezu balancierte Füllung der Kavitäten (b) (Quelle: KIT-FAST, Simutence)

Anschließend wurde der Regler in einen realen Regelkreis implementiert, um die Kavitätsbalancierung im Versuchswerkzeug zu demonstrieren. Die Testreihen zur Kavitätsbalancierung im Versuchswerkzeug wurden am Fraunhofer ICT durchgeföhrt (siehe Kapitel 2.1.3.3). Bei diesen Versuchen wurde die Füllzeitdifferenz zwischen

den Kavitäten durch den Zeitpunkt gemessen, an dem der Druck an Sensoren am Fließwegende einen Schwellenwert von 80 bar überschritt. Der Regler errechnete dann die neuen Fließkanaltemperaturen, die am Temperiergerät eingestellt werden. Aufgrund von prozessinduzierten Schwankungen wurden bei den Versuchen jeweils fünf Einspritzzyklen durchgeführt und dann eine mittlere Füllzeitdifferenz zwischen den Kavitäten ermittelt. Die errechneten Soll-Fließkanaltemperaturen wurden über das Temperiergerät anhand dieses Mittelwerts eingestellt. Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse der Kavitätsbalancierung im Versuchswerkzeug für das Phenolmaterialsystem. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kavitätsbalancierung beim Duromer-Spritzgießen prinzipiell funktioniert.

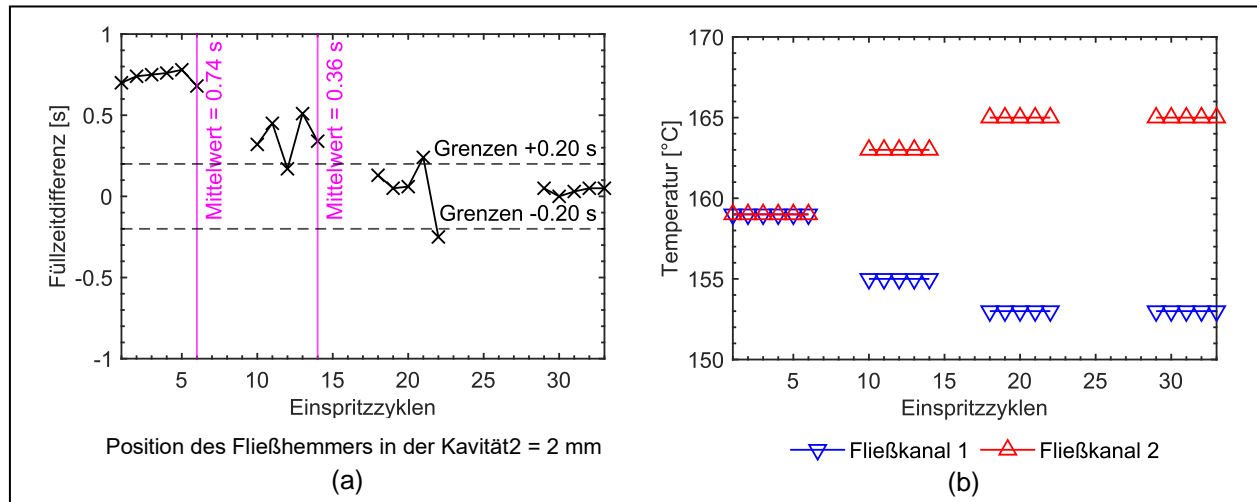


Abbildung 15: Kavitätsbalancierung mit Phenolharz-Formmasse X7530 bei einer Füllrate von $10 \text{ cm}^3/\text{s}$ und Werkzeugtemperatur 170°C . Links sind die gemessenen Füllzeitdifferenzen bei den einzelnen Einspritzzyklen dargestellt. Rechts sind die entsprechenden errechneten Fließkanaltemperaturen dargestellt. (Quelle: KIT-FAST)

Im Anschluss an die Versuche mit dem Versuchswerkzeug wurden Versuche zur Kavitätsbalancierung mit dem Demonstrator-Werkzeug Elektromotorgehäuse durchgeführt (siehe Kapitel 2.1.3.4). Es wurde ein FLC entwickelt, um die Kavitätsbalancierung in diesem Zwei-Kavitäten-Werkzeug zu demonstrieren. Außerdem wurde ein Python-Code zur Automatisierung des Regelkreises erstellt. Dieser Code liest automatisch Sensordaten und verwendet den FLC, um die Zieltemperaturen der Fließkanäle für die nachfolgenden Einspritzzyklen zu berechnen, um eine gleichmäßige Füllung zu erreichen. Prinzip und Implementierung sind dabei identisch zur zuvor durchgeführten Studie am Versuchswerkzeug und die zur Regelung notwendigen Daten für den Füllzeitdifferenz-Temperatur-Zusammenhang wurden wieder in numerischen Studien bestimmt. Die Kavitätsbalancierung am 2-fach-Elektromotorgehäuse wurde bei KraussMaffei in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ICT durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 dargestellt. Die Versuche zeigten, dass die Kavitätsbalancierung bei der aktuellen Werkzeugkonstruktion nicht funktioniert, da die unterschiedliche Temperierung keine ausreichenden Änderungen der Füllzeiten der Kavitäten bewirkt. Folglich konnten die Füllzeitdifferenzen zwischen den Kavitäten nicht kompensiert werden.

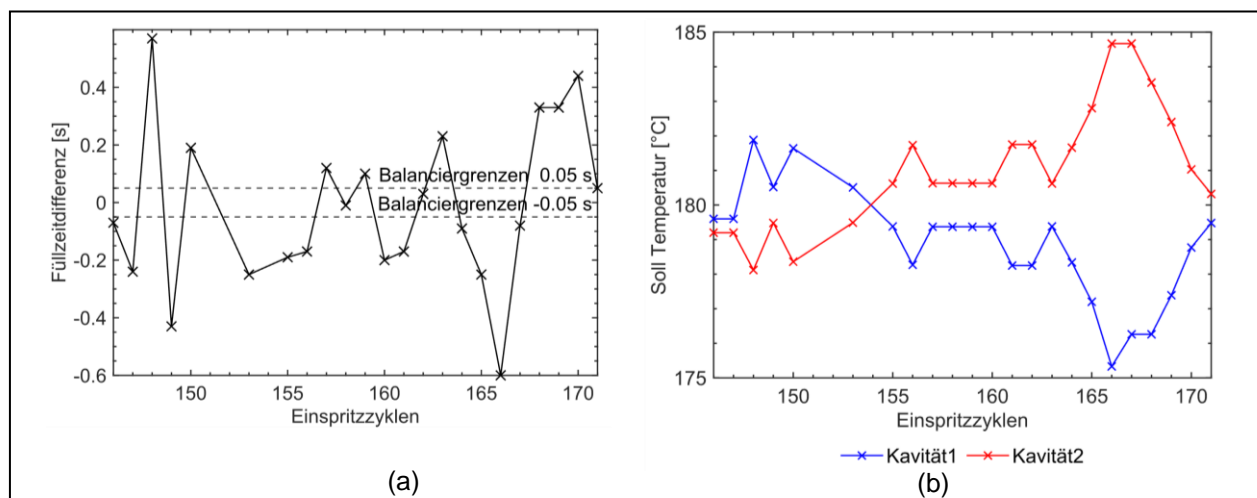


Abbildung 16: Kavitätsbalancierung mit Phenolharz-Formmasse X7530 bei einer Füllrate von $150 \text{ cm}^3/\text{s}$ und Werkzeugtemperatur 180°C . Links sind die gemessenen Füllzeitdifferenzen bei den einzelnen Einspritzzyklen dargestellt. Rechts sind die entsprechenden errechneten Fließkanaltemperaturen dargestellt. (Quelle: KIT-FAST)

Thermische Randbedingungen

Während der Formfüllung beeinflusst der Druck der Schmelze den Wärmeaustausch mit dem Werkzeug. Um dies in der Simulation zu beachten, wurde eine druckabhängige Randbedingung für die Temperatur implementiert. Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha(p)$ wird als Funktion des Druckes mit [14]

$$\alpha(p) = \alpha_0 + \alpha'_\infty \cdot \tanh\left(\frac{k}{2} p^l\right)$$

beschrieben. Hierbei repräsentiert p den Druck, α_0 ist der Wärmeübergangskoeffizient bei Druck Null, α'_∞ ist der asymptotische Wärmeübergangskoeffizient (für $\lim_{p \rightarrow \infty}$), k und l sind Anpassungskonstanten.

Der Wärmeübergangskoeffizient steigt hierbei mit dem Druck. Die Überprüfung der thermischen Randbedingung erfolgt durch den Vergleich von OpenFOAM-Simulationen mit analytischen Berechnungen. Für analytische Berechnungen werden Wärmefluss und Temperaturvariation durch

$$Q = - \int_0^t \alpha(p) \cdot A \cdot (T_{M,n-1} - T_a) \cdot dt$$

und

$$T_{M,n} = \frac{Q}{c_M \cdot \rho_M \cdot V} + T_{M,n-1}$$

gegeben. Hierbei steht Q für Wärmestrom, A für die Kontaktfläche, der Index M steht für Material, T_n repräsentiert die Temperatur zum Zeitpunkt n , t ist die Zeit, c_M ist die spezifische Wärmekapazität, ρ_M ist die Dichte, V das betrachtete Volumen und T_a ist die Außentemperatur. Simulationen wurden in OpenFOAM auf einer Plattengeometrie durchgeführt. Die Temperaturvariationen aus den Simulationen wurden mit den analytischen Berechnungen verglichen, wobei mit einer maximalen Differenz von ca. 0,3 K eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und analytischen Ergebnissen festgestellt wurde.

2.1.3.2 Transfer der Simulationsmethoden in ein kommerzielles Softwarepaket (AP 3.3)

Nach Abschluss der Grundlagen (AP 3.1) sowie deren erster Umsetzungen durch das KIT-FAST in AP 3.2 (siehe unten) erfolgte die Überführung in das kommerzielle Simulationstool Moldflow als Add-on und ist somit Bestandteil vom Simutence-Produkt SimuFill (<https://www.simutence.de/products/simufill/>). Hierfür wurde der Code refaktoriert, sodass dieser zum einen in die Code-Struktur von Simutence passt, sowie um besser unterschiedliche Regler-Konzepte verwenden zu können. Dies ermöglichte es auch in frühen Projektphasen, in denen noch nicht genügend Daten zur Bestimmung der Abhängigkeiten des Fuzzy-Logik-Reglers bekannt waren, erste Untersuchungen automatisiert durchführen zu können.

Mit der Erweiterung der kommerziell verfügbare Simulationssoftware Moldflow durch Simutence wird gewährleistet, dass die in der universitären Forschung entwickelten Algorithmen zum Projektabschluss kommerziell verfügbar sind.

2.1.3.3 Entwicklung und Umsetzung des Balancierkonzepts in ein Versuchswerkzeug (AP 3.2)

Im Anschluss an AP 3.1 wurde an einem Versuchswerkzeug das Balancierkonzept implementiert und für Phenol- und Epoxidharz-Formmassen experimentell erforscht.

In einem ersten Schritt wurde die Effektivität des Wirkprinzips an einem Versuchswerkzeug ermittelt. Das Versuchswerkzeug besitzt wie in Abbildung 17 dargestellt zwei Kavitäten, die mit je einem Filmanguss gefüllt werden. Beide Fließkanäle sind gleich aufgebaut, über einen Einsatz im Werkzeug implementiert und können durch oberflächennahe Medientemperierung auf ein eingestelltes Temperaturniveau gebracht werden. Weiterhin sind im Werkzeug zwei verstellbare Stifte als Fließweghemmer eingebaut, um ein bewusst unbalanciertes Füllverhalten einstellen zu können. Die Versuche wurden am Fraunhofer ICT durchgeführt. Bei der Versuchsdurchführung wurden bei ansonsten konstanten Bedingungen verschiedene Temperaturen in den jeweiligen Fließkanälen eingestellt und bei jedem Schuss über Drucksensoren in den Kavitäten an identischer Position die Füllzeitdifferenz ermittelt. Für die Bestimmung der für den Regler relevanten Größe wurden die Drucksensoren am Ende der jeweiligen Kavität ausgewählt, da diese Sensoren beim Überschreiten eines Schwellwerts einen eindeutigen Hinweis auf das vollständige Füllen dieser Kavität geben.

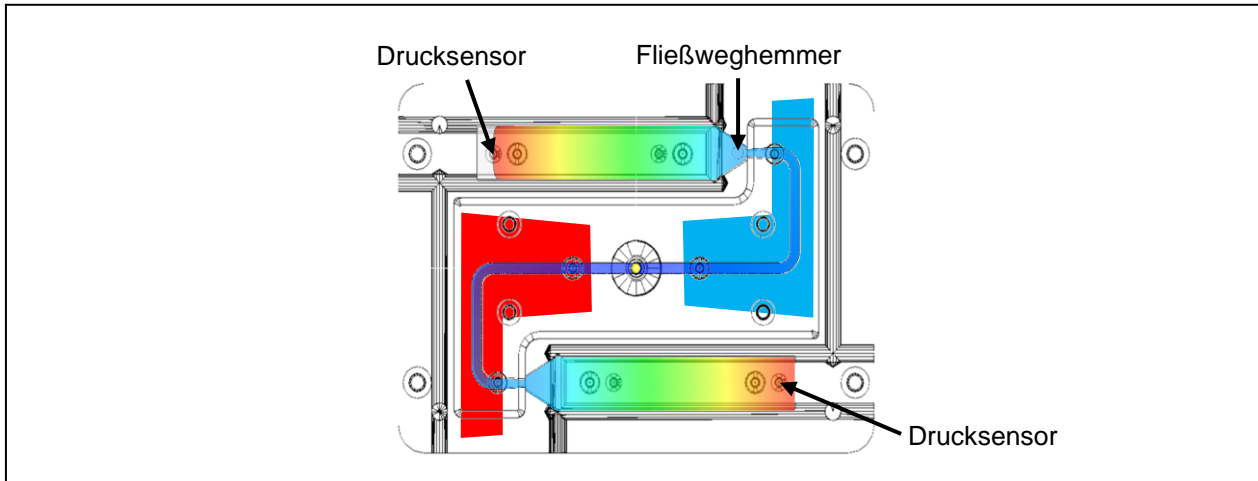


Abbildung 17: Versuchswerkzeug mit medientemperiertem Angussverteiler (Quelle: Fraunhofer ICT, GHD, KIT-FAST)

Konstruktion von Bauteil und Versuchswerkzeug

Es wurde von GHD ein Versuchswerkzeug mit Wechseleinsätzen konstruiert und hergestellt. Neben 2-fach-Normzugstäben gibt es einen Wechseleinsatz für die Vorversuche zur Kavitätsbalancierung. Das Bauteil ist eine Rechteckplatte mit Filmscharnier an einer der kurzen Seiten (siehe Abbildung 18).

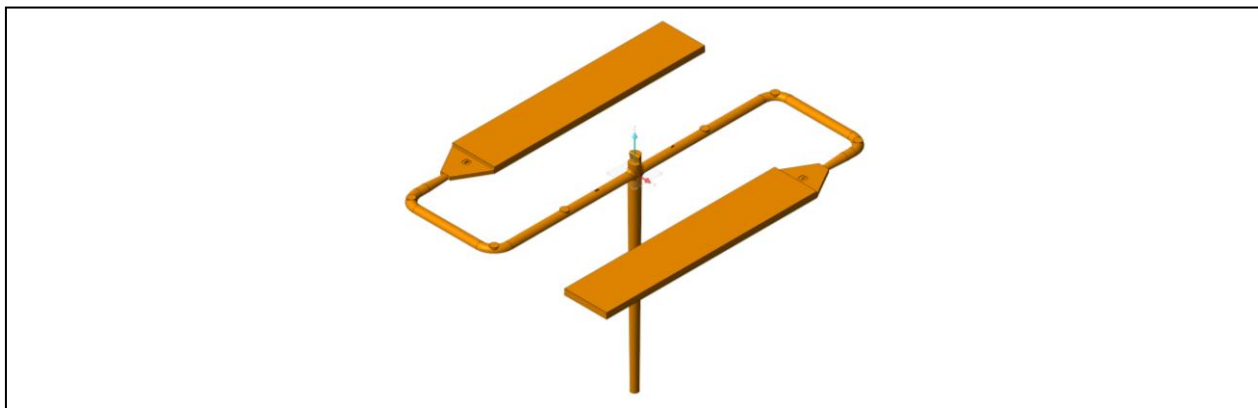


Abbildung 18: Rechteckplatte 2-fach in Versuchswerkzeug (Wechseleinsatz) (Quelle: GHD)

Das Versuchswerkzeug wurde 2-fach ausgeführt (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20).

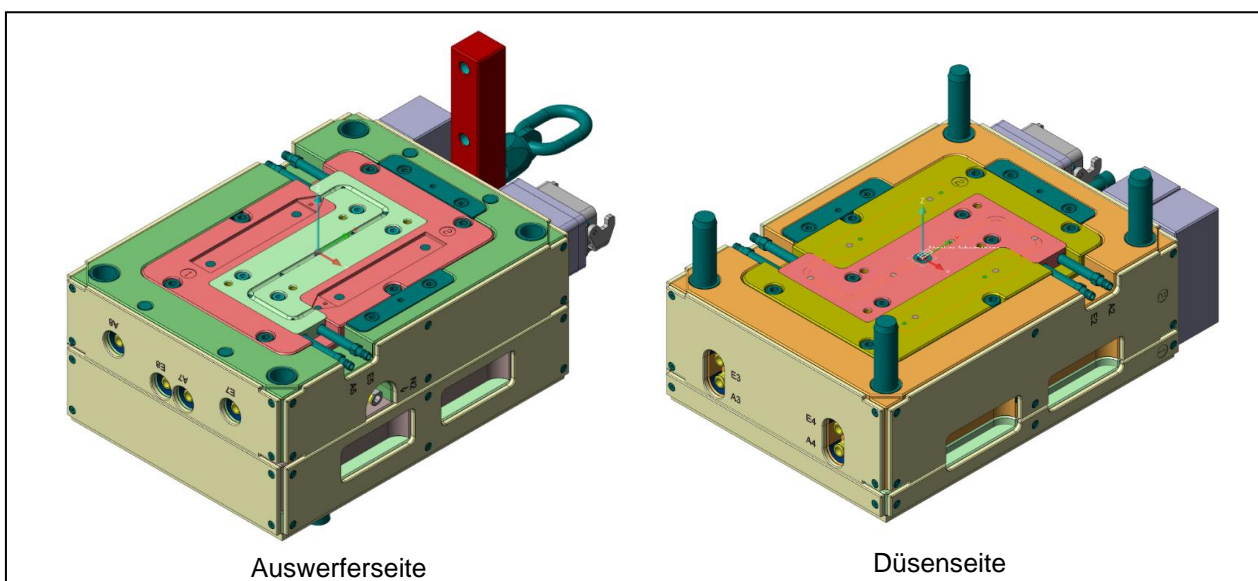


Abbildung 19: Versuchswerkzeug Rechteckplatte 2-fach für aktive Kavitätsbalancierung (Quelle: GHD)



Abbildung 20: Versuchswerkzeug (Quelle: GHD, Fraunhofer ICT)

Umsetzung des Balancierkonzepts im Versuchswerkzeug

Basierend auf dem Lastenheft aus AP 3.1 wurde die Kavitätsbalancierung konstruktiv in dem Versuchswerkzeug umgesetzt und dabei von KIT-FAST und Simutence simulativ begleitet. Sumitomo Bakelite stellte dazu die Materialdaten bereit.

Im Wechseleinsatz Rechteckplatte wurde von Technotrans in Abstimmung mit dem KIT-FAST eine konturnahe Wasser-Temperierung des Angussverteilers implementiert (siehe Abbildung 21). Mithilfe des Formeinsatzes mit konturnaher Temperierung von Technotrans kann dann die Formfüllung beeinflusst werden.

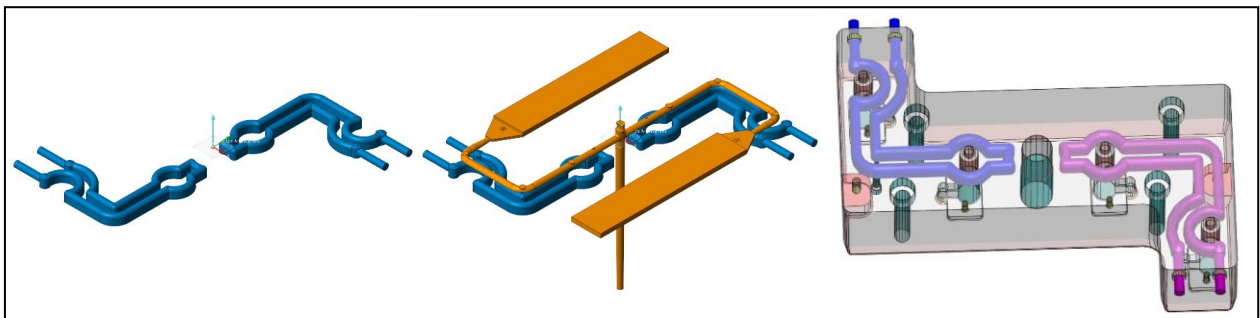


Abbildung 21: Konturnahe Temperierung im Werkzeugeinsatz Düsenseite (Quelle: Technotrans, GHD)

Ferner wurde Sensorik integriert. Zwei Temperaturfühler am Angussverteiler messen die Temperaturen in den beiden Temperierkanälen. Die Formfüllung bzw. Fließfrontposition im Versuchswerkzeug wird über Drucksensoren am Fließwegende erfasst (siehe Abbildung 17). Es wurden zusätzliche Drucksensoren auch angussnah für die Prozessfassung integriert.

Um gezielt eine ungleiche Werkzeugfüllung zu erreichen, welche dann von der aktiven Kavitätsbalancierung zu Versuchszwecken ausgeregelt wird, wurden in den Werkzeugeinsatz sogenannte Fließweghemmer eingebracht. Diese können über eine Mechanik von außen während des Spritzprozesses verstellt werden (Abbildung 22).

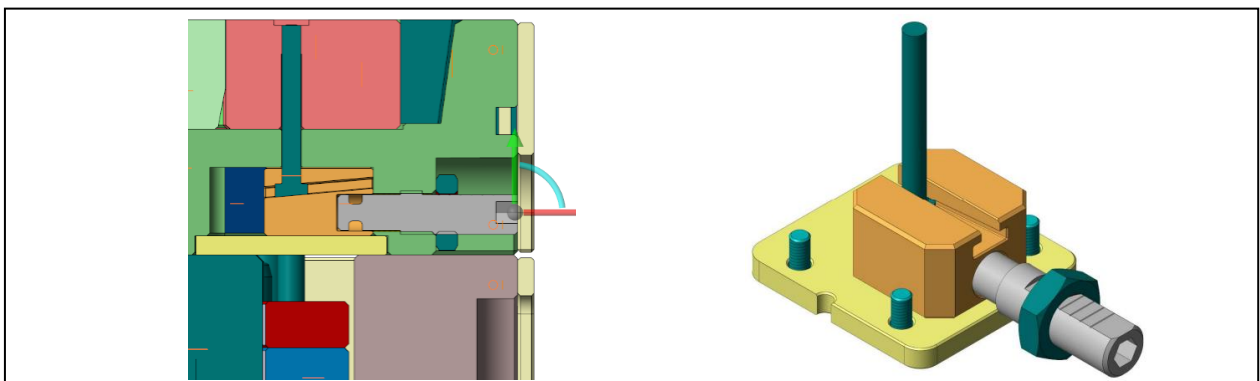


Abbildung 22: Mechanik der Fließwegbremse (Quelle: GHD)

Die Auslegung von Position und Größe der Fließweghemmer geschah in Abstimmung mit KIT-FAST, wo Simulationen zur Formfüllung mit der umgesetzten Geometrie durchgeführt wurden.

Aufbau des Regelkreises für die Vorversuche

Ein provisorischer Regelkreis wurde für die Vorversuche beim Fraunhofer ICT mit Unterstützung von KIT-FAST und Technotrans aufgebaut.

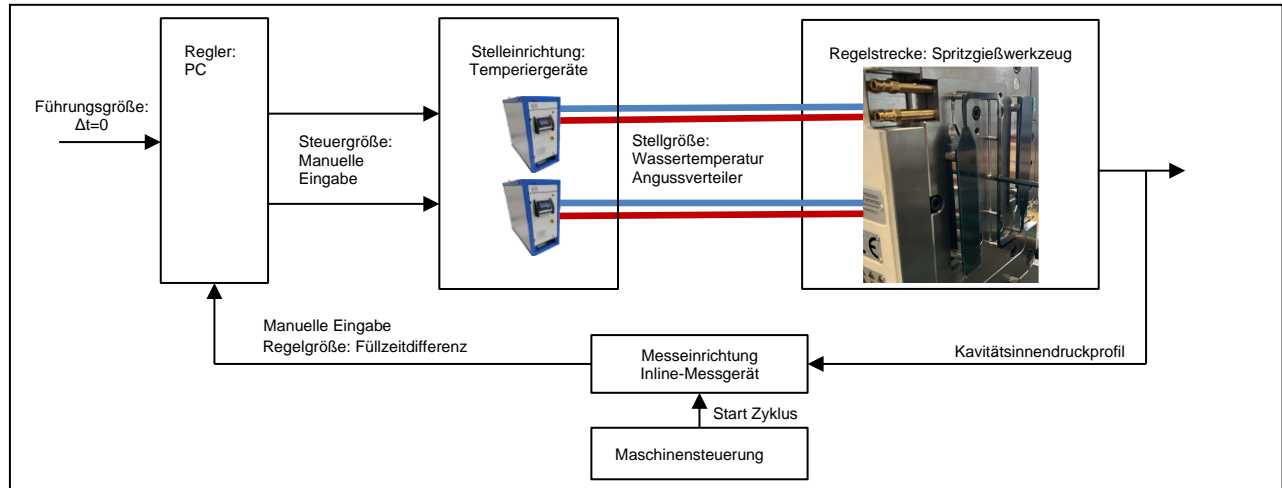


Abbildung 23: Regelkreis am Versuchswerkzeug (Quelle: Fraunhofer ICT)

Von Technotrans wurden die Temperiergeräte zur Verfügung gestellt. Da das Werkzeug auf 175 °C beheizt werden sollte, wurden Wasser-Temperiergeräte von Technotrans mit einer Kapazität von 180°C eingesetzt.

Wegen der automatisierungstechnischen Herausforderungen in Bezug auf die Kommunikation zwischen Sensorik, Spritzgießmaschine und Temperiergeräte wurde der Regelkreis für die Vorversuche nur provisorisch ausgeführt, indem die Datenübertragung zwischen den Geräten mittels manuellen Eintippens und Ablesens realisiert wurde (siehe Abbildung 23). Aufgrund des langsamen Regelprozesses über mehrere Zyklen hinweg stellte dies keine Einschränkung hinsichtlich der Aussagekraft der Versuche dar.

Vorversuche zur Kavitätsbalancierung

Das Versuchswerkzeug von GHD wurde am Fraunhofer ICT auf einer Duromer-Spritzgießanlage montiert und abgemustert. Die Angusstemperierung mit den zwei Temperiergeräten zur Kavitätsbalancierung wurde dabei in Betrieb genommen. In zwei Versuchskampagnen wurde gemeinsam mit dem KIT-FAST das Regelungskonzept an zwei verschiedenen duromeren Formmassen (M300 und X7320, bereitgestellt von Sumitomo Bakelite) angewendet.

Mit einem der Fließhemmer wurde ein Füllzeitunterschied beim Einspritzen zwischen den Kavitäten eingestellt. Nach jeweils fünf Zyklen wurde der mittlere Füllzeitunterschied τ berechnet. Der neue Temperaturunterschied für die Fließkanäle wurde basierend auf dem mittleren Füllzeitunterschied berechnet.

Die gemessene Füllzeitdifferenz ist im Diagramm in Abbildung 24 über die eingestellte Temperaturdifferenz aufgetragen. Dabei sind vier eingestellte Positionen des Fließweghemmers einzeln ausgewertet. Die eingestellten Temperaturdifferenzen wurden im Verlauf des Regelprozesses durch den Regler errechnet. Der Nachweis, dass die Stellgröße des Reglers (Temperaturdifferenz) einen Einfluss auf die Regelgröße (Füllzeitdifferenz) hat, ergibt sich aus der jeweiligen Korrelation zwischen Temperatur- und Füllzeitdifferenz. Die Betrachtung des p-Werts zeigt, dass eine signifikante Korrelation besteht. Die Korrelation ist signifikant, allerdings aufgrund des R^2 -Werts nicht sehr stark. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Füllzeitdifferenz nicht nur durch die eingestellte Temperaturdifferenz bedingt wird, sondern durch Unsicherheiten in Material und Prozess streubehaftet ist (ohne Fließweghemmer im Mittel $\sigma = 0,13$ s). Es folgt, dass bei geeignetem Werkzeugdesign mit Kavitätsbalancierung durch angussnahe Temperierung im Duromer-Spritzgießen über mehrere Einspritzzyklen hinweg im Mittel eine balancierte Füllung erreicht werden kann. Ähnliche Erkenntnisse wurden auch für epoxidharz-basierte Formmassen gefunden. So kann beispielsweise ein durch Werkzeugverschleiß induziertes unbalanciertes Füllverhalten ausgeglichen werden. Gleichzeitig können jedoch die allgemeine Prozessstreuung und die einzelnen Abweichungen von Zyklus zu Zyklus nicht reduziert werden.

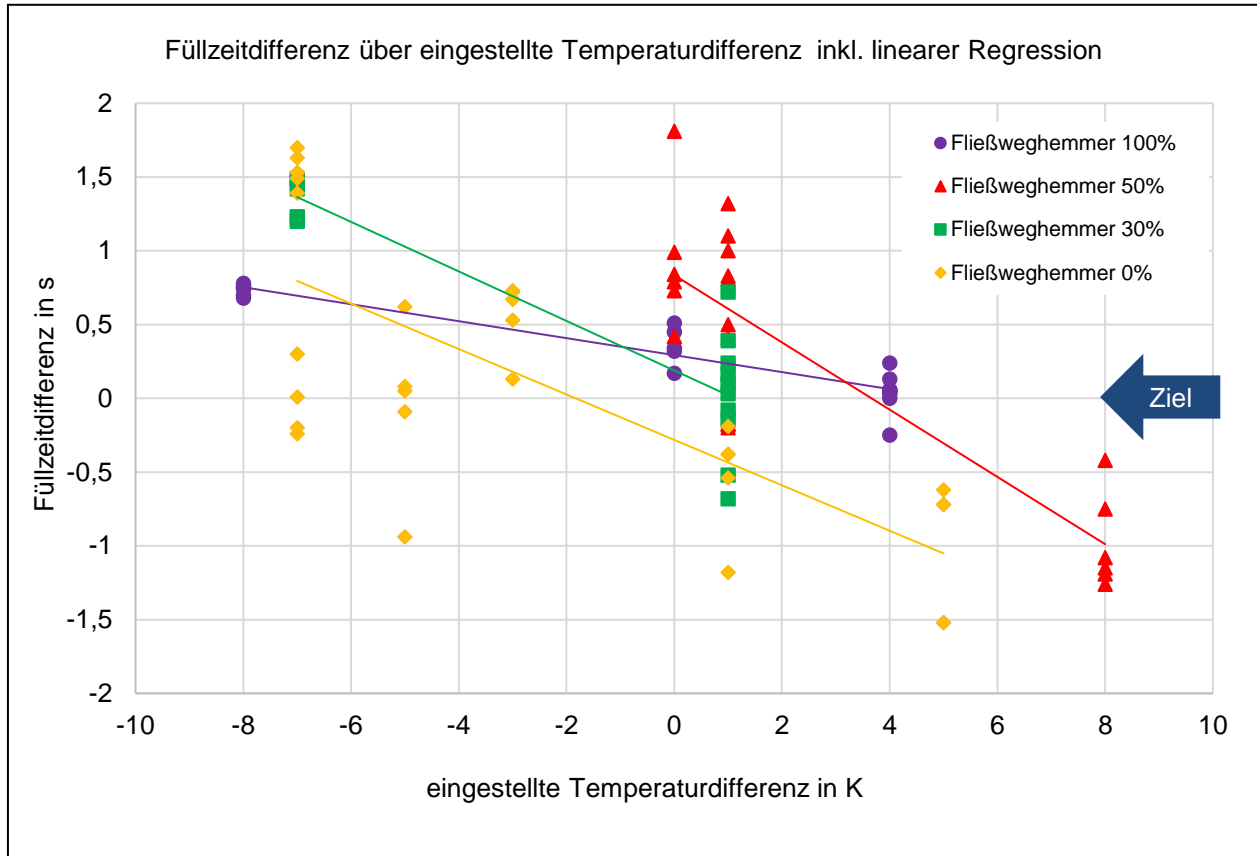


Abbildung 24: Korrelation zwischen eingestellter Temperaturdifferenz und Füllzeitdifferenz im Vorversuch (Quelle: Fraunhofer ICT)

Es wurde die Machbarkeit der Kavitätsbalancierung bzw. des Regelalgorithmus mittels des Versuchswerkzeugs beim Fraunhofer ICT manuell nachgewiesen. D.h. das Prinzip der Kavitätsbalancierung beim Duromer-Spritzgießen wurde verifiziert.

2.1.3.4 Validierung des Balancierkonzepts am Demonstrator Elektromotorgehäuse

In einem weiteren Schritt wurden diese Erkenntnisse auf ein Demonstratorbauteil angewendet. Das Werkzeug beinhaltet zwei Kavitäten für je ein Gehäuse für eine Elektromotor-Getriebe-Einheit.

Beide Gehäuse mit Angussystem sind in Abbildung 25 dargestellt.

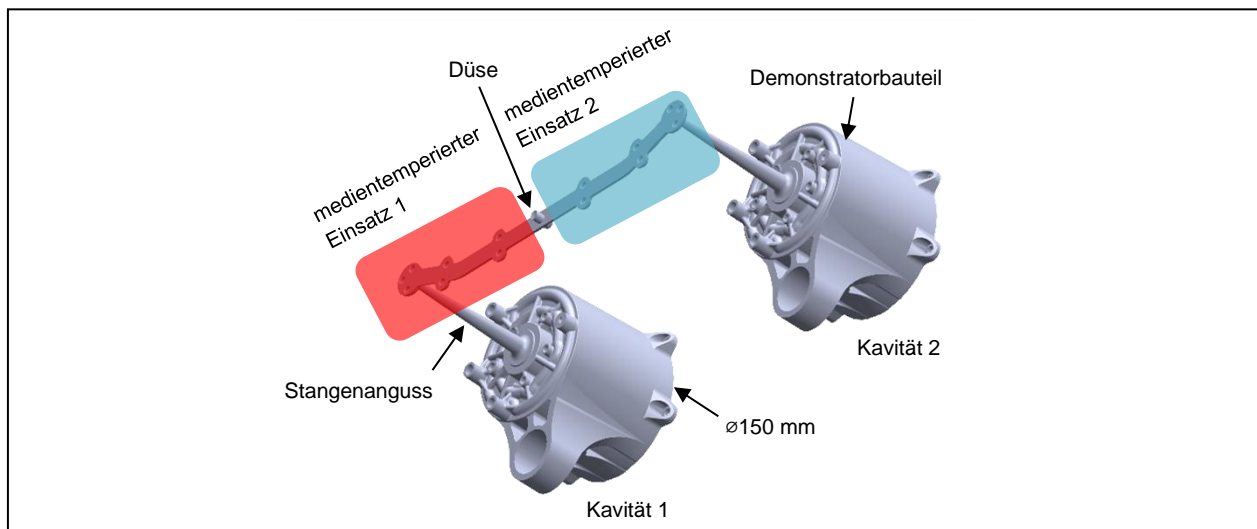


Abbildung 25: Demonstratorbauteil Elektromotorgehäuse in zwei Kavitäten mit Angussystem (Quelle: Fraunhofer ICT)

Die Umsetzung der medientemperierten Einsätze, ist in Kapitel 2.1.5.3 beschrieben.

Konzept des automatischen Regelkreises

Beim Demonstrator Elektromotor wurde ein vollständiger, geschlossener Regelkreis wie in Abbildung 26 implementiert. Die Füllzeitdifferenzen wurden durch ein Messsystem im Prozess überwacht und in Echtzeit über einen angeschlossenen Rechner ausgewertet. Kriterium war das Erreichen einer Druckschwelle, welche über Drucksensoren am Fließwegende bestimmt wurde. Der Regelalgorithmus errechnete die jeweiligen Soll-Oberflächentemperaturen der Angusskanäle und steuerte über eine analoge Schnittstelle zwei Temperiergeräte von Techno-trans. Es wurde je ein Temperiergerät pro Kavität verwendet. Analog zu dem Versuchswerkzeug wurde die Temperatur des zugehörigen Angussverteilers via Medientemperierung eingestellt.

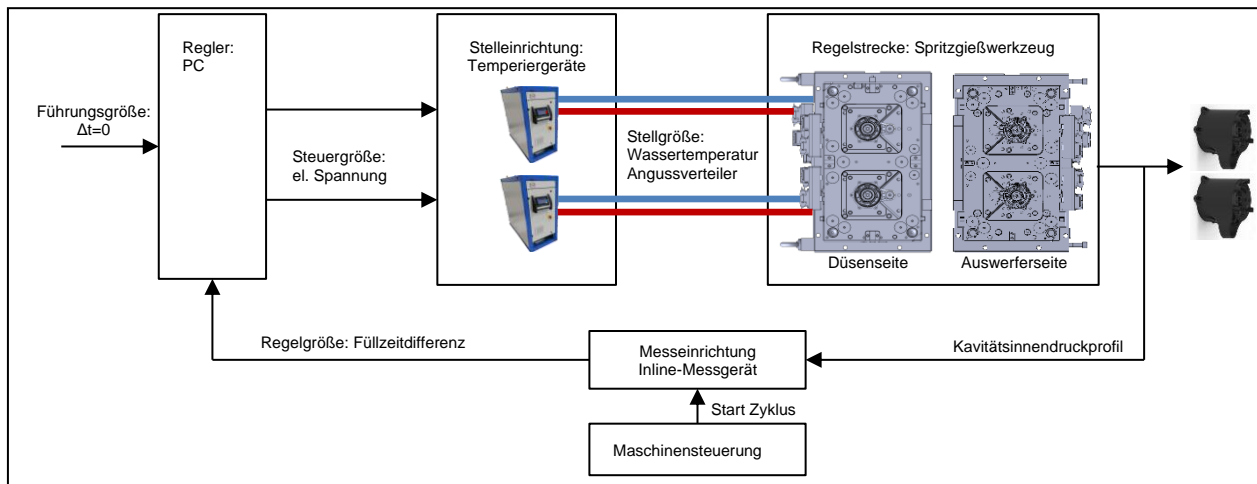


Abbildung 26: Geschlossener Regelkreis zur Kavitätsbalancierung in einer Produktion (Quelle: Fraunhofer ICT)

Die Entwicklung des FLC wurde speziell darauf abgestimmt, die Füllzeitausgleichung zwischen den zwei Kavitäten des Demonstrator-Werkzeugs zu steuern. Der Definitionsbereich für den Füllzeitunterschied τ lag bei $[-0,28 \text{ s}, 0,28 \text{ s}]$, und derjenige für die Temperaturdifferenz der Strömungskanäle ΔT_f lag bei $[-5^\circ\text{C}, 5^\circ\text{C}]$. Ähnlich wie beim Versuchswerkzeug wies das 2-fach-Elektromotorgehäuse je einen Drucksensor am Ende des Fließwegs auf identischer Position auf. Die Füllzeitdifferenz wurde wie zuvor beschrieben berechnet. Die kompensierbare Füllzeitdifferenz wird während des tatsächlichen Kavitätenausgleichs genutzt, indem die Temperaturdifferenz zwischen den Fließkanälen aufrechterhalten wird, wie in Abbildung 27 dargestellt.

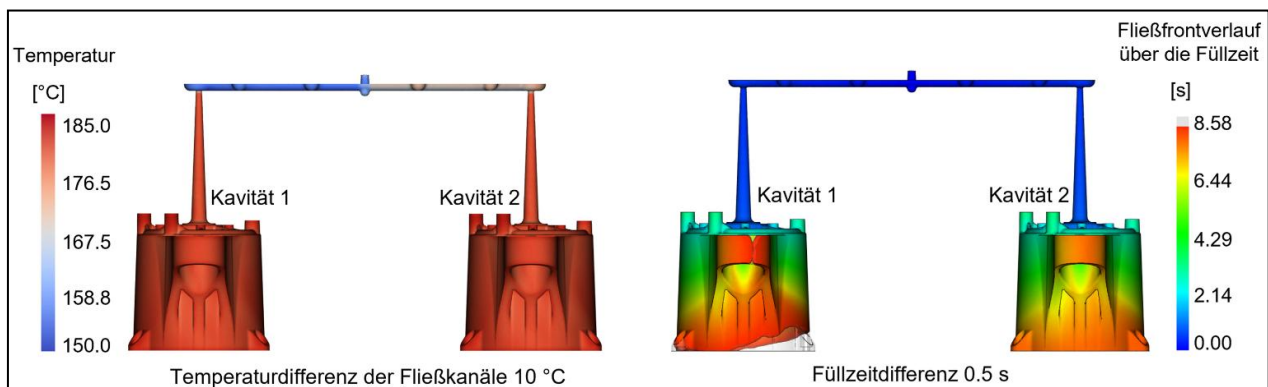


Abbildung 27: Simulation zur Erzeugung einer Füllzeitdifferenz durch inhomogene Temperaturverteilung in den Fließkanälen im Demonstrationsbauteil (Quelle: KIT-FAST)

Die Regelbasis, der Inferenz-Mechanismus und der Defuzzifikationsprozess sind den im Versuchswerkzeug verwendeten ähnlich. Die Füllzeitdifferenz τ wird als Mittelwert der letzten drei Einspritzzyklen berechnet. Die neue ΔT_f für die Fließkanäle wird dann basierend auf diesem mittleren τ bestimmt.

Umsetzung des automatischen Regelkreises

Die Vorbereitung der Peripherie hinsichtlich der Temperiergeräte und der Hardware-Aufbau des Regelkreises zur Kavitätsbalancierung sind in Kapitel 2.1.5.5 beschrieben.

Versuche zur Kavitätsbalancierung (Validierung AP 3.2)

Da die Geometrie dieses Demonstrators wesentlich komplexer als die des Versuchswerkzeugs ist, wurde zur Absicherung der Beziehung zwischen Stell- und Regelgröße ein Versuchsplan mit verschiedenen Temperaturdifferenzen abgefahren (siehe auch Kapitel 2.1.5.6). Pro Temperaturdifferenz wurden mindestens fünf Zyklen durchgeführt und in Abbildung 28 aufgetragen. Aus der Korrelationsanalyse ergab sich hier kein Zusammenhang zwischen Temperatur- und Füllzeitdifferenz.

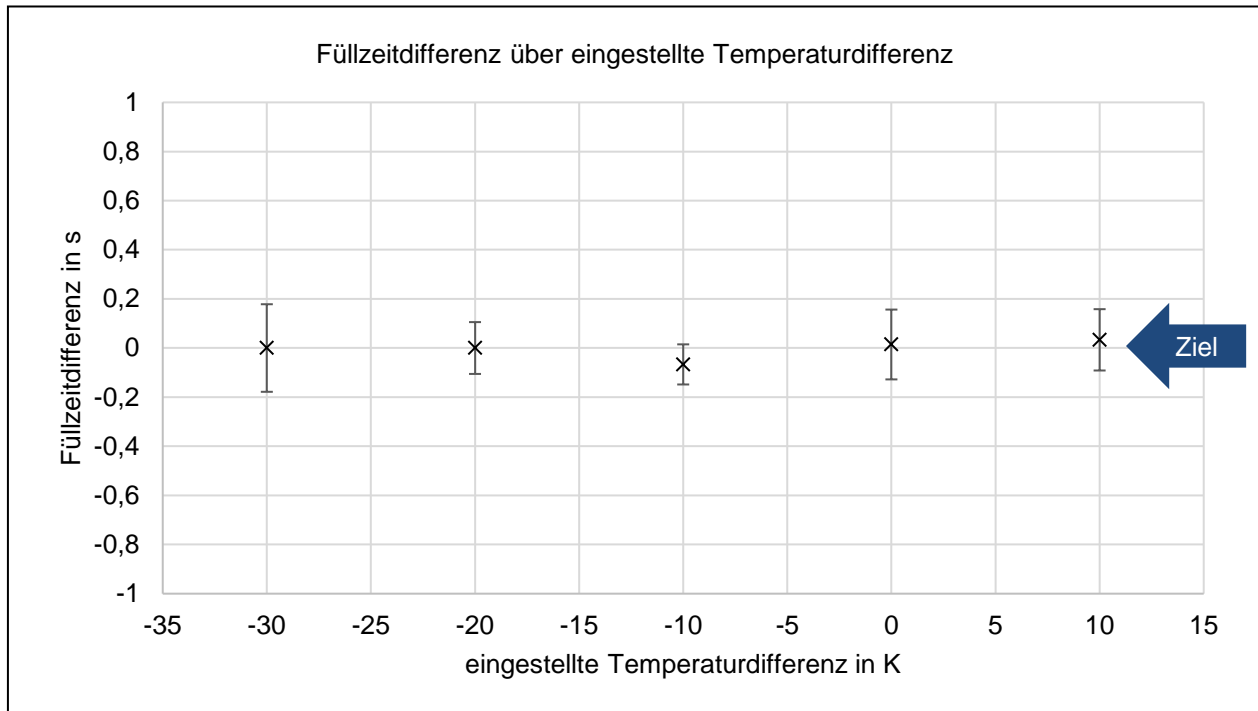


Abbildung 28: Füllzeitdifferenzen beim Demonstrator-Werkzeug über eingestellte Temperaturdifferenz (Quelle: Fraunhofer ICT)

Die Kavitätsfüllung war also unabhängig der Temperaturdifferenz balanciert (bei bis zu 30° Unterschied). D.h. das Füllverhalten beim Demonstrator-Werkzeug konnte auch nicht durch einen extremen Temperaturunterschied zwischen den Kavitäten beeinflusst werden. Das Werkzeug war grundsätzlich gut balanciert.

Diesem unerwartet nicht vorhandenen Effekt können verschiedene Ursachen zugrunde liegen. Das Angussystem besteht aus einem Verteiler, welcher medientemperiert ist, sowie je einem Stangenanguss, welcher nicht medientemperiert ist. Dadurch, dass der Stangenanguss einen wesentlich geringeren Durchmesser als der Verteiler hat, liegt nahe, dass der Fließwiderstand hier erheblich größer ist und das Füllverhalten deswegen nicht maßgeblich durch eine Änderung des kleinen Fließwiderstands im Verteiler beeinflusst werden kann. Weiterhin wurde am gespritzten Angussverteiler beobachtet, dass dieser eine inhomogene Struktur aufweist. Im äußeren Bereich scheint das Material ungerichtet vorzuliegen, während im inneren eine zweite Phase vorliegt. Die Existenz der inneren Struktur legt nahe, dass während des Formfüllvorgangs zuerst der Verteiler gefüllt wurde, und ab einem Zeitpunkt im Formfüllvorgang lediglich der innere Teil des Verteilers weiter floss. Dabei verhinderte wahrscheinlich der äußere Teil eine Wärmeübertragung zwischen Werkzeugwand und fließendem Plastifikat und somit den Einfluss der Medientemperierung.

D.h. es fand wegen der fehlenden Eingriffsmöglichkeit keine automatische Regelung statt. Der Regler hat funktioniert, jedoch ohne Einfluss auf das Füllverhalten.

Fazit

Die im Rahmen des Lite₂Duro-Projekts am Fraunhofer ICT erzeugten Ergebnisse zeigen, dass Kavitätsbalancierung im Duomer-Spritzgießen prinzipiell funktioniert. Es wurde nachgewiesen, dass bei geeigneter Auslegung des Gesamtsystems im langfristigen Mittel eine balancierte Füllung erreicht werden kann. Der dafür am KIT-FAST entworfene Regler ist in der Lage, diesen Effekt über einen vollständigen, geschlossenen Regelkreis auszunutzen. Im Prozess gibt es eine allgemeine Streuung der Füllzeitdifferenzen, welche nicht durch diese Methode beeinflussbar ist. Daraus folgt, dass eine Tiefpass-Charakteristik des Reglers, so wie hier implementiert, notwendig ist. Weiterhin muss der Regler auf die thermische Trägheit des Systems angepasst

sein. Die Versuche am Demonstratorbauteil zeigten, dass Kavitätsbalancierung nicht in jeder Werkzeugkonfiguration funktioniert. Beim Werkzeugdesign sollte berücksichtigt sein, das gesamte Angussystem temperieren zu können, wobei in diesem große Querschnittsprünge zu vermeiden sind. Eine Isolierung der temperierten Bereiche ist auch zu empfehlen.

2.1.3.5 Anlagenentwicklung zur Steigerung Volumen pro Zyklus (AP 3.4)

KraussMaffei führte eine Anlagenentwicklung zur Steigerung des Schussvolumens für duromere Formmassen gegenüber dem etablierten Stand der Technik durch. Außerdem war zur Verarbeitung des geplanten großen Schussgewichts in diesem Projekt eine Weiterentwicklung hin zu größeren Schussvolumen notwendig.

- Die Konzeption und Konstruktion wurden abgeschlossen.
- Die Teilebeschaffung, -fertigung und Montage wurden beendet.
- Die Erprobung und Bewertung wurden durchgeführt.
- Die Plastifizierung wurde technisch freigegeben und die kaufmännische Freigabe wurde vorbereitet.

Konzeption und Konstruktion

Die prototypische Duromer-Plastifiziereinheit für große Schussvolumen wurde konzipiert. Dazu wurde eine studentische Arbeit durchgeführt [15]. Ausgehend von der bisherigen DuroSet-Baureihe wurde das Upscaling durchgeführt und die dabei etablierten und in der Praxis bewährten Auslegungen berücksichtigt. Das Upscaling-Verhalten bei der Spritzgießverarbeitung von duromeren Formmassen wurde untersucht. Die Übertragung bzw. Anpassung von Bauweisen, Konstruktionsprinzipien bzw. konstruktive Lösungen bei kleineren Plastifiziereinheiten auf den vergrößerten Schneckendurchmesser wurde vollzogen.

Als Schneckendurchmesser für die Prototyp-Plastifizierung wurde 90 mm nach Abstimmung mit der Konstruktion des Elektromotorgehäuses hinsichtlich des Schussvolumens gewählt. Der Prototyp wurde konzipiert und konstruiert.

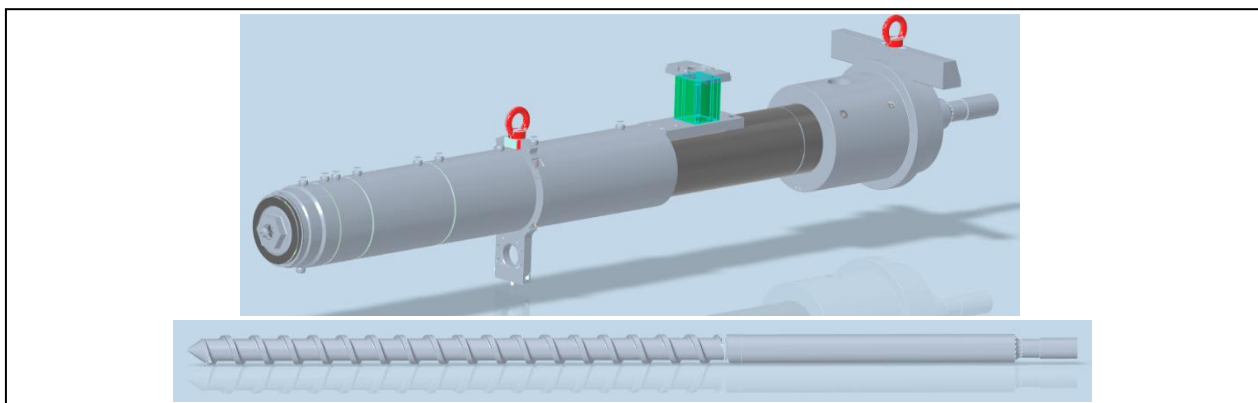


Abbildung 29: Konstruktion der Duromer-Plastifizierung und -Schnecke $\varnothing 90$ mm (Quelle: KraussMaffei)

Fertigung und Montage

Im Anschluss an die Konstruktion wurden die Komponenten der Prototyp-Plastifizierung gefertigt und montiert.



Abbildung 30: Prototyp der Duromer-Plastifizierung $\varnothing 90$ mm (Quelle: KraussMaffei)

Eine spezielle Vorrichtung für den Zusammenbau des Zylinders mit dem Flanschadapter mittels Aufschrumpfen wurde benötigt und hergestellt.

Während der Montage wurde ein geringfügiger Änderungsbedarf in der Praxis festgestellt und diese Punkte wurden nachgearbeitet. Die Montage dauerte also länger als geplant, da die Nacharbeiten notwendig waren und bei der Erstmontage beschädigte O-Ringe nachbestellt und ersetzt werden mussten.

Die Kühlmäntel wurden anschließend für Hochtemperatur verschlaucht und auf Dichtigkeit getestet.

Vorbereitung für die Erprobung

Abschließend wurde der Prototyp in der für den Demonstrator geplanten Spritzgießmaschine GX 650 - 4300 erprobt.

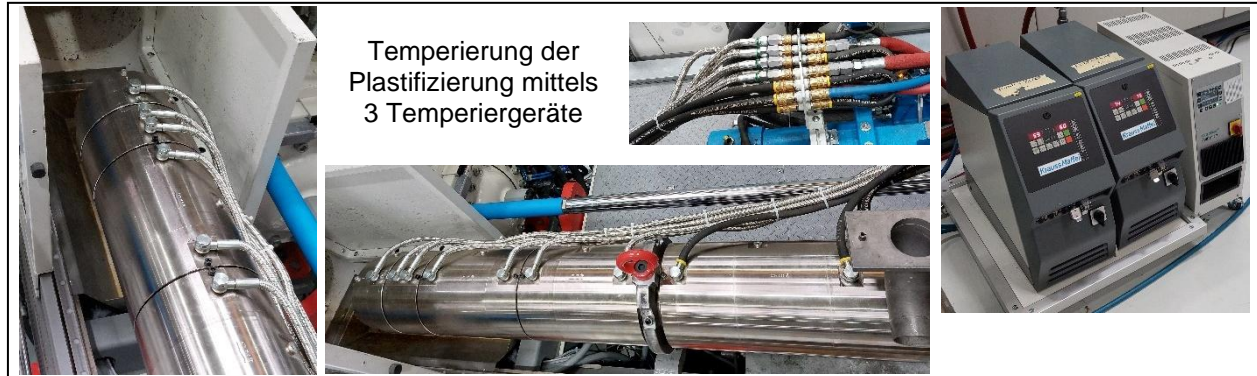


Abbildung 31: Vorbereitung für die Erprobung des Prototypen (Quelle: KraussMaffei)

Die Duromer-Plastifizierung wurde in die Spritzgießmaschine eingebaut. Die 5 Temperierzonen wurden an 3 Temperiergeräte angeschlossen, wovon das Gerät für den vorderen Bereich mit der Düse für den Betrieb über 100°C geeignet war. Der Flansch wurde mit normalem Kühlwasser gekühlt.

Ein vorhandenes Versuchswerkzeug wurde verwendet, welches über einen externen Heizungsschrank beheizt wurde. Das Bauteil war eine dickwandige, rechteckige Platte mit Stangenanguss.

Durchführung der Erprobung

Es wurden 2 Phenolharz-Formmassen getestet: Bakelite PF 31 und Bakelite PF 1110 (mit Glasfaser) von Hexion. Der Versuchsplan sah verschiedene Auslastungen (2xD bis 3,5xD in 0,5xD-Schritten) vor, d.h. verschiedene Plastifizierhübe in Abhängigkeit vom Schneckendurchmesser (D), was jeweils zu Teilfüllungen des Bauteils führte.

Am Anfang wurde die Temperaturführung an den Kühlmänteln mittels eines externen Temperaturmessgeräts kontrolliert. Sie entsprach mit nur leichtem Temperaturverlust den Temperaturen der entsprechenden Temperiergeräte.

Die Auslastungen, d.h. Plastifizierhübe, wurden variiert und dadurch Teilfüllungen hergestellt. Das Schussgewicht des Werkzeugs war ausreichend groß für den Schneckendurchmesser, sodass auch die größte, gewünschte Auslastung (3,5xD) produziert werden konnte. 4,2xD wäre für eine komplette Füllung notwendig gewesen. Dabei wurden je nach Material die Soll-Temperaturen der Temperiergeräte, Staudruck, Drehzahl und Einspritzgeschwindigkeit angepasst. Die Prozessdaten (u.a. Plastifizierweg- und Einspritzdruckverlauf) wurden bei den Versuchsreihen bewertet. Nach einer beendeten Versuchsreihe wurde der Zylinderkopf mit der Düse abgeschraubt und die Schmelze in den Kanälen der Schnecke ins Freie ausgespindelt, d.h. heraus plastifiziert. Es wurde u.a. die Länge und Homogenität des Bereichs mit Schmelze begutachtet.

Die Funktionsprüfung bzw. Erprobung der Plastifizierung wurde abgeschlossen. Die Bewertung war positiv und der Meilenstein M4 des Lite₂Duro-Projekts wurde erreicht. Die neue Plastifizierung wurde technisch freigegeben.

Die Düse für das Demonstrator-Werkzeug musste jedoch aufgrund der Ergebnisse geändert werden, da u.a. der Spritzdruckbedarf zu hoch war.

Bewertung bei der Erprobung

Für die Bewertung der neu konstruierten Duromer-Plastifizierung wurden folgende Maßnahmen herangezogen:

- Leckageüberprüfung der Kühlmäntel und der Verschlauchung
- Kontrolle der Temperaturführung an den Kühlmänteln mittels externer Temperaturmessung
- Bewertung über Prozessdaten

- Plastifizierverhalten
- Druckverlauf beim Einspritzen (keine Druckspritzen, ...)
- Reproduzierbarkeit
- Auffälligkeiten
- Bewertung des aus der Schnecke ausgespindeltes Materials (Aufschmelzverhalten)
- Verhalten an der Düse (z.B. Überhitzung bzw. Vernetzung)

Das aus der Schnecke ausgespindeltes Material wurde hinsichtlich Schmelzbereich und Position des Übergangs von der Feststoffförderung beurteilt (siehe Abbildung 32).



Abbildung 32: abgeschraubter Zylinderkopf und aus Schnecke ausgespindeltes Material (Quelle: KraussMaffei)

Bei den anschließenden Abmusterungen des Demonstrators wurde das Vyncolit® X7530 (PF-GF55) von Sumitomo Bakelite ohne Probleme verwendet.

2.1.4 Entwicklung der direkten Rezyklat-Rückführung für duromere Formmassen im Spritzgießen (AP 4)

Das übergeordnete Ziel dieses Arbeitspakets war die Untersuchung der Beziehungen von Prozess, Struktur und Eigenschaften der direkten Rückführung von Rezyklatmaterial im Duromer-Spritzgießprozess (AP 4.1). Aus diesen Erkenntnissen wurden Design-Richtlinien für die Bauteilkonstruktion unter Verwendung dieser Prozessentwicklung abgeleitet (AP 4.3). Ein weiteres Ziel dieses Arbeitspakets war die Quantifizierung der erreichbaren Ressourcen- und Treibhausgaseinsparungen mithilfe einer ganzheitlichen Bilanzierung (AP 4.2, siehe Kapitel 2.1.6.1).

Zunächst wurde in AP 4.1 ermittelt, welchen Einfluss Rezyklatanteil und -gestalt auf die mechanischen Eigenschaften und die grundlegende Verarbeitbarkeit von duromeren Phenol- und Epoxidharz-Formmassen besitzen. Diese Auswirkungen wurden ebenfalls in die Prozesssimulation integriert. Weiterhin wurde eine Zerkleinerungsstrategie erarbeitet. Im Anschluss wurden anhand einer komplexen Bauteilgeometrie (Ölpumpen-Stellring) die Auswirkungen der Rezyklierung auf weitere Produkteigenschaften beschrieben.

Die Untersuchungen wurden mit den Phenolharz-Formmassen Vyncolit® X7530 (PF-GF55) und Vyncolit® X7320 (PF-(MD+GF)80) und der Epoxidharz-Formmasse Sumikon® EME M300 (partikelgefüllt) von Sumitomo Bakelite durchgeführt.

Die grundsätzliche Strategie, ausgehärtete Formmassen als Füllstoffe einzusetzen, ist aus der Literatur bekannt. So untersuchten beispielsweise Bernardeau et al. [16, 17] den Einsatz von Phenolharz als Füllstoffe in Polypropylen (PP). Bream und Hornsby [18, 19] setzten ausgehärtetes Bulk Molding Compound (BMC) als Füllstoff in PP ein. In Arbeiten mit Duromeren als Matrixmaterial werden die granulierten Füllstoffe in einem vorgeschalteten Compounding-Prozess mit der Neuware vermischt. [20 - 23]. Alle Arbeiten haben gemeinsam, dass lediglich grundlegende mechanischen Kennwerte der mit Rezyklat gefüllten Kunststoffe betrachtet werden.

Die Ergebnisse zu den Arbeitspaketen AP 4.1 und AP 4.2 wurden veröffentlicht [24].

Abschließend wurde Rezyklat auch beim Demonstrator Elektromotorgehäuse zugemischt, was im Vorfeld simuliert wurde (siehe Kapitel 2.1.5.6).

2.1.4.1 Simulative Modellierung des Einflusses von Rezyklat

Im Rahmen des Arbeitspakets AP 4.1 entwickelte das KIT-FAST eine Modellierung, welche den Einfluss von Rezyklat auf die Viskosität bzw. das Formfüllverhalten beschreibt. Beim mechanischen Rezyklieren von Duromer-

Verbundwerkstoffen werden rezyklierte Duromer-Verbundwerkstoffpartikel mit der neuen Formmasse vermischt. Um die Effekte des Rezyklatanteils auf die Formfüllung abzubilden, wurde ein effektives Viskositätsmodell entwickelt, indem das Cross-Castro-Macosko-Modell [25] durch den Ansatz der Spannungs-Dehnungs-Verstärkung [26] erweitert wird. Das resultierende Viskositätsmodell ist durch [27]

$$\eta = \frac{\chi_{\phi_{RCYV}} B e^{\left(\frac{T_b}{T}\right)} \left(\frac{c_g}{c_g - c}\right)^{(c_1 + c_2 c)}}{1 + \left(\frac{B e^{\left(\frac{T_b}{T}\right)} F_{\dot{\gamma}} \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{(1-n)}}$$

gegeben, wobei η für die Viskosität, T für die Temperatur und c für den Aushärtungsgrad steht. $\chi_{\phi_{RCYV}}$ und $F_{\dot{\gamma}}$ sind die hydrodynamischen und Dehnungsverstärkungsfaktoren, die jeweils eine Funktion des Rezyklatanteils ϕ_{RCYV} darstellen, wie in [27] beschrieben. Für einen Rezyklatanteil von 0% nehmen beide Faktoren jeweils den Wert 1 an und die Gleichung ist identisch zum Cross-Castro-Macosko-Modell. B , T_b , n , τ^* und $c_{1,2}$ sind Materialkonstanten, c_g ist der Gelpunkt. Dieses Materialmodell der Viskosität wurde in den CFD-Code OpenFOAM implementiert, und es wurden Simulationen durchgeführt. Zur Validierung der Simulationen wurden experimentelle Versuche am Fraunhofer ICT mit einem in Kapitel 2.1.3.3 beschriebenen Zwei-Kavitäten-Versuchswerkzeug durchgeführt, das mit den in Abbildung 33 dargestellten Drucksensoren ausgestattet war. Für die Phenolharz-Formmasse X7320 wurde ein Füllstudie mit unterschiedlichen Zusammensetzungen des Rezyklatanteils sowie Füllgeschwindigkeiten durchgeführt.

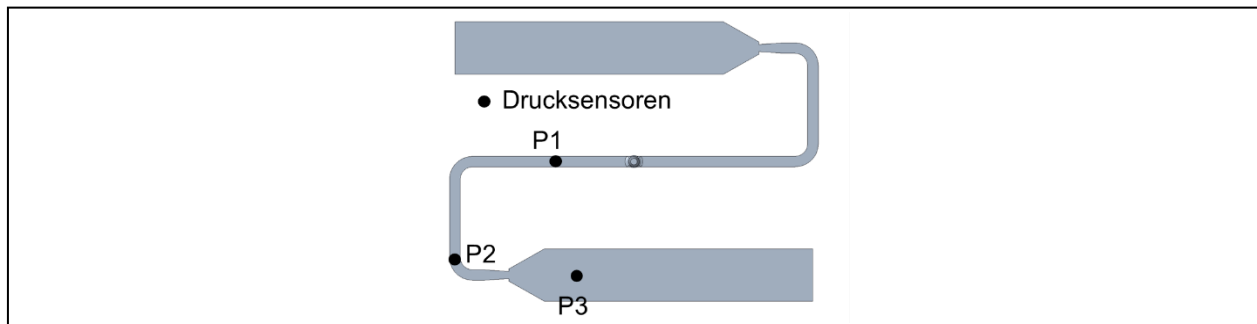


Abbildung 33: Drucksensoren P1, P2 und P3 im Versuchswerkzeug (Quelle: KIT-FAST)

Die Simulationen und Experimente wurden mit 0, 4 und 8 Gew.-% Rezyklatanteil durchgeführt. Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen den Vergleich der Druckprofile zwischen Simulation und Experiment bei Füllraten von 10 cm³/s bzw. 15 cm³/s. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass das implementierte Viskositätsmodell den Einfluss der Rezyklatpartikel auf das rheologische Materialverhalten und den daraus resultierenden Werkzeuginnen-Druck tendenziell richtig abbilden kann.

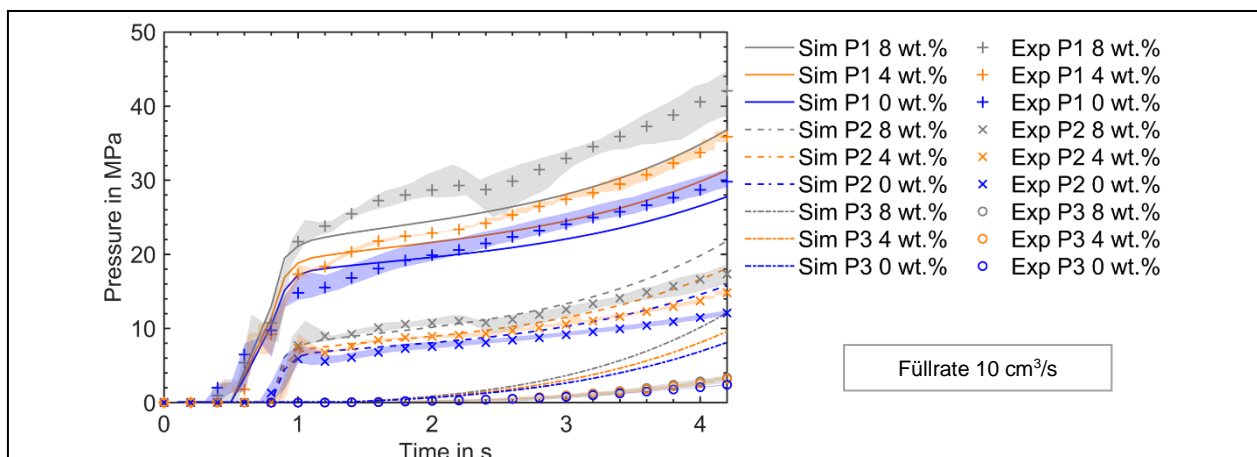


Abbildung 34: Druckprofile während Füllphase abhängig vom Rezyklatanteil bei 10 cm³/s. (Quelle: KIT-FAST)

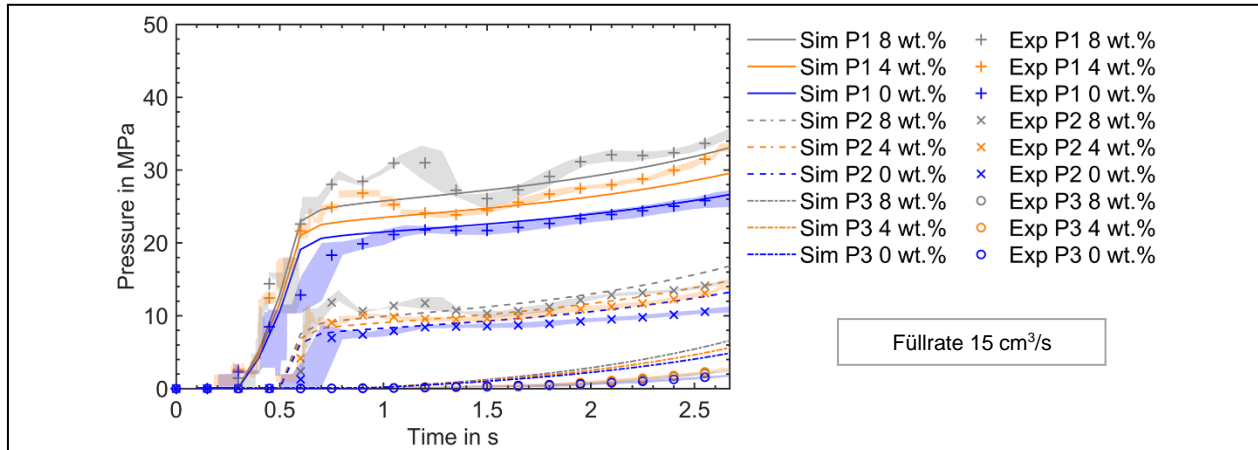


Abbildung 35: Druckprofile während Füllphase abhängig vom Rezyklatanteil bei 15 cm³/s. (Quelle: KIT-FAST)

Auf dieser Basis erfolgte eine Überführung des Modells zur Beschreibung des Viskositätsverhaltens der Schmelze mit Rezyklatanteil in die kommerzielle Software durch Simutence. Aufgrund der Gleichungsstruktur des am KIT-FAST entwickelten Modells konnte diese so umgebaut werden, dass eine Implementierung des Codes nicht im Solver notwendig war, sondern in die Materialparameter überführt werden konnte. Hierbei stellen die hydrodynamischen und Dehnungsverstärkungsfaktoren ($\chi_{\phi_{RCYV}}$ und $F_{\dot{\gamma}}$) Skalierungsfaktoren dar, welche über eine Funktion berechnet werden können. So können auf Basis einer Referenzmaterialkarte beliebige Rezyklatanteile betrachtet und in der Materialkarte gespeichert werden. Dieses Vorgehen ist hierbei prinzipiell softwareunabhängig.

In den experimentellen Untersuchungen, welche in Abbildung 34 und Abbildung 35 dargestellt sind, hat sich jedoch auch gezeigt, dass selbst für einen Rezyklatanteil von 0%, also dem Neumaterial, die Druckkurven auf Basis der bereitgestellten Materialkarte aus der Simulation nicht komplett mit dem Experimenten übereinstimmten. Aus diesem Grund wurden zwei Optionen zur Anpassung der Materialparameter genauer betrachtet. Zum einem wurde ein analytischer Ansatz durch Simutence verfolgt, zum anderem eine Parameteroptimierung mittels Simulationen (KIT-FAST und Simutence).

Zunächst wurde für beide Optionen nochmal eine Versuchskampagne am Fraunhofer ICT mit einem Epoxidharz (M300) durchgeführt, bei der die Prozessparameter so gewählt wurden, dass zum einem diese die Grundlage für eine sogenannte In-line-Rheologie bilden, mit Hilfe derer die Viskosität im Versuchswerkzeug bestimmt werden kann, zum anderen aber auch die Parameteroptimierung und im Speziellen die Optimierung der Wall-Slip-Parameter ermöglichen. Aus diesem Grund wurden Versuche durchgeführt, in denen die Werkzeugoberfläche mit Silikonöl besprüht wurde, um ein ideales Gleiten zu erzeugen.

Parallel zu den Versuchen fand die Entwicklung der In-line-Rheologie-Auswertung bei Simutence statt. Hierfür wurde eine automatische Auswertung der Druck- und Temperatursensoren entwickelt, welche aufgrund der geometrischen Gegebenheiten des Angusses und des Werkzeugs sowie der Prozessparameter die lokalen Scherraten und die dazugehörigen Viskositäten bestimmt. Im ersten Schritt wurde hierbei eine newtonsche Fluidformulierung, eine isotherme Temperaturverteilung sowie ein konstanter Aushärtegrad angenommen. Auf Grund der wenigen Datenpunkte diente diese prozessnahe Charakterisierung als Stützstelle für eine Verschiebung der originalen Viskositätskurve über eine Optimierung der Parameter τ^* und B mittels eines Skalierungsfaktors.

Mit den hieraus resultierenden optimierten Viskositätsparametern wurden im Anschluss neue Simulationen durchgeführt. Einen exemplarischen Vergleich der experimentellen Daten mit den Simulationsergebnissen mit originalen und optimierten Materialdaten ist in Abbildung 36 zu finden.

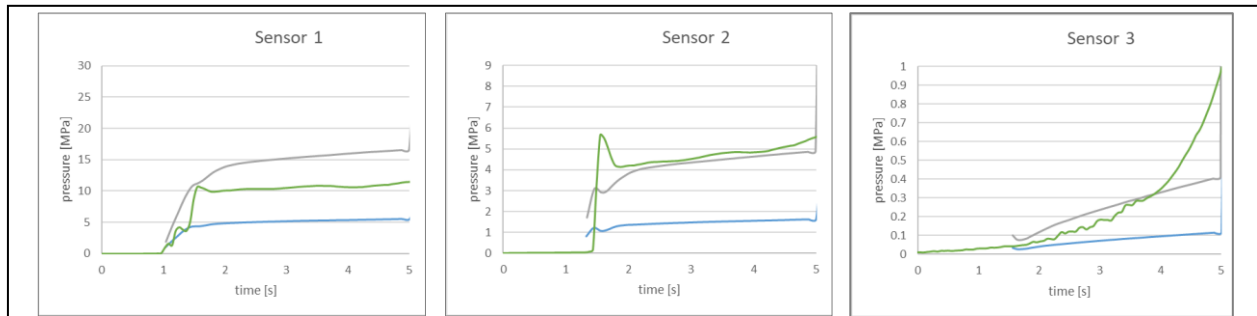


Abbildung 36: Abgleich experimentelle Druckverläufe (grüne Kurve) mit Simulationen mit originalen Viskositätsdaten (blaue Kurve) und optimierten Viskositätsdaten (graue Kurve) für die Drucksensoren 1 bis 3 (Quelle: Simutence)

Dieser Vergleich zeigt, dass die optimierten Materialdaten für Sensor 2 und 3 bessere Vorhersagen liefern, jedoch für Sensor 1 die lokalen Drücke überschätzen.

Um die Ursache hierfür zu identifizieren, wurde eine zusätzliche Auswertung der experimentellen Daten durchgeführt. Hierbei sind ungewöhnliche Abhängigkeiten der Druckverläufe in Abhängigkeit der Prozessparameter aufgefallen. Diese stellten sich als lagerungsbedingt heraus, sodass keine weitere Optimierung der Methode erfolgte.

Stattdessen dienten diese Parameter als Input für die zweite Methode, in der über zwei Stufen ein Fitting der Viskositäts- und Wall-Slip-Parameter erfolgte. Hierbei wurden in einem ersten Schritt zunächst die Modellparameter B und τ^* auf Basis der Experimentaldaten von Sensor 1 und Sensor 2 der Versuche mit Silikonöl verwendet. In den Simulationen (mit Wall-Slip) wurde die Geschwindigkeit an der Werkzeugwand gemäß

$$v_s = \frac{a}{1 + \left(\frac{\tau_c}{\tau_w}\right)^{10}} \tau_w^m$$

berechnet, wobei der Gleitexponent m und die kritische Scherspannung τ_c jeweils mit Null angenommen wurden, was einem idealen Gleiten entspricht. Der Gleitkoeffizient a wurde angepasst, sodass das Geschwindigkeitsprofil einem „Plug-Flow“ entspricht. Zur Optimierung der Modellparameter B und τ^* wurden gewichtete Residuen verwendet. In einem zweiten Schritt wurden nun die Experimente ohne Silikonöl als Optimierungsziel definiert und die Parameter a , m , und τ_c entsprechend optimiert.

Alle diese Ergebnisse zeigten einen deutlichen Einfluss der Aushärtung auf den Prozess, sodass zum einem der initiale Aushärtezustand nochmals genauer betrachtet wurde, als auch die Modellierung der Aushärtung und deren Rückkopplung in die Viskositätsmodellierung nochmals hinterfragt wurde.

Da es aktuell keine Möglichkeiten gibt, das Aufschmelzen des Materials in der Plastifiziereinheit zu simulieren, wurde der Fokus zunächst auf das Plastifiziervolumen gelegt, da nur dieses über dem kritischen Temperaturbereich liegt, bei der der Initiator aktiv wird. Dies ermöglichte es, das Tool SimuTherm von Simutence so zu erweitern, dass die Aushärtegrade am Anguss abgeschätzt werden können. Hierfür wurde auf Basis der Zykluszeit und der Dosierzeit die Zeit abgeschätzt, die das Material über der kritischen Temperatur ist. Hierbei zeigte sich, dass dies nicht kritisch ist und der Effekt für das Material des Elektromotorgehäuses vernachlässigt werden kann.

Für die Implementierung alternativer Aushärtemodelle steht ab der Moldflow-Version 2024 eine SolverAPI zur Verfügung, in welche eigene Modelle implementiert werden können. Auf dieser Basis wurde ein Framework für den Solver entwickelt, welches es nun ermöglicht, Materialmodelle nach Stand-der-Forschung für die Viskosität und Aushärtung sowie deren Interaktion besser zu beschreiben. Dies ermöglicht es jetzt insgesamt, die Formfüllung besser vorherzusagen.

Fazit

Ein Vergleich der experimentellen Ergebnisse und der numerischen Vorhersagen zeigte, dass das implementierte Viskositätsmodell den Einfluss des Rezyklats auf das rheologische Materialverhalten und den daraus resultierenden Werkzeuginnendruck tendenziell richtig abbilden kann.

2.1.4.2 Grundlagenuntersuchungen zur Rezyklierung

Duromere Formmassen vernetzen irreversibel bei der Verarbeitung. Sowohl das Material aus den Angussverteiltern als auch Anfahr- und Ausschussbauteile werden üblicherweise nicht wie in vielen Thermoplast-Anwendungen zerkleinert, direkt zurückgeführt und Neuware zugemischt. Das Rezyklat aus Duromeren wird nicht wieder aufgeschmolzen, sondern es kann nur als „Füllstoff“ der Neuware zugeführt werden.

Die Granulierung und direkte Rückführung dieses Materials in den Spritzgießprozess steigert dank eines stofflichen Recyclings die Ressourceneffizienz, mindert jedoch voraussichtlich die mechanischen Eigenschaften der Bauteile.

Dazu wurden Zerkleinerungstechniken und das Mischverhalten von Neuware und Rezyklat bewertet. Der Einfluss von Rezyklatanteil und Rezyklatgestalt (besonders Partikelgröße) auf die Verarbeitbarkeit und die mechanischen Eigenschaften wurde untersucht.

Erarbeitung einer Zerkleinerungsmethode bzw. -strategie

Da duromere Rezyklate vernetzt und damit meist härter als Thermoplaste sind, gibt es größere Anforderungen an die Zerkleinerung. Da vernetzte Duromere auch nicht wieder aufschmelzen, wird die Größe des Rezyklats für die Bauteileigenschaften unter Umständen ausschlaggebend sein. Deshalb sind Siebverfahren Bestandteil der Zerkleinerungsstrategie.

Am Fraunhofer ICT wurden dazu Untersuchungen zur Zerkleinerung mit verschiedenen Aggregaten durchgeführt und die entstehenden Mahlgüter charakterisiert sowie klassifiziert. Dabei wurde mit den Mühlenherstellern zusammengearbeitet, um ein Upscaling des Recyclings vom Labormaßstab hin zu industriell üblichen Massedurchsätzen und somit eine industrielle Umsetzbarkeit zeitnah zu erreichen. Es wurden verschiedene Zerkleinerungs- und Aufbereitungsmethoden für die ausgehärteten Angussverteiler evaluiert und anhand der erreichbaren Partikelgrößen und Partikelgrößenverteilungen sowie Partikelgestalt charakterisiert.

Zur Herstellung des Rezyklatmaterials wurden Bauteile und Angüsse aus zwei Formmassen (X7530 und M300) mittels verschiedener Mühlentypen, Kombinationen von Mühlen und Siebeinsätzen zerkleinert und die Ergebnisse verglichen.

Bei größeren bzw. dickeren Angussverteiltern und Bauteilen war eine Vorzerkleinerung mittels Einschwingenbrecher, auch Backenbrecher genannt, erforderlich. Die Art der Mühle hängt z.B. von der Glasfaserverstärkung bzw. Schlagzähigkeit ab. Es trat teilweise je nach Ausführung der Mühle starker Verschleiß oder Beschädigungen auf. Bei der Auswahl einer Mühle ist hier auf eine entsprechende, verschleißfeste Ausführung achten.

Das grundsätzliche Vorgehen bei der Zerkleinerung, war durch die Vorversuche bereits vorgegeben: Zunächst wurden zwei Durchgänge zur Vorzerkleinerung an einem Backenbrecher EB 200x125-L von Siebtechnik GmbH mit einem nulljustierten Brechspalt durchgeführt. Bei der Zerkleinerung mit der Schneidmühle Retsch SM 300 wurde ein 2 mm Siebeinsatz verwendet. Die Feinzerkleinerung erfolgte mit einer Ultrazentrifugalmühle Retsch ZM 200 und einem 0,25 mm Distanzsieb. Allerdings erwies sich das Mahlgut als sehr abrasiv, wodurch der nicht gehärtete Rotor stark verschlissen ist und sich dies wiederum auf die Qualität der Zerkleinerung auswirkte.

Die Zerkleinerung der Materialien war im Labormaßstab gut durchführbar. Es trat jedoch eine starke Abrasion besonders in der Ultrazentrifugalmühle durch Glasfasern auf, da der vorhandene Verschleißschutz nicht ausreichend war.

Experimente zum Mischungsverhalten

Weiterhin wurde das Mischverhalten von Neuware und Rezyklat, besonders hinsichtlich Entmischung und Rieselfähigkeit, bewertet.

Am Fraunhofer ICT wurde Rezyklat aus zerkleinerten, spritzgegossenen Bauteile (aus X7530 und M300) hergestellt. Anteile von 0 Gew.-% bis 20 Gew.-% wurden dann zur Neuware hinzugefügt und manuell durch Schütteln bzw. Taumeln vermischt. Abbildung 37 zeigt das Mischungsverhalten von Rezyklat und Granulat bei X7530. Aufgrund des Farbumschlags bei der Aushärtung ist das Rezyklat grün, wohingegen das Granulat noch blau gefärbt ist.

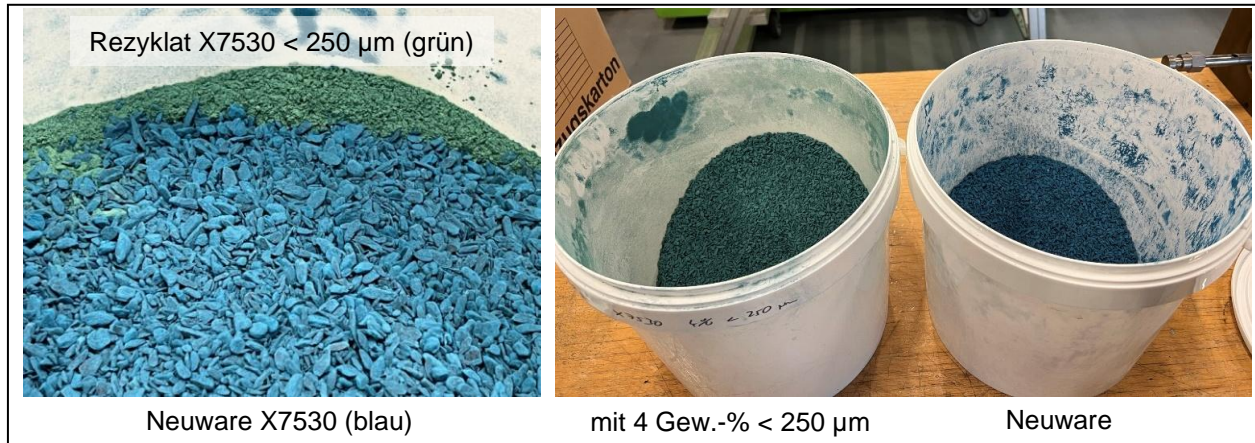


Abbildung 37: Mischungsverhalten von Rezyklat und Granulat im Mischeimer (Quelle: Fraunhofer ICT)

Kleine Rezyklatpartikel ($d < 250 \mu\text{m}$) legten sich sehr gleichmäßig auf die Neuware. Bei X7530 ist das sehr gut erkennbar anhand der gleichmäßig grünen Färbung nach dem Mischen (Abbildung 37 rechts). Größere Rezyklatpartikel ($250 \mu\text{m} < d < 1000 \mu\text{m}$) verteilten sich zwischen den Körnern der Neuware. Bei X7530 ist das Rezyklat nach dem Mischen nicht mehr erkennbar. M300 ist staubiger und neigt eher zu einer ungleichmäßigen Verteilung von Rezyklat und Neuware im Mischeimer.

2.1.4.3 Ermittlung des Einflusses von Rezyklatanteil / -gestalt auf die Eigenschaften bei Zugprüfkörpern (AP 4.1)

Ziel dieser Versuche war es, den Einfluss von Rezyklatanteil und Rezyklatgestalt (Partikelgröße) auf die Verarbeitbarkeit und die mechanischen Eigenschaften festzustellen.

Für die experimentellen Untersuchungen wurde X7530 verwendet und Zugprüfkörper produziert. Die mechanische Grundcharakterisierung erfolgte im Technikumsmaßstab am Fraunhofer ICT anhand von Zugprüfkörpern.

Zur Gewinnung des Rezyklatmaterials wurden Bauteile und Angüsse mithilfe eines Einschwingenbrechers und einer Schneidmühle zerkleinert. Dabei wurden zwei Größenklassen für das Rezyklat betrachtet: $d < 250 \mu\text{m}$ sowie $250 \mu\text{m} < d < 1000 \mu\text{m}$. Unmittelbar vor der Spritzgießverarbeitung wurde das Rezyklatmaterial batchweise in Gewichtsanteilen zwischen 4% und 20% zur Phenolharz-Neuware gemischt, durch Taumeln homogenisiert und in den Materialtrichter der Spritzgießmaschine gegeben.

Zur Herstellung der Zugprüfkörper wurde ein 6-fach-Werkzeug auf einer Spritzgießmaschine mit Schneckendurchmesser 30 mm im Technikum vom Fraunhofer ICT verwendet.

Der Einfluss der Rezyklatbeigabe auf den Spritzgießprozess wurde anhand des maximalen Einspritzdrucks in Abhängigkeit vom Rezyklatanteil am Beispiel der Zugprüfkörperherstellung aus X7530 gezeigt (Abbildung 38).

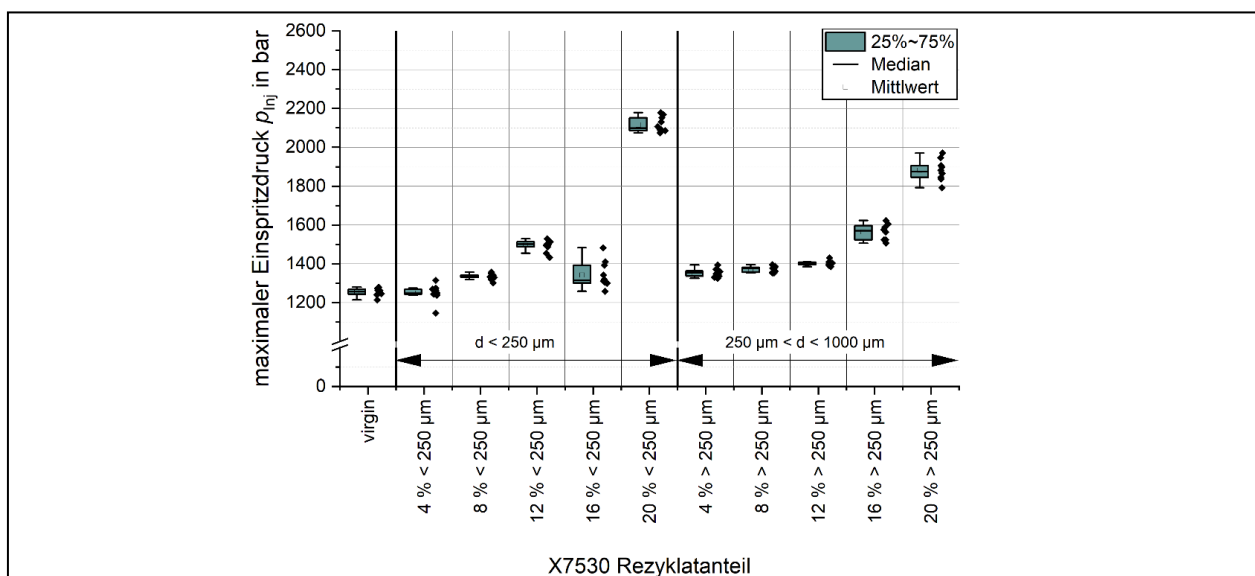


Abbildung 38: maximaler Einspritzdruck in Abhängigkeit von Rezyklatanteil und Partikelgröße (Quelle: Fraunhofer ICT)

Für beide Größenklassen ist ein deutlicher Anstieg des Einspritzdrucks mit steigendem Rezyklatanteil erkennbar. Mit Ausnahme des höchsten Rezyklatanteils von 20 Gew.-% ist keine signifikante Abhängigkeit des Einspritzdrucks von der Rezyklatpartikelgröße sichtbar. Ebenfalls ist tendenziell eine Zunahme der Streuung bei höherem Rezyklatanteil feststellbar, insbesondere bei M300.

Mechanische Bauteileigenschaften

Die Zugfestigkeit der hergestellten Prüfkörper wurde gemäß DIN EN ISO 527-2 [28] ermittelt (Abbildung 39).

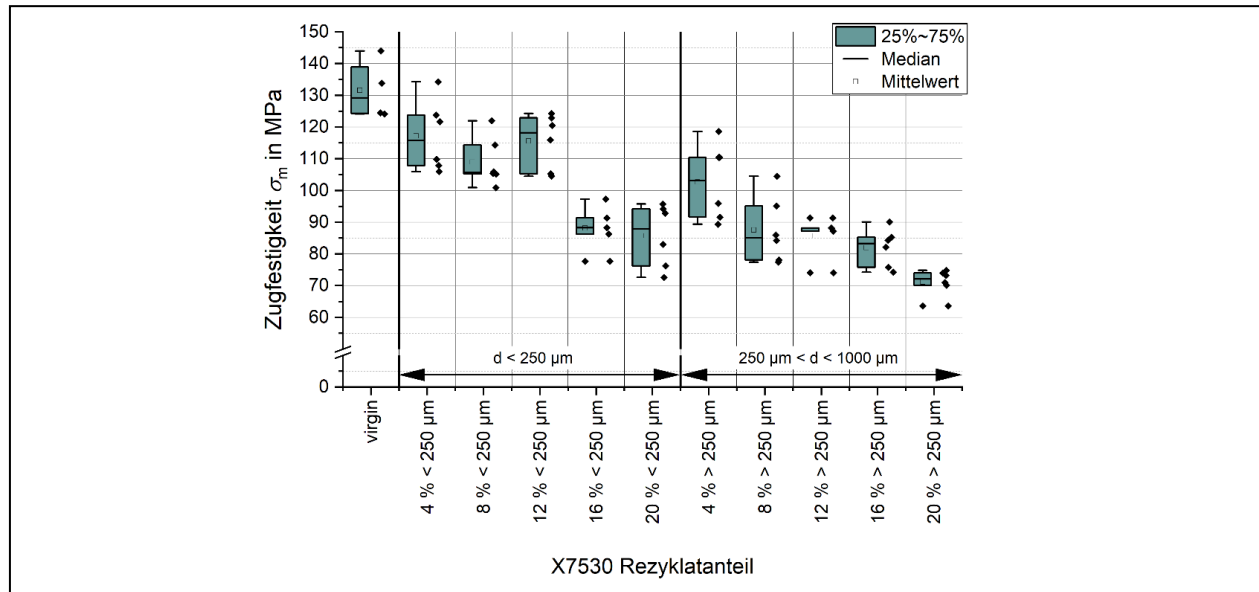


Abbildung 39: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Rezyklatanteil und Partikelgröße (Quelle: Fraunhofer ICT)

Es wurde eine Abnahme der Zugfestigkeit um ca. 15 MPa bei Rezyklatanteilen zwischen 4 und 12 Gew.-% beobachtet (< 250 µm). Zu höheren Rezyklatanteilen hin fiel die Festigkeitsabnahme stärker aus. Die Verwendung des Rezyklats mit einer Partikelgröße 250 µm < d < 1000 µm bewirkte einen starken Festigkeitsabfall um 25 MPa bereits bei 4 Gew.-%. Für alle Größenklassen und Rezyklatanteile war kein Einfluss auf die Streuung der Festigkeit erkennbar.

Die Partikelgröße hat neben dem Rezyklatanteil auch Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften.

Analyse mittels Rasterelektronenmikroskopie

Die Bruchflächen von Probekörpern für X7530-Neuware sowie für Rezyklatanteile von 20 Gew.-% in beiden Größenklassen (siehe Abbildung 40) wurden mikroskopisch mittels der Rasterelektronenmikroskopie analysiert.

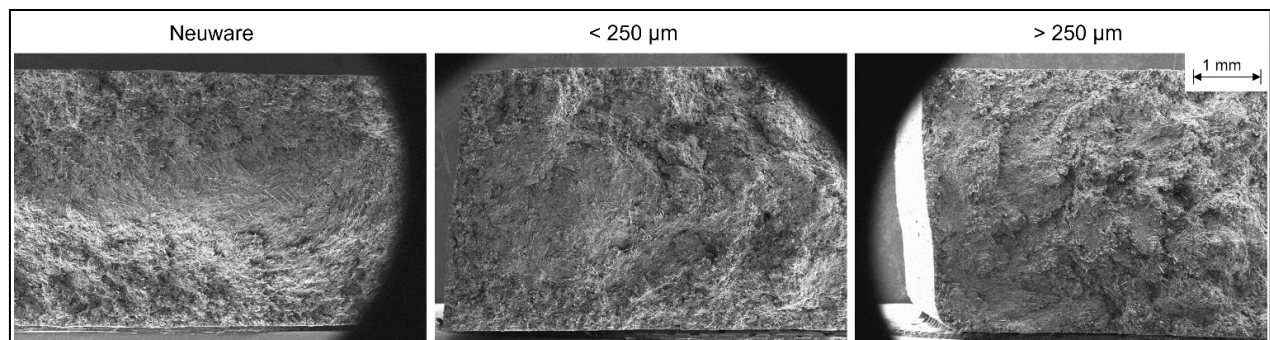


Abbildung 40: Aufnahmen der Bruchflächen von Prüfkörpern aus X7530 mittels Rasterelektronenmikroskopie (Quelle: Fraunhofer ICT)

Einzelne Rezyklatpartikel sind auch bei stärkerer Vergrößerung kaum zu identifizieren. Der für Phenolharz-Formmassen typische Kernschicht-Deckschicht-Aufbau [29] ist bei d > 250 µm geringer ausgeprägt; generell wirkt die Bruchfläche zerklüfteter und unregelmäßiger.

Untersuchung von Kavitäts- und Tempereinfluss

Bei der Untersuchung hinsichtlich eines Einflusses der Kavitätsposition in einem 6-fach-Zugstab-Werkzeug wurde kein signifikanter Einfluss einer Kavität bzw. zwischen den Kavitäten festgestellt.

Das Tempern erhöhte die Festigkeit um ca. 5 MPa bis 15 MPa. D.h. es ist eine tendenzielle Steigerung der Zugfestigkeit durch das Tempern feststellbar.

2.1.4.4 Ermittlung der Einflüsse von Rezyklat in einer Serienproduktion (AP 4.1)

Die anhand der Prüfkörper gewonnenen Erkenntnisse wurden auf ein komplexes Spritzgießbauteil übertragen, welches bei Baumgarten in Großserie produziert wird.

Um die Auswirkungen der Rezyklat-Zumischung nicht nur für grundlegende Werkstoffkennwerte zu bestimmen, sondern auch anhand von Bauteileigenschaften beschreiben zu können, wurde im Anschluss an die Zugprüfkörperversuche eine Versuchsreihe bei Baumgarten unter Serienbedingungen durchgeführt. Die Untersuchungen wurden anhand eines in Serie bei Baumgarten laufenden Stellrings für eine geregelte Pendelschieber-Ölpumpe aus der Phenolharz-Formmasse X7320 durchgeführt.

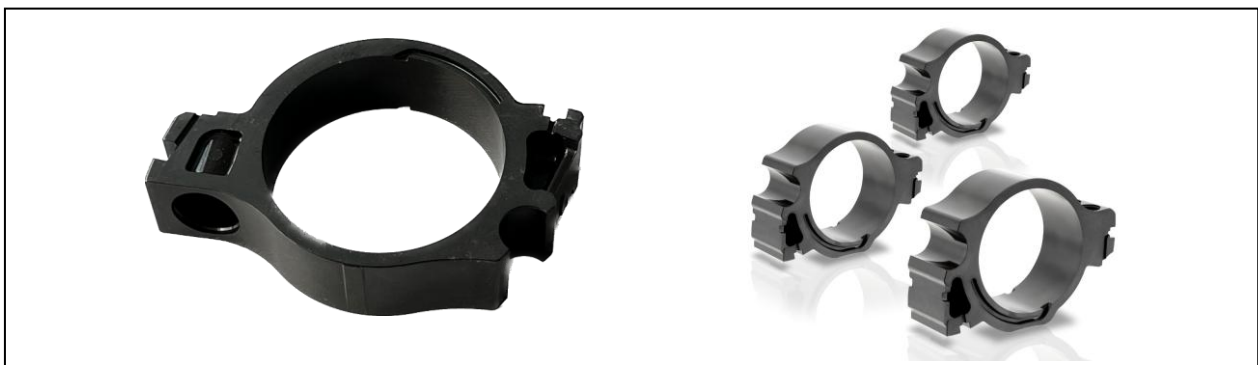


Abbildung 41: Stelling für Ölpumpe (Quelle: Fraunhofer ICT, Baumgarten)

Die Ölpumpenstellringe werden auf Spritzgießmaschinen der Typen KM 80-390 und KM 150-750 von Krauss-Maffei in 1-fach und 4-fach Werkzeugen in Serie gefertigt (Werkzeugkonzept und -konstruktion von Baumgarten).



Abbildung 42: Serienfertigung der Ölpumpenstellringe (Quelle: Baumgarten)

Für die Untersuchungen wurde ein Recycling-Kreislauf für den Angussverteiler des Serienbauteils (4-fach) aufgebaut. Die Kreislaufführung des Angusses beinhaltete Zerkleinerung beim Fraunhofer ICT, Beimischung zur Neeware und Rückführung.

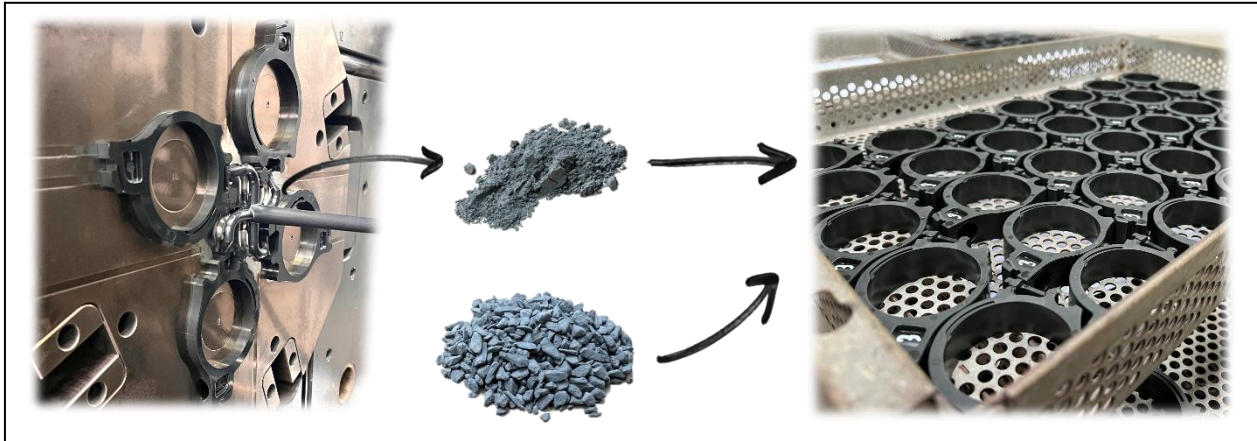


Abbildung 43: Recycling-Kreislauf für die Serienanwendung (Quelle: Baumgarten, Fraunhofer ICT)

Das grundsätzliche Vorgehen bei der Zerkleinerung bzw. Herstellung des Rezyklatmaterials wurde im Wesentlichen aus dem Vorversuch mit den Zugprüfkörpern übernommen. Dabei wurden die Angüsse aus der Produktion der Stellringe verwendet. Während der Zerkleinerung wurde der Energieverbrauch gemessen (für AP 4.2).

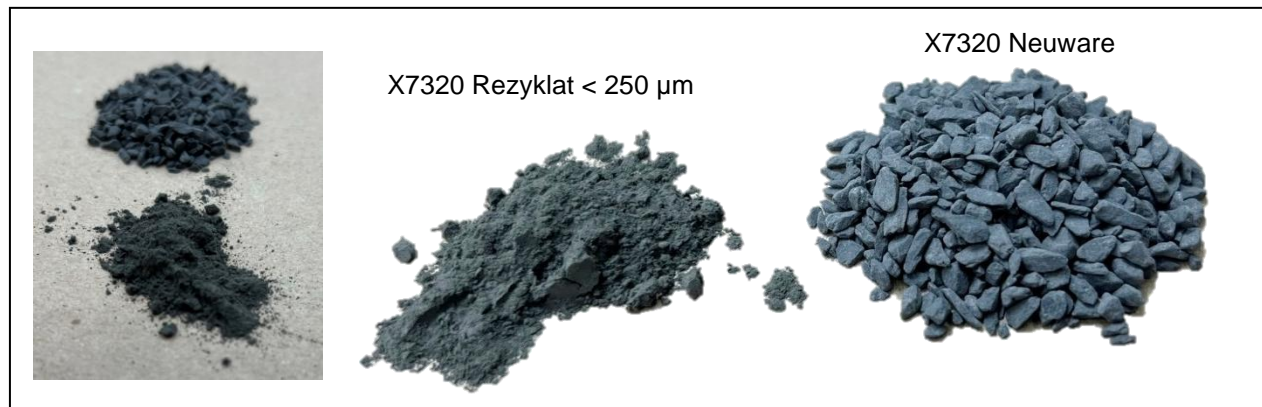


Abbildung 44: Phenolharz-Formmasse X7320 (Quelle: Baumgarten, Fraunhofer ICT)

Das erhaltene Mahlgut vom Fraunhofer ICT wurde bei den Praxisversuchen bei Baumgarten in unterschiedlichen Füllgraden wiederverwendet. Dazu wurde das Rezyklat vor der Spritzgießverarbeitung in Gewichtsanteilen zwischen 4% und 20% zur Phenolharz-Neuware gemischt und der Spritzgießmaschine zugeführt.

Ergebnisse

Vergleichbare Ergebnisse wie bei den experimentellen Voruntersuchungen (siehe Kapitel 2.1.4.3) wurden für die Formmasse X7320 ermittelt. Jedoch wurden aufgrund der signifikant niedrigeren Festigkeit bei der Verwendung der großen Rezyklatpartikel ($250 \mu\text{m} < d < 1000 \mu\text{m}$) die Spritzgießversuche für den Ölpumpenstellring nur mit der kleineren Größenklasse ($d < 250 \mu\text{m}$) durchgeführt. Bei der Spritzgießverarbeitung zeigte sich mit steigendem Rezyklatanteil ebenfalls ein ansteigender Einspritzdruckbedarf. Bei unveränderten Spritzgießparametern erfolgte die Werkzeugfüllung bereits ab einem Rezyklatanteil von 4 Gew.-% nur noch während des Einspritzprofils, jedoch nicht mehr während der Nachdruckphase. Dies konnte durch eine Anpassung des Nachdrucks an den höheren Umschaltmassedruck kompensiert werden.

Als problematisch stellte sich jedoch folgender Faktor heraus: die zunehmende Neigung zu einem Verschluss der Düse in Form von sich aufbauenden Materialablagerungen auf der Innenseite der Maschinendüse. Dieses Phänomen trat bei den hohen Rezyklatanteilen > 12 Gew.-% in immer kürzeren Intervallen von 10 bis 15 Zyklen auf und ließ sich auch durch zahlreiche Prozessparametervariationen (u.a. Staudruck, Schneckendrehzahl, Plastifizierungstemperatur, Werkzeugtemperatur und Einspritzprofil) nicht signifikant beeinflussen.

Die gemäß den Anforderungen des Serienbauteils ermittelte Bruchlast des Ölpumpenstellrings zeigte den von der Zugfestigkeit bekannten Zusammenhang der abnehmenden mechanischen Eigenschaften mit steigendem Rezyklatanteil. Tendenziell wurde auch eine Zunahme der Messstreuung konstatiert. Mit einer mittleren Bruchlast von $F = 1,6 \text{ kN}$ lag die Materialcharge mit einem Rezyklatanteil von 4 Gew.-% noch leicht oberhalb der als i.O. / n.i.O.-Grenze definierten Bruchlast von $F = 1,5 \text{ kN}$.

Im Anschluss wurde die Maßhaltigkeit der Ölpumpenstellringe von Baumgarten überprüft. Tendenziell war mit zunehmendem Rezyklatanteil eine Abnahme des Innendurchmessers zu beobachten (siehe Abbildung 45). Dies wird auf den höheren Werkzeuginnendruck zurückgeführt, der für eine vollständige Formfüllung bei Chargen mit einem hohen Rezyklatanteil erforderlich war [30].

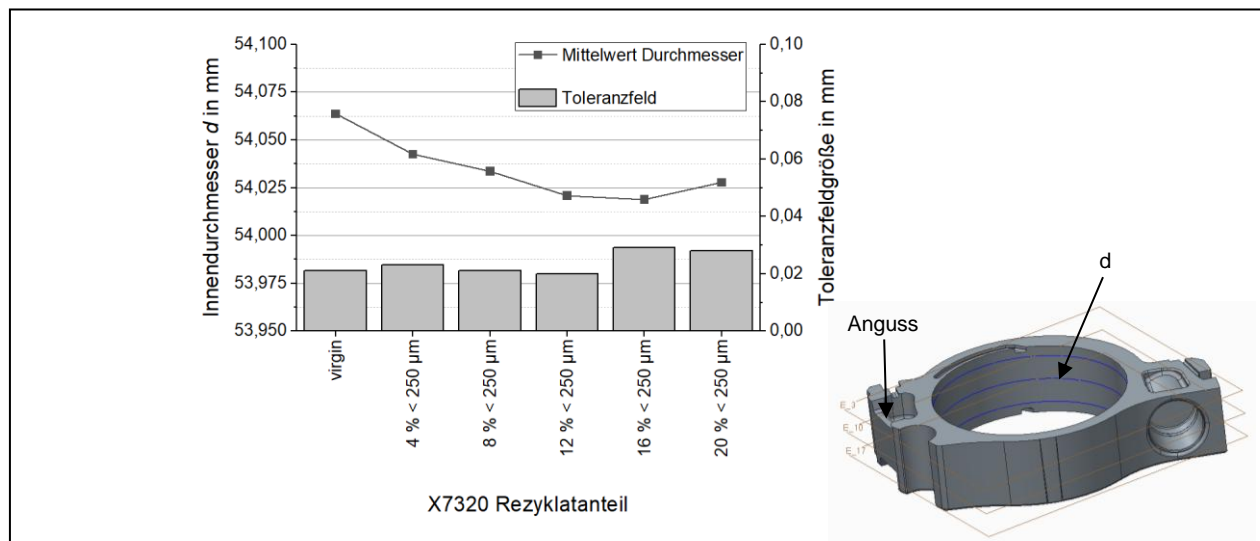


Abbildung 45: Dimensionsschwankungen in Abhängigkeit vom Rezyklatanteil (Quelle: Baumgarten)

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der mechanischen Charakterisierung lässt die Größe des Toleranzfelds keinen Einfluss des Rezyklatanteils erkennen (siehe Abbildung 45). Für alle Rezyklatanteile wurde eine Größe des Toleranzfelds von $s < 0,03$ mm erreicht, was deutlich in der Spezifikation von $s < 0,12$ mm lag.

Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass die Rückführung von ausgehärteten, duromeren Formmassen als Füllstoff in den Spritzgießprozess möglich ist. Der realisierbare Rezyklatanteil ergibt sich in Abwägung zwischen Ressourceneinsparungen und dem Verlust an mechanischen Eigenschaften. Für die hier untersuchten, anorganisch gefüllten Phenolharz-Formmassen lag dieser Anteil bei ca. 8 Gew.-%. Er führte zu einem moderaten Verlust der mechanischen Eigenschaften (- 15 MPa Zugfestigkeit), einer gleichbleibenden Maßhaltigkeit der Bauteile und einem um ca. 100 bar erhöhten maximalen Einspritzdruck.

2.1.4.5 Ableitung von Design-Richtlinien für die Verwendung der direkten Rückführung (AP 4.3)

Aufgrund der Versuche in AP 4.1 konnte eine aussagekräftige Basis für die Verwendung von rezyklierten PF-Materialien geschaffen werden.

Im Rahmen der Versuchskampagne bei Baumgarten wurde der Einfluss der Rückführung auf die industrielle Verarbeitbarkeit einer Phenolharz-Formmasse untersucht (siehe Kapitel 2.1.4.4). Durch die bei Baumgarten vorhandenen Automatisierungs- und Handlingsysteme konnten in dieser Versuchsreihe Effekte wie beispielsweise Prozessschwankungen und Toleranzbreiten detailliert erfasst werden, was im Labormaßstab nicht möglich gewesen wäre. Basierend auf den Versuchsergebnissen wurden abschließend gemeinsam mit den Konstrukteuren der Demonstrationsanwendungen (Race Result, Fraunhofer ICT) Design-Richtlinien für die Bauteilkonstruktion unter Verwendung der Rückführung abgeleitet. Diese sind in die laufende Detailgestaltung der beiden Demonstratoranwendungen eingeflossen (AP 2).

Allgemein anwendbare Hilfestellungen für Konstrukteure wurden erarbeitet, um die Bauteilkonstruktion unter Verwendung der Rückführung von Rezyklatmaterial zu erleichtern.

Zusammenfassung und abgeleitete Design-Richtlinien

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass die Rückführung von ausgehärteten duromeren Formmassen als feinvermahlener Füllstoff in den Spritzgießprozess möglich ist.

Aufgrund der Untersuchungen wird ein Rezyklatanteil von maximal 8 Gew.-% empfohlen. Das Rezyklat sollte möglichst fein vermahlen werden. Eine Partikelgröße von < 250 µm ist anzustreben.

Für die Versuchszwecke wurde das Rezyklat im Vorfeld der Spritzgießversuche hergestellt. Perspektivisch wird die direkte Zerkleinerung der Angüsse an der Spritzgießmaschine bevorzugt, sodass ein geschlossener Kreislauf des Angussmaterials erzielt wird. Jedoch ist das Zerkleinerungs- und Siebverfahren aufwendig und verschleißanfällig.

Die verschlechterten mechanische Eigenschaften sind bei der Bauteilkonstruktion und ein erhöhter Einspritzdruckbedarf ist auch bei der Auslegung der Spritzgießanwendung zu berücksichtigen.

Mit der Definierung und Weitergabe der Design-Richtlinien wurde der Meilenstein M2 abgeschlossen.

Resumee aus dem AP 4

Es tritt ein erhöhter Spritzdruckbedarf durch die Rezyklat-Zumischung auf. Die mechanischen Eigenschaften, besonders die Festigkeit, verschlechtern sich durch den „zusätzlichen“ Füllstoff Rezyklat. Abhängig von der Partikelgröße ist der Zerkleinerungs- und Siebprozess aufwendiger. Verschleiß ist hierbei ein wichtiger Faktor. Die direkte Rückführung ist also machbar, aber aufwendiger und weniger sinnvoll als bei Thermoplasten. Dies führte zur Erkenntnis, dass eine Substitution von Füllstoff durch Rezyklat anstatt „zusätzlicher“ Füllstoff angestrebt werden sollte.

2.1.5 Aufbau von Pilotanlagen zur Umsetzung und Demonstration der entwickelten Technologien (AP 5)

Ziel dieses Arbeitspakets war die Demonstration der in den Grundlagenuntersuchungen entwickelten Prozessinnovationen anhand von zwei Pilotanlagen und ihre Evaluierung hinsichtlich ihrer industriellen Umsetzbarkeit.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die beiden Demonstrator-Werkzeuge umgesetzt und Musterteile gefertigt. Die beiden Werkzeuge wurden konzipiert, konstruiert und gefertigt (AP 5.1) und auf der jeweiligen Pilotanlage abgemustert. Dazu wurden die Pilotanlagen aufgebaut, inkl. Peripherie in Betrieb genommen (AP 5.2 bzw. AP 5.3) und es wurden final Musterteile hergestellt. Beim Elektromotorgehäuse (AP 5.3) wurde dabei die in AP 3.4 entwickelte Prototyp-Plastifizierung für rieselfähige Duomere verwendet. Anschließend wurden beim Elektromotorgehäuse Versuche zu den Prozessinnovationen durchgeführt. Im AP 5.4 wurden mit den in AP 5.2 bzw. AP 5.3 ermittelten Energieverbräuchen jeweils eine ganzheitliche Bilanzierung der Ressourcen- und CO₂-Einsparungen aufgestellt.

In enger Abstimmung mit den Bauteilkonstrukteuren und Partnern konzipierte, konstruierte und fertigte GHD die Spritzgießwerkzeuge für die beiden Demonstrationsanwendungen (AP 5.1). Mit der Detailkonstruktion der beiden Anwendungen wurde der Meilenstein M3 erreicht.

Mit der Inbetriebnahme der beiden Pilotanlagen (AP 5.2 und AP 5.3) wurde der Meilenstein M5 erreicht.

2.1.5.1 Werkzeugkonstruktion und -fertigung – Füllsimulationen (AP 5.1)

Ziel des Arbeitspakets AP 5.1 war die Konstruktion und Herstellung der Spritzgießwerkzeuge für die zwei Demonstratoranwendungen: 4-fach-Transponder und 2-fach-Elektromotorgehäuse.

Dazu wurden vom KIT-FAST Füllsimulationen zur Identifikation des Angusskonzepts erstellt. Simutence unterstützte darüber hinaus durch Prozesssimulationen, in denen die neuen Methoden zur Berücksichtigung des Rezyklatanteils enthalten waren, um das Prozessfenster des Demonstrators zu identifizieren.

Um eine geeignete Angussvariante zu ermitteln, wurden umfangreiche Füllstudien vom KIT-FAST mit der Simulationssoftware Autodesk Moldflow 2023 durchgeführt. Hierbei wurden für beide Werkzeugkonzepte Angussvarianten mit verschiedenen Querschnittsflächen und Geometrien, wie in Abbildung 46a exemplarisch für den Transponder dargestellt, simuliert. Die wesentlichen Bewertungskriterien waren dabei das sich einstellende Füllbild, Faserorientierung, Ausprägung von Lufteinschlüssen sowie der sich einstellende maximale Einspritzdruck, wie in Abbildung 46b für das Elektromotorgehäuse dargestellt.

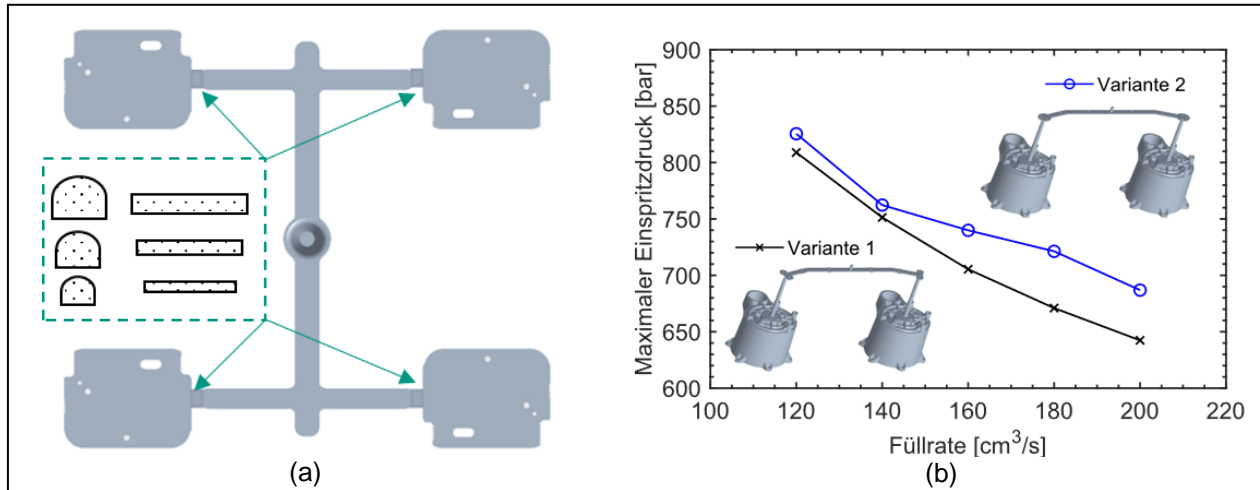


Abbildung 46: Simulative Untersuchung verschiedener Angusskonzepte für Transponder (a) und Elektromotorgehäuse (b) (Quelle: KIT-FAST)

Beim Elektromotorgehäuse wurden verschiedene Angusspositionen, u.a. auch seitliche Anschnitte, untersucht. Jedoch führte keine der seitliche Angussoptionen zu zufriedenstellenden Simulationsergebnissen, weshalb man sich zusammen mit GHD entschieden hat, mittige Stangenangüsse mit einem Angussverteiler mittels eines 3-Platten-Werkzeugs umzusetzen.

Die Vorversuche zur Charakterisierung des Fließverhaltens der Materialien M300 auf Epoxidharzbasis sowie X7530 auf Phenolharzbasis wurden am Fraunhofer ICT zusammen mit KIT-FAST am 2-fach-Versuchswerkzeug mit dem Wechseleinsatz Rechteckplatte durchgeführt. Hierbei wurde ein von KIT-FAST entwickelter Versuchsplan abgefahren und es wurden DSC-Proben entnommen. Die hieraus gewonnenen Daten wurden verwendet, um das Materialmodell optimal einzustellen.

2.1.5.2 Werkzeugkonstruktion und -fertigung – Demonstrator Transponder (AP 5.1)

Aufgrund der Entscheidung für ein neues Design ohne Batterie-Umspritzung (siehe Kapitel 2.1.2.3) wurde diese Variante umgesetzt (AP 2.1, siehe Kapitel 2.1.2.4). Die Umspritzung einer Batterie war also beim finalen Demonstrator-Werkzeug nicht mehr integriert. Das endgültige Werkzeug wurde in 4 Kavitäten ausgeführt.

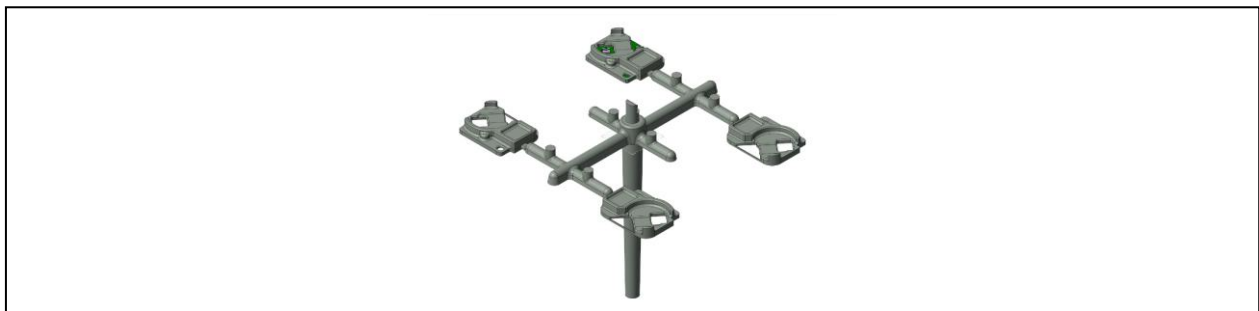


Abbildung 47: Werkzeugdesign – 4-fach-Anordnung (Quelle: GHD)

Seitens Baumgarten und GHD wurde der Anguss bzw. die Anschnitte unter Berücksichtigung der Simulationen entsprechend des verwendeten Materials ausgelegt bzw. dimensioniert und positioniert. Der Werkzeugaufbau wurde definiert.

Hinsichtlich der Kavitätsbalancierung (AP 3) wurden zur Ermittlung von Daten zur Formfüllung in jeder der 4 Kavitäten Werkzeuginnendruckensoren am Fließwegende eingebaut. Jedoch wurde keine konturnahe Temperierung im Angussverteiler integriert; d.h. es fand keine Regelung statt bzw. es war keine Einflussnahme auf das Fließverhalten vorgesehen.

Das Werkzeug wurde von GHD konstruiert (siehe Abbildung 48). Duromergerechte Entformungsschrägen mussten u.a. eingehalten werden.

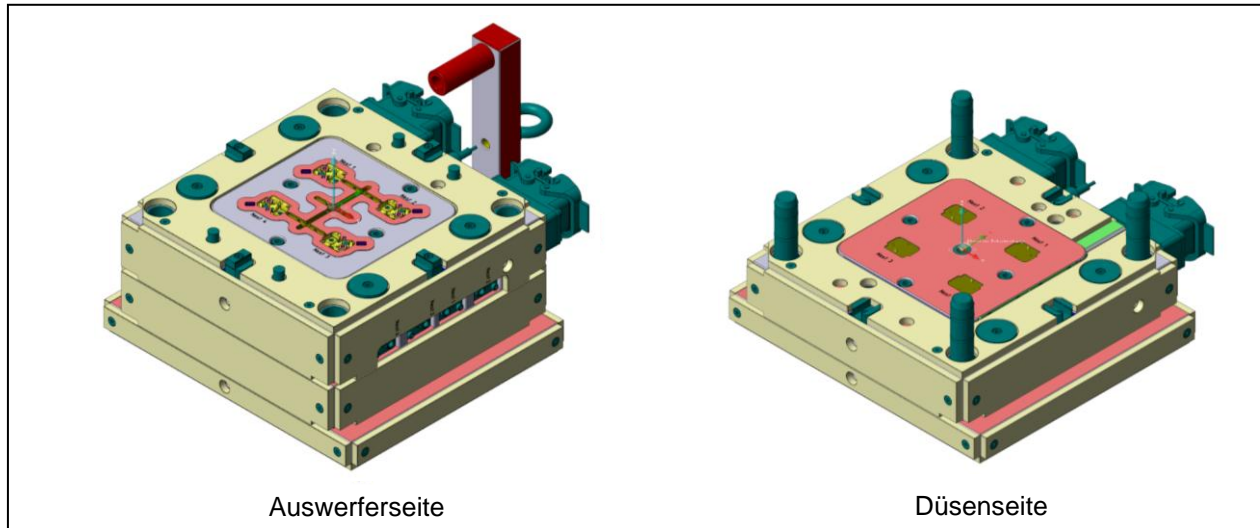


Abbildung 48: Demonstrator-Werkzeug Transponder 4-fach (Quelle: GHD)

Eine besondere Herausforderung waren außerdem die relativ großen Toleranzen der zu umspritzenden Leiterplatten ($\pm 0,1$ mm), die u.a. bei der Platzierung im Spritzgießwerkzeug und beim Abdichten des Einlegeteils berücksichtigt werden mussten.

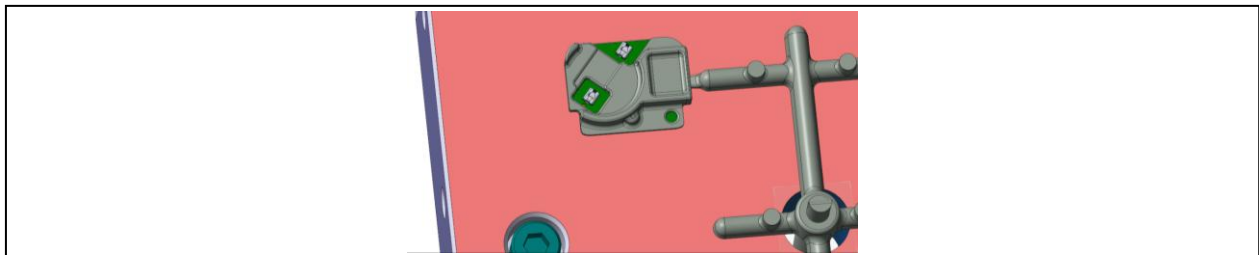


Abbildung 49: Werkzeugdesign – umspritzte Platine (Quelle: GHD)

2.1.5.3 Werkzeugkonstruktion und -fertigung – Demonstrator Elektromotorgehäuse (AP 5.1)

Für das Gehäuse der Elektromotor-Getriebe-Einheit wurde eine Fertigung in zwei Kavitäten angestrebt, um die Kavitätsbalancierung demonstrieren zu können.

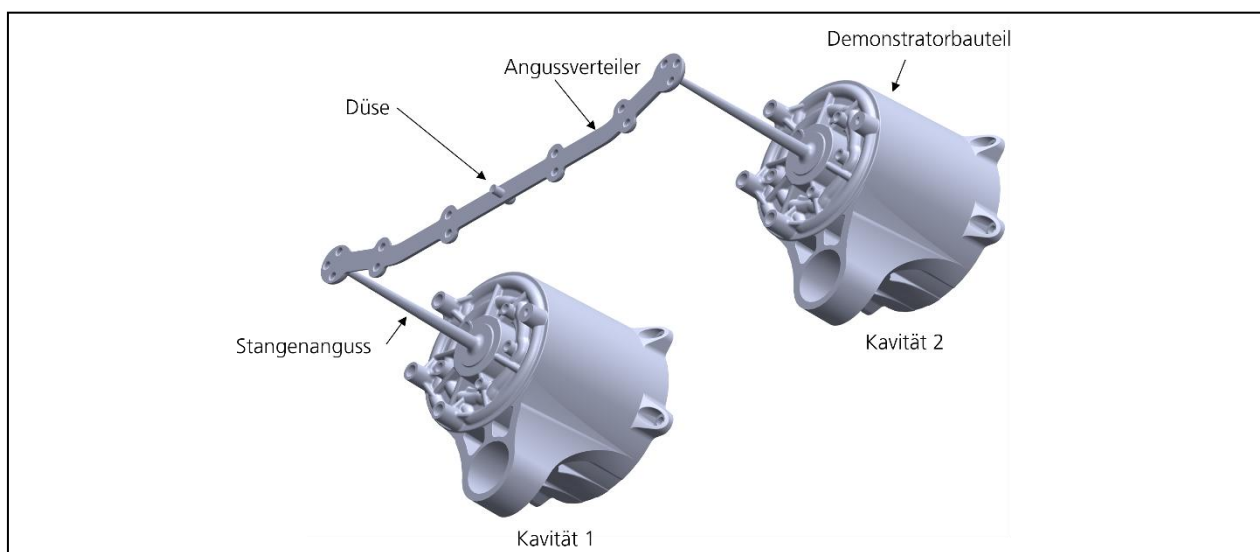


Abbildung 50: Elektromotorgehäuse 2-fach-Anordnung (Quelle: GHD)

Das Werkzeug wurde von GHD mit Unterstützung der Projektpartner konstruiert (siehe Abbildung 51).

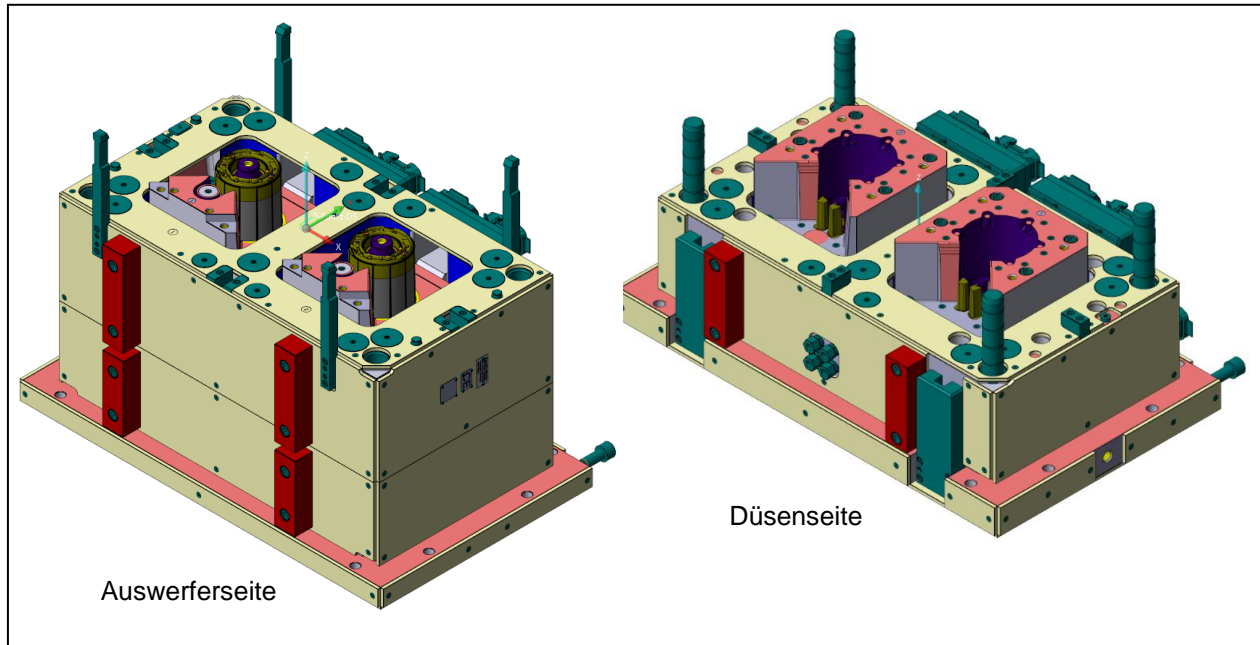


Abbildung 51: Demonstrator-Werkzeug Elektromotorgehäuse 2-fach (Quelle: GHD)

Eine der Herausforderungen war hierbei wegen der Größe des Werkzeugs eine gleichmäßige Werkzeug- bzw. Kavitätentemperatur. Wichtig war deshalb das Heizkonzept mit den Temperaturfühlerpositionen. Die Werkzeugbeheizung erfolgte elektrisch über Heizpatronen (Ausnahme: Angussverteiler wegen Kavitätsbalancierung). In Zusammenarbeit mit KraussMaffei wurde die Heizlast pro Stecker bzw. Heizzone ermittelt und optimal auf die Bedürfnisse ausgelegt.

Das Werkzeug wurde als 3-Platten-Werkzeug ausgeführt (siehe Abbildung 52). Dadurch wurde der Angussverteiler mittels Klinkenzügen von den beiden Stangenangüssen abgerissen und in einer separaten Trennebene entformt.

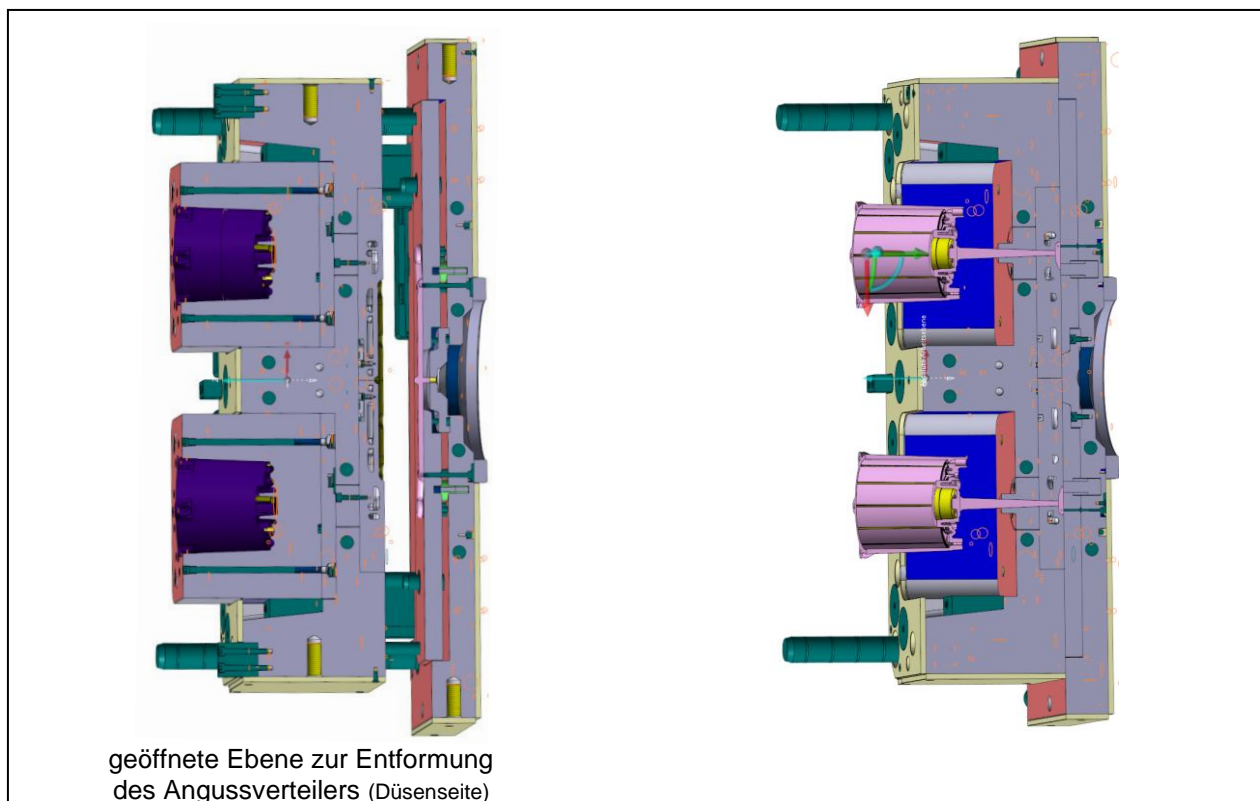


Abbildung 52: Werkzeugdesign – 3-Platten-Konzept (Quelle: GHD)

Vorbereitung für die Kavitätsbalancierung

Beim Elektromotorgehäuse wurden die Voraussetzungen für eine aktive Kavitätsbalancierung seitens GHD im Werkzeug umgesetzt. Dazu wurde in jeder Kavität ein Werkzeuginnendrucksensor am Fließwegende eingebaut.

Weiterhin wurde der Werkzeugeinsatz für den Angussverteiler aus Fertigungsgründen zweigeteilt und von Technotrans mit konturnahen Temperierkanälen inklusive jeweils einem Temperaturfühler für die Temperiergeräte versehen. D.h. die Sensorik für die aktive Kavitätsbalancierung wurde ins Werkzeug integriert.

Umsetzung der konturnahen Temperierung für die Kavitätsbalancierung

Von Technotrans wurde die konturnah temperierte Angussverteilerplatte ausgelegt und aus von GHD gefertigten Rohlingen hergestellt.

- Bewertung der Konstruktionsdaten
- Festlegung der Fügeebene
- Fügerechte Konstruktion des Rohlings
- Festlegung der Aufmaßsituation des Rohlings auf Basis der durch den Formenbau vorgegebenen Einsatzkonstruktion
- Bewertung der Fertigungsmachbarkeit (Entscheidung: mittige Teilung der Verteilerplatte)
- Festlegung der Position des Thermofühlers im Einsatz
- Auslegung des Temperierkanals in der Verteilerplatte im Hinblick auf die zu erwarteten Festigkeits-, Druck- und Temperaturverhältnisse im Einsatz
- Ausarbeitung der dreidimensionalen, konturnahen Temperierkanalführung
- Positionierung und Auslegung der Sensorik
- Konstruktives Einbringen des Temperierkanals in die Verteilerplatte unter Berücksichtigung der vorhandenen Bohrungen und Durchbrüche
- Druckverlustberechnung der Kanalgeometrie

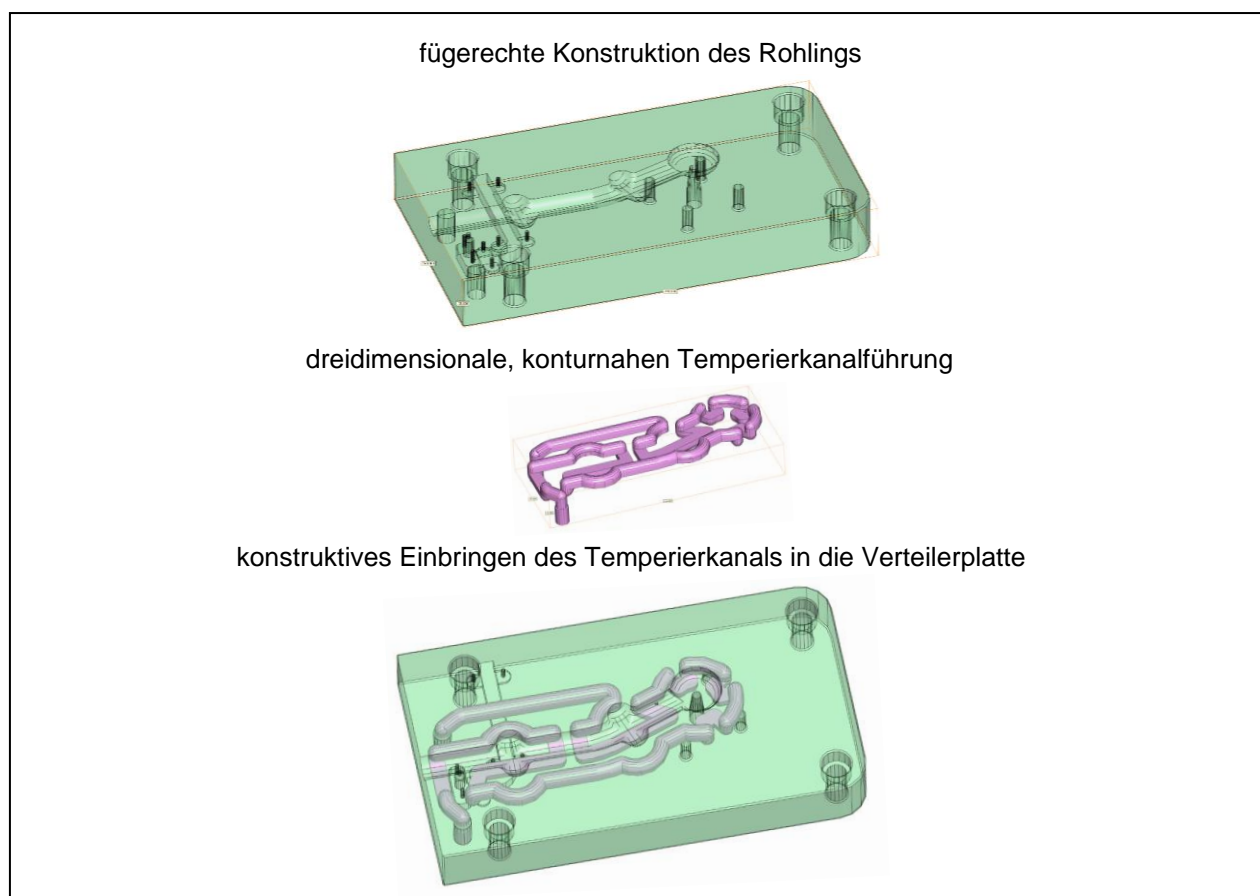


Abbildung 53: Design der konturnahen Temperierung (Quelle: Technotrans, GHD)

Aus Fertigungsgründen hinsichtlich der konturnahen Temperierkanäle wurde der Bereich des Angussverteilers 2-teilig ausgeführt und jeweils mit einem Temperatursensor versehen (siehe Abbildung 54).

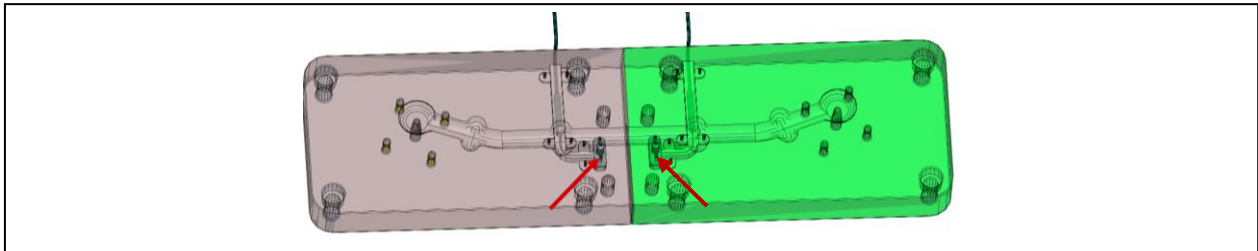


Abbildung 54: Position der Thermofühler in den Einsätzen (Quelle: Technotrans, GHD)

Umgesetzt wurde die Technologie bei Technotrans mittels des Verfahrens Hochtemperaturvakuumlöten.

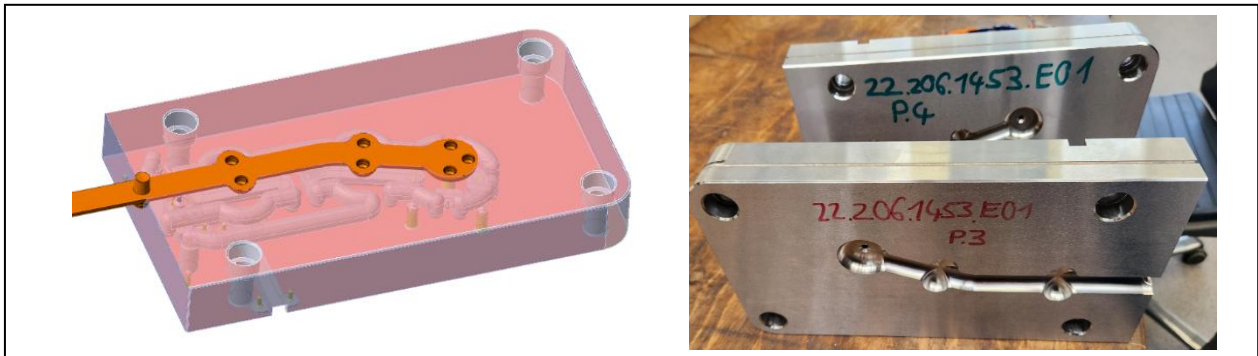


Abbildung 55: Einsätze für die konturnahe Temperierung (Quelle: Technotrans, GHD)

Abstimmung mit der Spritzgießmaschine bzw. Peripherie

Aufgrund des Werkzeugaufbaus als 3-Platten-Werkzeug und des Angussverteilers für die 2 Kavitäten musste die Düse tiefer als üblich ins Werkzeug eintauchen. Damit die Entformung störungsfreier verlief, musste der düsenseitige Angusszapfen möglichst kurz ausgelegt werden.

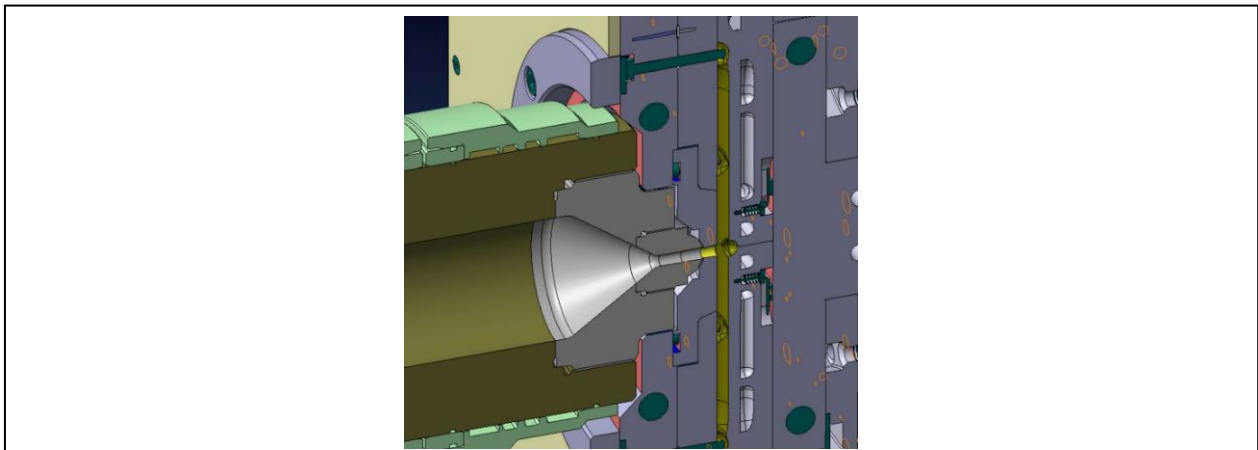


Abbildung 56: Problematik Eintauchtiefe der Plastifizierung (Quelle: GHD, KraussMaffei)

Deshalb wurde die benötigte Eintauchtiefe hinsichtlich Kollision mit der eingebauten Plastifizierung und dem Werkzeug überprüft. Es trat in der ersten Konstruktionsversion des Werkzeugs eine Kollision einer Wasserverschraubung in der Tulpe der festen Aufspannplatte auf, sodass der maximale Vorfahrweg des angepassten Aggregats nicht ausgenutzt werden konnte.

Da auch eine neue, kürzere Düse benötigt wurde, konnte die Plastifizierung noch weniger tief eintauchen. Außerdem befand sich der Zylinderkopf in vorderster möglicher Position des Aggregats im Aufspannbereich des Werkzeugs bzw. auch im Zentrierringbereich, sodass er mit Bereiche des Werkzeugs kollidiert wäre, wenn das Werkzeug hier nicht angepasst worden wäre.

Die erforderliche, werkzeugseitige Aussparung wurde entsprechend von GHD und KraussMaffei abgestimmt.

2.1.5.4 Aufbau / Inbetriebnahme der Pilotanlage Transponder-Umspritzung (AP 5.2)

Das von GHD gefertigte 4-fach-Spritzgießwerkzeug wurde bei Baumgarten mit Unterstützung von Race Result und Fraunhofer ICT in der Pilotanlage zur Herstellung der Transponder-Umspritzung abgemustert. Als Pilotanlage wurde eine Bestandsmaschine aus der Produktion bei Baumgarten verwendet. Bei der Inbetriebnahme der Pilotanlage waren die jeweiligen Bauteilkonstruktoren, GHD als Werkzeugbauer und Baumgarten mit ihrer Expertise im Bereich der Großserienfertigung von Duromer-Bauteilen unterstützend tätig. Die Elektronik-Komponenten und die PP-Gehäuse für den finale Transponder wurden von Race Result bereit gestellt. Die Transponder-Platinen wurden mit einer Epoxidharz-Formmasse (Epoxidur EP 3681E von Raschig) umspritzt.

Von der Produktinnovation Transponder mit umspritzter Platine (ohne Batterie) wurden ca. 150 Musterteile hergestellt. Dabei wurden auch Daten zur Kavitätsbalancierung erfasst; jedoch wurde nicht geregelt. Weiterhin wurde der Energieverbrauch für die ganzheitliche Bilanzierung (AP 5.4) gemessen.

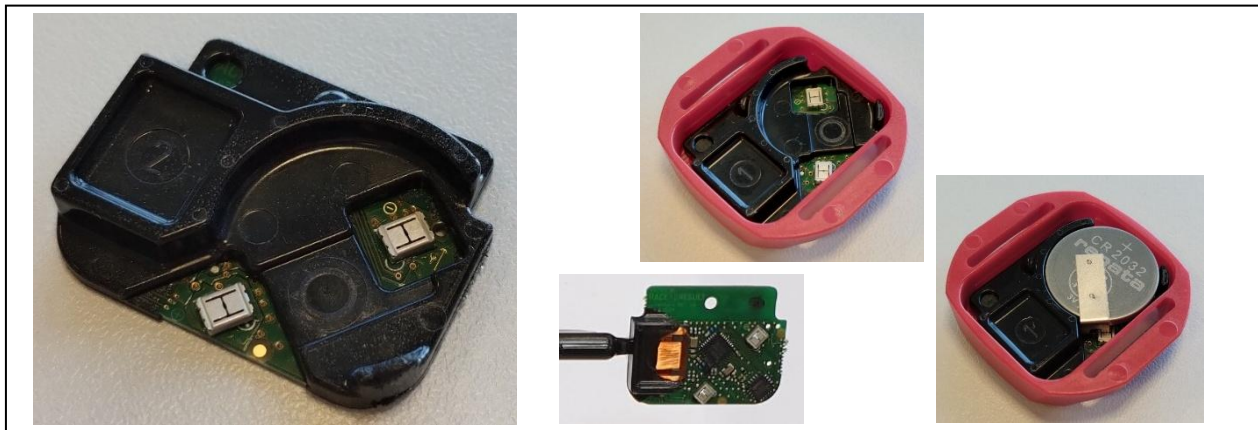


Abbildung 57: Demonstrator-Transponder (Quelle: Race Result)

Ein PP-Gehäuse war bei der komplett montierten Demonstrator-Variante weiterhin notwendig.

Die Musterteile wurden von Race Result hinsichtlich der Funktionalität geprüft. Alle Stichproben waren in Ordnung. Auch filigrane Elemente der Elektronik wie die Antenne wurden bei der Umspritzung nicht beschädigt.

Außerdem wurden die im Lite₂Duro-Projekt gefertigten und komplett montierten Transponder von den Projektpartnern als finalen Praxis-Test auf einer Messstrecke von Race Result wie bei einer Sportveranstaltung getestet.

2.1.5.5 Aufbau / Inbetriebnahme der Pilotanlage Elektromotorgehäuse (AP 5.3)

Dieses Arbeitspaket beinhaltete hauptsächlich die Abmusterung des Elektromotorgehäuses.

Ziele der Abmusterung:

- Aufbau und Inbetriebnahme der Pilotzelle
- Funktionstests von Werkzeug, Peripherie bzw. Anlage
- Abmusterung des Demonstrator-Werkzeugs und Prozessfindung
- Validierung der neu entwickelten Duromer-Plastifiziereinheit $\varnothing 90$ mm mit dem Demonstratormaterial
- Prozessoptimierung
- Musterteileherstellung

Versuche mit der Pilotzelle:

- Energiemessungen und Datenerfassung für die ganzheitliche Betrachtung
- Aufbau und Test des Regelkreises zur Kavitätsbalancierung
- Versuche hinsichtlich der Kavitätsbalancierung
- Untersuchungen hinsichtlich verschiedener Rezyklatanteile

Aufbau und Inbetriebnahme der Pilotanlage

Im Rahmen des AP 5.3 wurde die Pilotanlage für die Abmusterung des Gehäuses der Elektromotor-Getriebe-Einheit inklusive Peripherie aufgebaut und in Betrieb genommen. Das in AP 5.1 von GHD konstruierte und gefertig-

te Spritzgießwerkzeug wurde von KraussMaffei in die Pilotanlage eingebaut und angefahren bzw. abgemustert. Bei der Planung, Umsetzung und Inbetriebnahme der Pilotanlage durch KraussMaffei waren Fraunhofer ICT, Technotrans, GHD als Werkzeugbauer und Baumgarten mit ihrer Expertise im Bereich der Großserienfertigung von Phenolharz-Bauteilen unterstützend tätig. Das Ziel der anschließenden Spritzgießversuche war es außerdem, die entwickelten Prozessinnovationen zu validieren und zu demonstrieren. Hier waren neben KraussMaffei das Fraunhofer ICT, KIT-FAST und Technotrans maßgeblich beteiligt.

Das zentrale Element der Pilotzelle war eine Spritzgießmaschine GX 650 - 4300 im Technikum von KraussMaffei.



Abbildung 58: Spritzgießmaschine GX 650 – 4300 mit Duomer-Plastifizierung (Quelle: KraussMaffei)

Die Prototypenplastifizierung aus AP 3.4 wurde in die GX 650 eingebaut und an 3 Temperiergeräte angeschlossen. Die für das Demonstrator-Werkzeug gefertigte Düse wurde montiert.

Durch einen Umbau an den Aggregatzylindern und Führungen von der Einspritz-/Plastifiziereinheit der Spritzgießmaschine wurde die Eintauchtiefe im Vergleich zum Standard erhöht. Dadurch konnte die Plastifizierung weiter in den Werkzeugbereich eintauchen, was aufgrund des Werkzeugaufbaus bzw. des Konzepts für den Angussverteiler beim Demonstrator-Werkzeug erforderlich war. Der separate Maschinen-Zentriering musste ebenso entfallen.

Werkzeugeinbau und Peripherie-Aufbau

Das Demonstrator-Werkzeug Elektromotorgehäuse von GHD wurde in die Spritzgießmaschine eingebaut und über einen externen Heizungsschrank elektrisch beheizt. Dazu mussten wegen der vielen Heizzonen neue Kabel konfektioniert und entsprechend dem Werkzeug verdrahtet werden. Da der Düsenkontakt sehr kritisch bei diesem Werkzeug hinsichtlich der maximalen Eintauchtiefe war, wurde die Düsen-Tuschierung mit einem Endoskop kontrolliert.

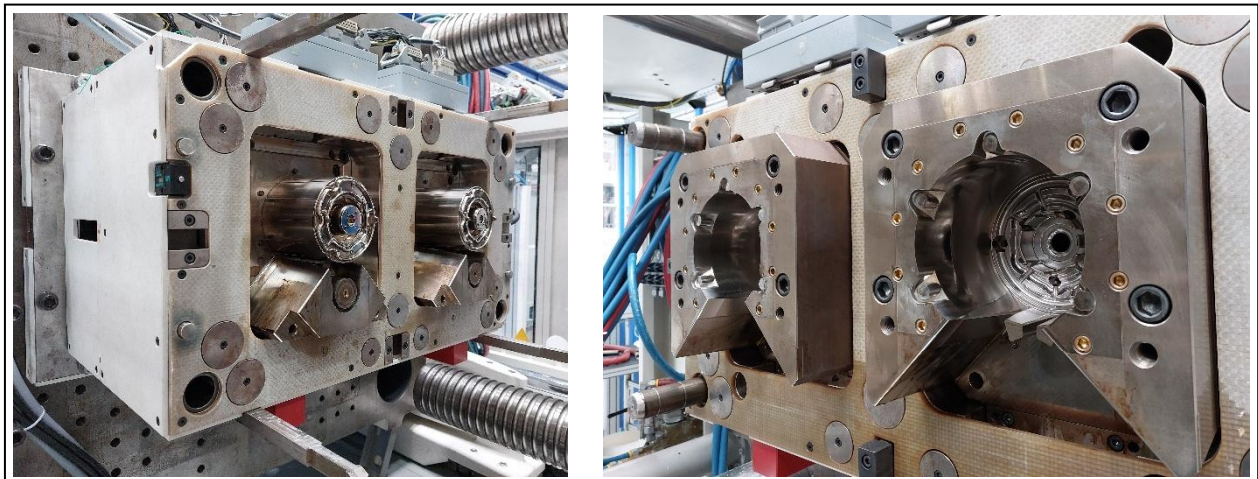


Abbildung 59: Demonstrator-Werkzeug (Auswerfer- und Düsenseite) (Quelle: GHD, KraussMaffei,)

Zwei separate Stromverteilerkästen wurden wegen der hohen Anschlussleistungen der Technotrans-Temperiergeräte und des Heizungsschranks neben der Spritzgießmaschine installiert. Durch diese Vorbereitung bestand dann auch die Möglichkeit, parallel separate Energiemessungen für Werkzeugheizung, Maschine und Temperiergeräte durchzuführen.

Vorbereitung der Pilotzelle für die Versuche zur Kavitätsbalancierung

Die Pilotanlage für das Gehäuse der Elektromotor-Getriebe-Einheit wurde inklusive der Komponenten für die Kavitätsbalancierung aufgebaut und in Betrieb genommen. Dazu gehörte auch die Bereitstellung der beiden Hochtemperatur-Wasser-Temperiergeräte durch Technotrans. Auch ohne Balancierung wurden sie für die Beheizung des Angussverteilers benötigt.



Abbildung 60: Peripherie für die Kavitätsbalancierung (Quelle: Technotrans, KraussMaffei)

Seitens Technotrans war der Typ „teco wh 90.1“ ausgewählt und geliefert worden. Bis 200°C Vorlauftemperatur mit 18 kW Heizleistung war wegen der Kavitätsbalancierung ausgelegt worden. Da die Werkzeug-Temperatur 180°C betrug, wurde diese Regelreserve benötigt.

Die beiden Technotrans-Temperiergeräte für die Kavitätsbalancierung (1x je Kavität) wurden verschlaucht und an die Angussverteilereinsätze im Werkzeug angeschlossen. Die beiden Temperaturfühler in den Einsätzen wurden an die Technotrans-Temperiergeräte angeschlossen und getestet. Beide Temperiergeräte wurden zusammen mit Technotrans in Betrieb genommen.

Aufbau Regelkreis für die Kavitätsbalancierung

Bei der Pilotanlage für das Elektromotorgehäuse wurde der in AP 3.1 und AP 3.2 entwickelte, automatische Regelkreis von Fraunhofer ICT, Technotrans, KraussMaffei und KIT-FAST umgesetzt und getestet (siehe Abbildung 61).

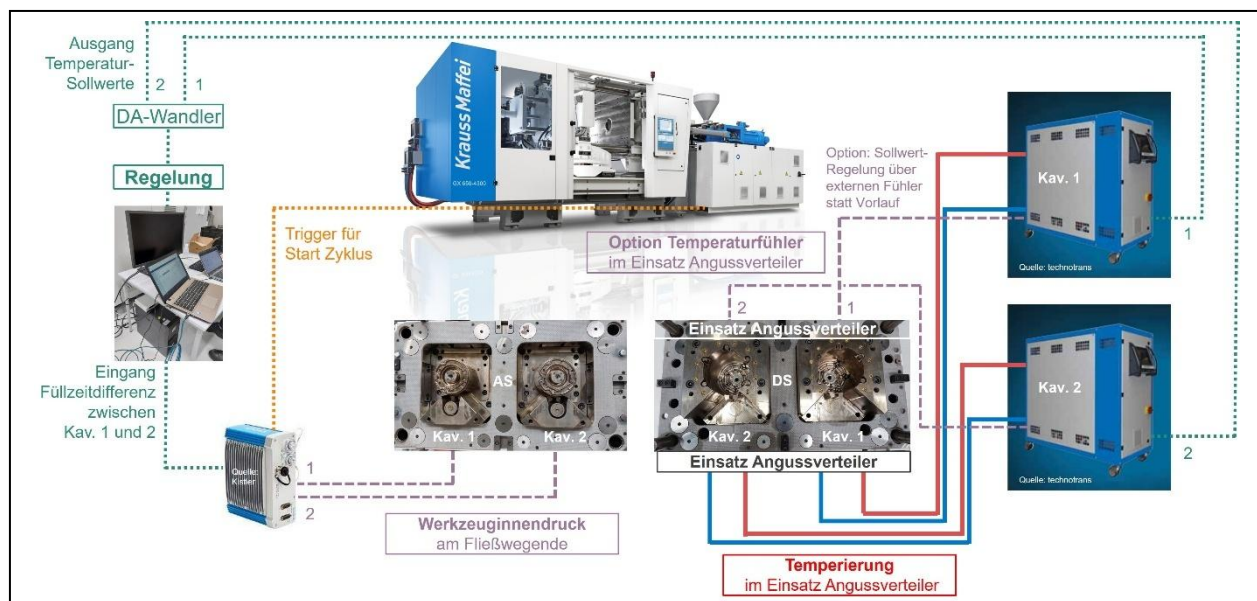


Abbildung 61: Aufbau Regelkreis für die Kavitätsbalancierung (Quelle: KraussMaffei, Fraunhofer ICT)

Die Regelungs-Hardware und Sensorik für die Kavitätsbalancierung wurde zusammen mit dem Fraunhofer ICT aufgebaut bzw. eingerichtet. Dazu gehörte der Reglerrechner mit DA-Wandler vom KIT-FAST und ein Kistler-ComoNeo vom Fraunhofer ICT. Die Werkzeuginnendruck-Sensoren am Fließwegende der Kavitäten und die

Signalverbindungen zu den Technotrans-Temperiergeräten, ComoNeo und Spritzgießmaschine wurden verdrahtet und getestet.

Durchführung der Abmusterungen und Prozessoptimierung

Ziel war die Abmusterung des Demonstrator-Werkzeugs auf der Pilotanlage und die Optimierung des Prozesses.

- Durchführung der Abmusterung und Versuche im Spritzgießtechnikum von KraussMaffei mit den Projektpartnern
- Es wurden drei Abmusterungsschleifen mit jeweiliger Werkzeugüberarbeitung bei GHD benötigt, bis der Prozess störungsfrei lief.
- Anschließend wurde der Prozess, so weit möglich, bei der dritten Schleife optimiert und es wurden die Versuche hinsichtlich der Arbeitspakete Bilanzierung (AP 5.4), Rezyklat-Zumischung (Validierung AP 4.1) und Kavitätsbalancierung (Validierung AP 3.2) durchgeführt (siehe Kapitel 2.1.5.6).
- Am Ende wurde nochmals hinsichtlich Qualität optimiert und Musterteile hergestellt.

Das Demonstrator-Material Vyncolit® X7530 von Sumitomo Bakelite wurde im Vorfeld bestellt und geliefert. Ferner wurde Rezyklat aus X7530 vom Fraunhofer ICT bereit gestellt. Eine Versuchs- und Terminplanung wurde im Vorfeld abgestimmt.

Der Zugang zum Bereich des Angussverteilers war mechanisch eingeschränkt (rel. geringer Öffnungshub der 3. Platte). Dadurch war ein Automatikbetrieb mit Roboterentnahme nicht möglich.

Abmusterung des Werkzeugs

Die Abmusterung des Werkzeugs bzw. der Bauteile erfolgte zusammen mit dem Fraunhofer ICT und GHD an drei Abmusterungsterminen, die jeweils von zwei Korrekturschleifen für die Werkzeugüberarbeitung bei GHD getrennt waren. Die Hauptprobleme bei den Abmusterungen waren bezüglich des Prozesses die unzureichende Füllung durch grenzwertigen Spritzdruck und Entformungsprobleme (d.h. Bauteile blieben z.B. anfangs in der Düsenseite hängen).

Deshalb wurde der grenzwertige Spritzdruckbedarf u.a. durch Vergrößerung der Anschnitte bzw. Stangenangüsse reduziert. Alle Zyklen waren vor der Modifikation sofort in der Spritzdruckbegrenzung und die Bauteile waren nicht voll. Eine einwandfreie Entformung wurde durch die Überarbeitung des Werkzeugs ebenso erreicht. Anschließend konnte der Prozess final optimiert werden.

Prozessoptimierung

Seitens KraussMaffei und Fraunhofer ICT wurde final ein Prozess gefunden, bei dem akzeptable Bauteile störungsfrei hergestellt werden konnten. Die im Vorfeld vom Fraunhofer ICT definierten Qualitätsmerkmale und Anforderungen wurden erfolgreich umgesetzt. Der Füllvorgang war nach der Vergrößerung der Stangenangüsse und Angussbuchse nicht mehr in der Spritzdruckbegrenzung.

Es wurde ein Prozess ohne Störungen und mit ausreichender Qualität gefunden.



Abbildung 62: gespritzte Bauteile (Quelle: KraussMaffei)

Der Angussverteiler wurde entgegen der Befürchtungen im Vorfeld auch nach der Vergrößerung der Stangenan-
güsse bzw. der Anschnitte einwandfrei von diesen abgerissen.



Abbildung 63: Angussverteiler (3-Platten-Werkzeug) (Quelle: KraussMaffei)

Besonderheit beim Anfahren

Wegen des grenzwertigen Spritzdrucks war es notwendig, eine Anfahrprozedur hinsichtlich des Plastifizierens bei den ersten Zyklen zu entwickeln und zu verwenden (z.B. höherer Staudruck und höhere Temperaturen der vorderen Temperierzonen, besonders der Düse).

Zum Anfahren war es also erforderlich, die Düsentemperatur und den Staudruck zu erhöhen. Nach einiger Zeit erhöhte sich die Massetemperatur (gemessen beim Ausspritzen ins Freie), sodass der Staudruck und die vordere Düsentemperatur reduziert werden mussten.

Herstellung von Musterteilen

Nach der Prozessoptimierung wurden Musterteile hergestellt.

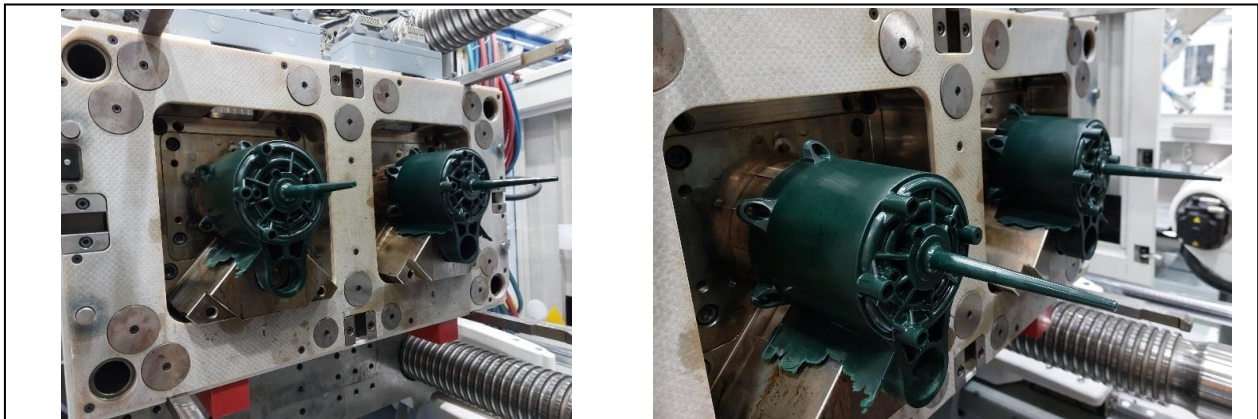


Abbildung 64: Bauteile im Werkzeug (Quelle: KraussMaffei)

2.1.5.6 Versuche auf der Pilotanlage Elektromotorgehäuse bezüglich anderer Arbeitspakete

Es wurden auf der Pilotanlage Versuche hinsichtlich der Arbeitspakete Bilanzierung (AP 5.4), Rezyklat-Zumischung (Validierung AP 4.1) und Kavitätsbalancierung (Validierung AP 3.2) durchgeführt.

Energiemessungen

Für die Bilanzierung (AP 5.4) wurden Energiemessungen an der Pilotzelle vorgenommen. Dabei wurden die Temperiergeräte für die Kavitätsbalancierung, die elektrische Werkzeugheizung, die Temperiergeräte für die Plastifizierung und die Spritzgießmaschine separat und parallel zueinander gemessen (siehe Abbildung 65).

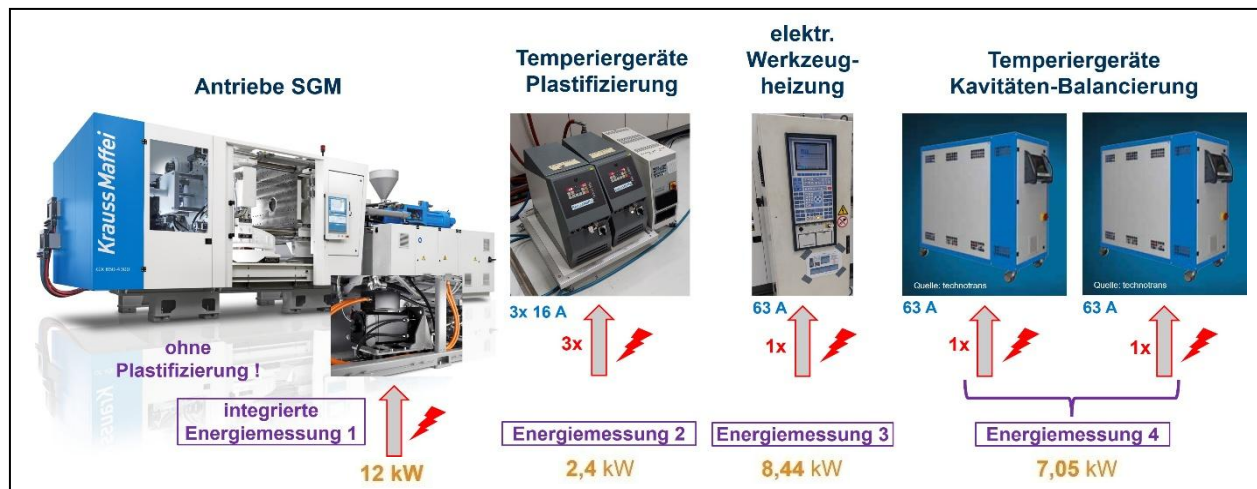


Abbildung 65: Ergebnisse der Energiemessungen (Quelle: KraussMaffei)

mittlere Leistungsaufnahmen der Gesamtanlage:

- ohne Kavitätsbalancierung ca. 22,85 kW
- mit Kavitätsbalancierung ca. 29,90 kW

spezifischer Energieverbrauch mit Kavitätsbalancierung bei einem Schussgewicht von 2,2 kg: 0,6606 kWh/kg

Versuche zur Kavitätsbalancierung

Die Funktionsweise der Regelung wurde verifiziert und der vom KIT-FAST entwickelte Regelalgorithmus überprüft. Dazu lief der Regler während der Zyklen mit.

Zum Testen wurden verschiedene Soll-Temperaturen an den Temperiergeräten für den Angussverteiler-Einsatz und damit verschiedene Temperaturunterschiede zwischen den Kavitäten eingestellt. Dabei wurden die mittels der Werkzeuginnendruckensensoren ermittelten Füllzeitdifferenzen verglichen und so der Einfluss auf den Füllvorgang beobachtet. Es wurde auch die Einspritzgeschwindigkeit variiert. Details sind in Kapitel 2.1.3.4 beschrieben.

Simulative Überprüfung von Prozess und Rezyklat-Zumischung

Im Vorfeld wurden für das Elektromotorgehäuse initiale Simulationsstudien durchgeführt, um die groben Prozessabhängigkeiten und das Prozessfenster zu identifizieren (AP 5.3). Weiterhin wurde untersucht, welche Rezyklatanteile (AP 4) auf Basis der initialen Prozessparameter zu einer vollständigen Füllung führen können.

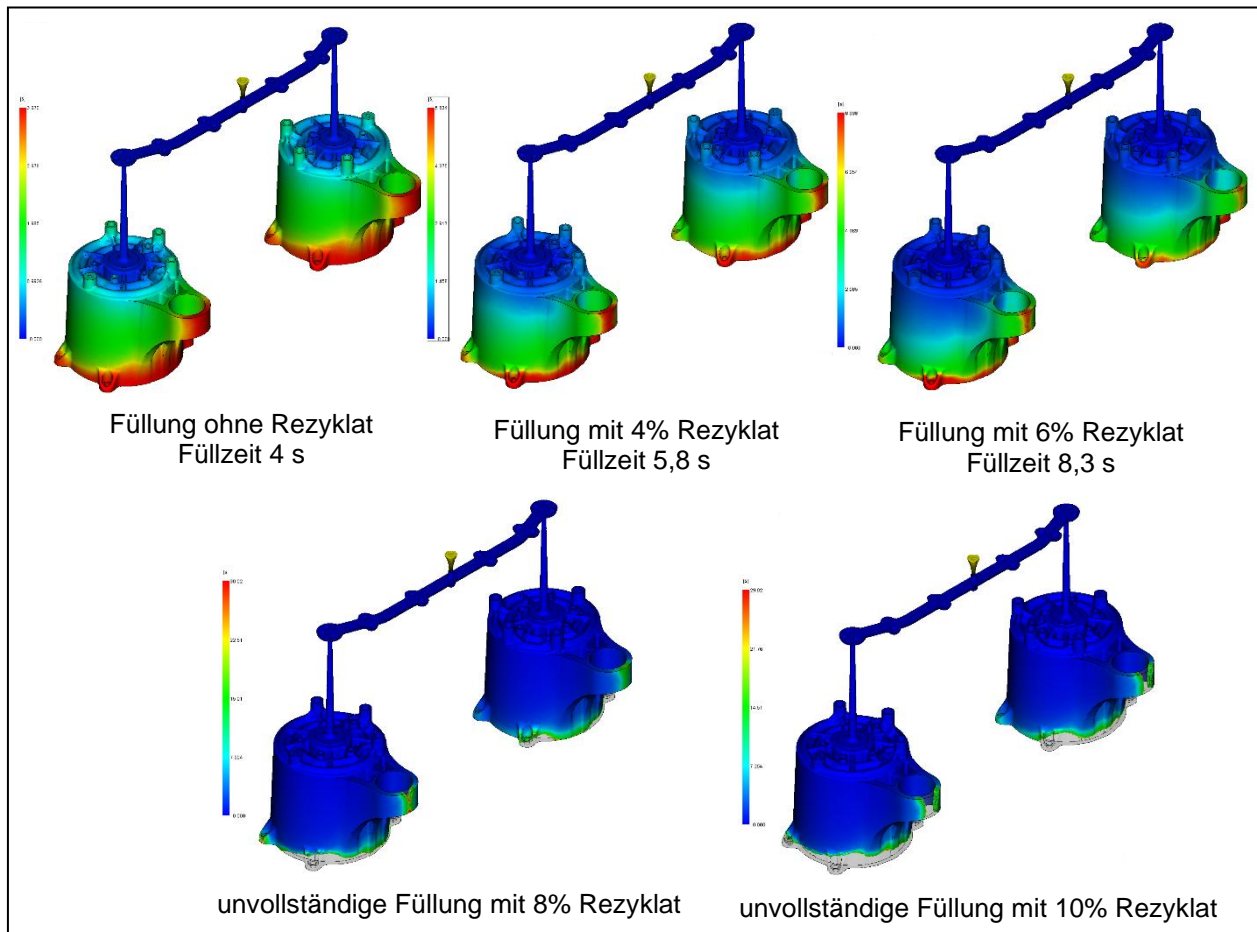


Abbildung 66: Virtuelle Studie zur Füllbarkeit in Abhängigkeit vom Rezyklatanteil (Quelle: Simutence)

In allen Fällen wurde in der Simulation der maximale Einspritzdruck erreicht. Das Rezyklat führt zu einer höheren Viskosität und somit auch abhängig vom Anteil zu einem höheren erforderlichen Einspritzdruck (siehe Abbildung 67).

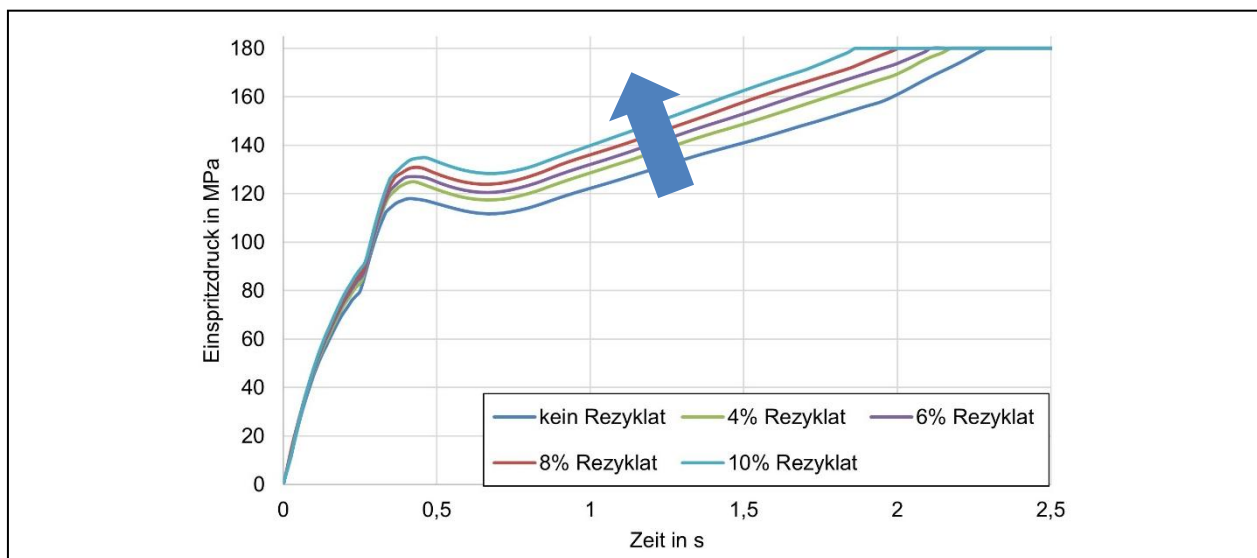


Abbildung 67: Simulierte Spritzdruckbedarfe in Abhängigkeit vom Rezyklatanteil (Quelle: Simutence)

In dieser Vorstudie wurde festgestellt, dass eine vollständige Füllung mit 6% Rezyklatanteil noch möglich sein sollte. Dieser Anteil konnte jedoch im realen Prozess nicht erreicht werden (siehe unten). Dies konnte in einer nachträglichen Untersuchung auf den Druckverlust am Anguss zurückgeführt werden. Auf Basis der Erfahrungen bei der Abmusterung konnten die entsprechenden Simulationen mit dem korrigierten maximalen Einspritzdruck wiederholt werden und gute Übereinstimmungen erzielt werden.

Versuche zur Rezyklat-Zumischung (Validierung AP 4)

Das Rezyklat-Mahlgut wurde im Vorfeld beim Fraunhofer ICT auch aus X7530 hergestellt (< 250 µm) und mittels eines Taumelmischers der Neuware beigemischt.

In einem ersten Versuch wurde 4% Rezyklatanteil der Neuware hinzugefügt. Wegen des durch das Rezyklat erhöhten Spritzdrucks konnten keine guten Bauteile mit 4% Rezyklat hergestellt werden (unvollständige Füllung aufgrund der Spritzdruckbegrenzung). Anschließend wurde der Anteil auf 2% reduziert. Bei 2% konnten akzeptable Bauteile gefertigt werden.

2.1.6 Ganzheitliche Bilanzierungen

Basierend auf den Erkenntnissen der Demonstrator-Abmusterungen und Spritzgießversuche wurden die ganzheitlichen Bilanzierungen durchgeführt.

Zur Durchführung der ganzheitlichen Bilanzierung, auch als Ökobilanz bzw. im englischen Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet, in Anlehnung an die Normenreihe DIN EN ISO 14040 [31] und DIN EN ISO 14044 [32] werden die Ergebnisse der beiden Produktinnovationen anhand der vier Ökobilanzphasen definiert:

1. Ziel und Untersuchungsrahmen
2. Sachbilanz
3. Wirkungsabschätzung
4. Auswertung der Ergebnisse

Im Anschluss werden Schlussfolgerungen abgeleitet sowie Handlungsempfehlungen angelehnt an die Ergebnisse gegeben.

Die zu untersuchenden Produktsysteme sind der Transponder sowie die Elektromotor-Getriebe-Einheit (EMG), die jeweils mit dem Stand der Technik verglichen werden. Im Laufe des Projekts wurden Untersuchungen des Recyclings anhand eines Ölpumpenstellrings in der Serienproduktion bei Baumgarten durchgeführt und diese veröffentlicht [24] und sind Bestandteil von AP 4.2.

Das Ziel der Studie war es einerseits, das mögliche Ressourcen- und Treibhausgaseinsparpotential für die im Projektvorhaben angestrebten Prozess- und Produktinnovationen entlang des vollständigen Lebenszyklus, von der Herstellung, über die Nutzung, bis hin zum Lebensende zu bewerten. Hierfür wurden mit einem Transponder und einer Elektromotor-Getriebe-Einheit zwei Demonstratoren ausgewählt, die mit dem jeweiligen anzunehmenden Stand der Technik verglichen wurden. Andererseits sollten durch eine entwicklungsbegleitende Bewertung im Zuge des Projektvorhabens mögliche (weitere) Verbesserungspotentiale wie der Einfluss von Rezyklat-Zumischung identifiziert werden.

Vom Fraunhofer ICT wurde in einer ganzheitlichen Bilanzierung der Prozess- und Produktinnovationen eine Quantifizierung der erreichten Ressourcen-, Gewichts- und Treibhauseinsparungen durchgeführt. Dazu stellten die Projektpartner Daten und z.B. Ergebnisse der Energiemessungen bereit.

In AP 4.2 und AP 5.4 wurden die nachfolgenden Inhalte erarbeitet:

- Aufnahme von Stoff- und Energieströmen – sowohl basierend auf Primär-, als auch (falls erforderlich) auf Sekundärdaten – entlang des Lebenswegs in Bezug auf das jeweilige Produktsystem und die funktionelle Einheit
- Quantitative Bewertung des mit den angestrebten Prozess- und Produktinnovationen einhergehenden Ressourcen- und Treibhausgaseinsparpotentials
- Auswertung der Ergebnisse inklusive Benchmark mit dem anzunehmenden Stand der Technik und Ableitung möglicher Verbesserungsmaßnahmen (falls gegeben)

2.1.6.1 Ganzheitliche Bilanzierung – direkte Rückführung (AP 4.2) Stelling für eine Pendelschieber-Ölpumpe

Anhand des Bauteils für einen Ölpumpenstellring bzw. -schieber (siehe Kapitel 2.1.4.4 in AP 4.1) wurde die Prozessinnovation „Rezyklat-Zumischung / direkte Rückführung“ ganzheitlich bilanziert (siehe [24]).

Das Produktsystem umfasst hierbei den vollständigen Lebenszyklus, einschließlich Herstellung, Nutzung und Lebensende. Die funktionelle Einheit bezieht sich auf den Einsatz eines Stellrings in einer geregelten Pendelschieber-Ölpumpe über eine zu erwartende Lebensdauer von 10 Jahren bzw. 200.000 km im PKW. Die Modellierung und Berechnung der Studie erfolgte mit Hilfe der Software LCA-for-Experts (LCA-FE) und den Datenbanken von Sphera und Ecoinvent. Die Stoff- und Energieströme für die Bereitstellung des Rezyklats sowie die direkte Rückführung in den Spritzgießprozess wurden vom Fraunhofer ICT und Baumgarten ermittelt. Die Wirkungsabschätzung erfolgte anhand des Indikators Treibhauspotential GWP 100 [33], gemessen in Kilogramm Kohlenstoffdioxid Äquivalente (kg CO₂ eq.), gemäß der Methode Environmental Footprint 3.0 [34].

Es wurde entsprechend dem definierten Ziel- und Untersuchungsrahmen eine konsistente Datenerfassung sichergestellt.

Ziel und Untersuchungsrahmen: Systemgrenzen

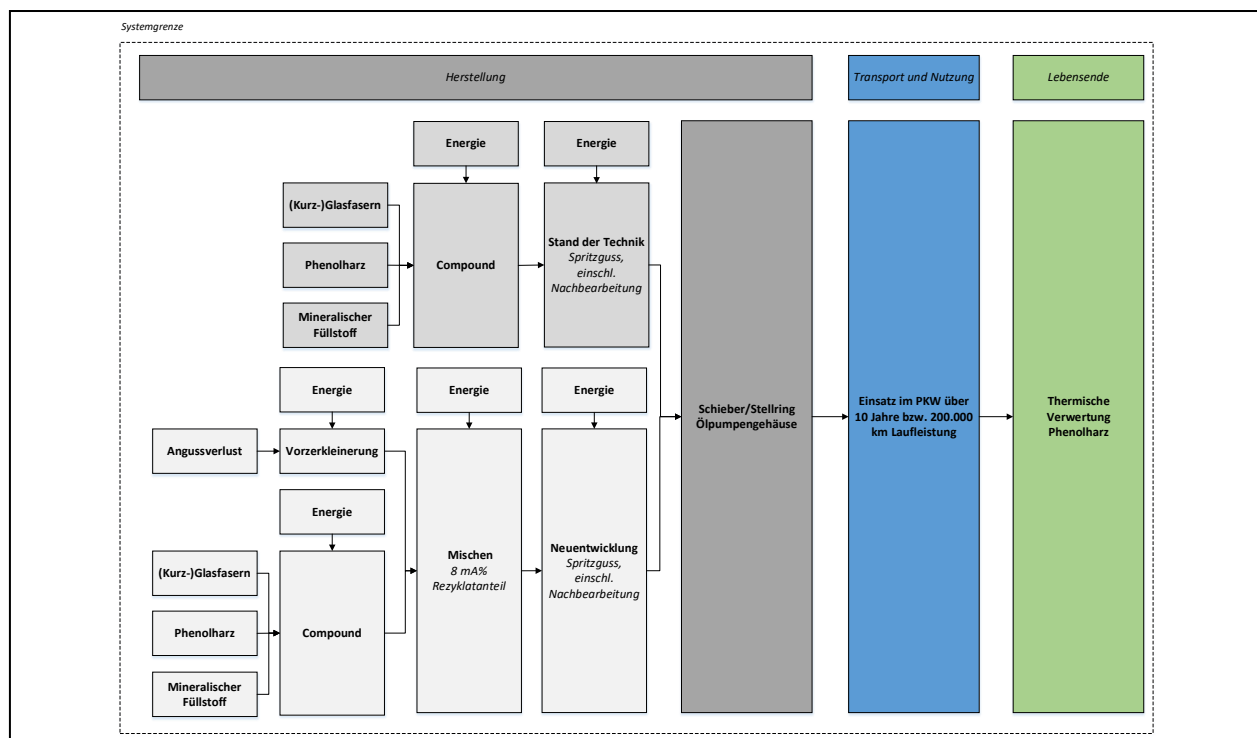


Abbildung 68: Ölpumpenstellring – Ziel und Untersuchungsrahmen: Systemgrenzen (Quelle: Fraunhofer ICT)

Beitragsanalyse: „EF 3.0 Climate Change“ Anteile

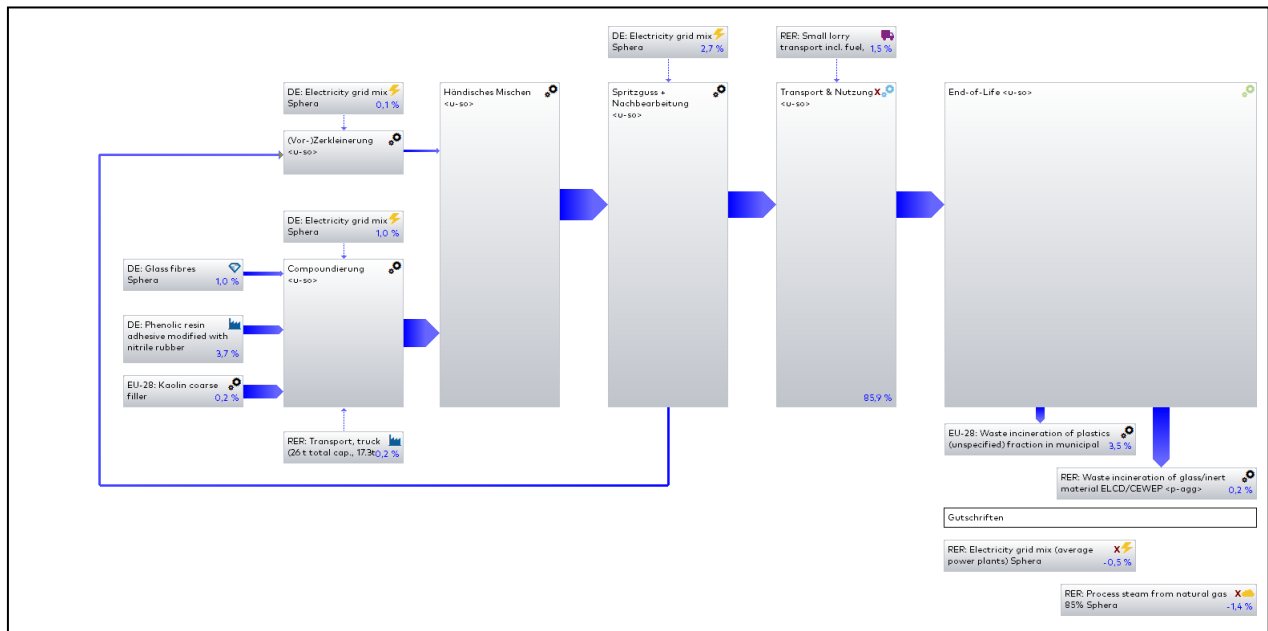


Abbildung 69: Ölpumpenstellring – Beitragsanalyse: „EF 3.0 Climate Change“ Anteile (Quelle: Fraunhofer ICT)

Die LCI-Modellierung (Life Cycle Inventory = Lebenszyklusinventur oder Sachbilanz genannt) erfolgte mittels der Software LCA-FE (siehe Abbildung 69).

LCA-Studie und Life Cycle Gap Analyse (LCGA)

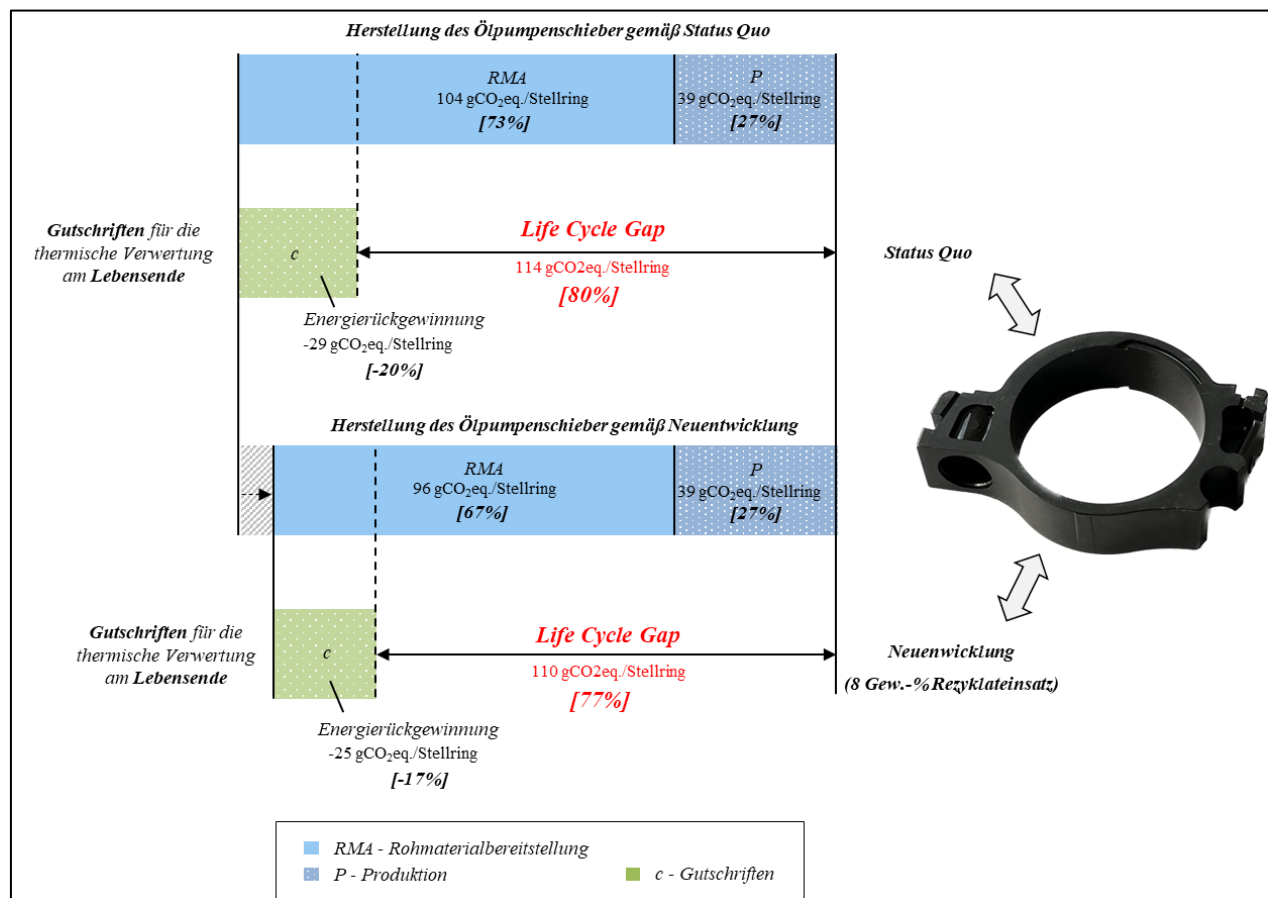


Abbildung 70: Ölpumpenstellring – Life Cycle Gap Analyse (Quelle: Fraunhofer ICT, Baumgarten)

Die LCA-Studie ergab entsprechend dem Treibhauspotential GWP 100 eine Reduktion pro Stelling von ca. 11 g CO₂ eq. bei Nutzung von 8% Rezyklat. Aus Sicht der Lebenszyklusanalyse zeigten die Ergebnisse, dass sich die Treibhausgasemissionen durch das Recycling um ca. 1% der Gesamtemissionen reduzieren lassen. Basierend auf einer jährlichen Produktionsmenge bei Baumgarten von ca. 2,4 Millionen Stück entspricht dies einem Gesamtreduktionspotential von ca. 26 t CO₂ eq..

Zur Ermittlung des Ressourceneinsparpotentials im Sinne einer verbesserten Kreislaufführung fand zusätzlich die Life Cycle Gap Analyse (LCGA) [35] ihre Anwendung (siehe Abbildung 70). Basierend auf einem effektiven Vergleich der Aufwände bzw. Umweltwirkungen gemäß der CO₂ eq.-Emissionen in der Herstellung des Stellings und den Gutschriften, die sich durch die thermische Verwertung am Lebenswegende ergeben, zeigten die Ergebnisse, dass sich die Lücke im Kreislauf durch das Recycling um ca. 3%-Punkte, von ursprünglich 80%, auf nunmehr 77% reduzieren lässt. Damit leistet die Rückführung der ausgehärteten, duromeren Formmasse aus Angussverteilern sowie aus Anfahr- und Ausschussbauteilen einen positiven Beitrag zur Kreislaufführung und Zirkularität im Sinne der Ressourceneinsparung.

2.1.6.2 Ganzheitliche Bilanzierung der Ressourcen- und CO₂-Einsparungen (AP 5.4)

Anhand der Demonstratorbauteile Transponder und Elektromotor-Getriebe-Einheit wurden die Produktinnovationen ganzheitlich bilanziert.

Die Software LCA-for-Experts (Vers. 10) wurde für die Modellierung der Sachbilanz verwendet. Als Datengrundlage dienten primäre aufgenommene Daten sowie sekundäre Daten von den verfügbaren Datenbanken Sphera (Vers. 2024.1) und Ecoinvent (Vers. 3.7.1 + 3.10).

Methodisch folgt die Studie den Ökobilanz-Normen und verwendet, um eine Allokation zu umgehen, die Systemraumerweiterungsmethode unter dem Einsatz von Gutschriften für Koppelprodukte oder Verwertungsverfahren [33]. Geografischer Fokus ist Deutschland, da hier als Annahme die Herstellung der zwei Produktsysteme Transponder und Elektromotor-Getriebe-Einheit stattfindet. Deshalb werden bevorzugt deutsche Datensätze ausgewählt, wie zum Beispiel der deutsche Energie-Strommix. Weitere Infos zur Auswahl der Datensätze finden sich in den Tabellen der Sachbilanzen wieder.

Für die Quantifizierung der potenziellen Umweltwirkungen wurde eine Auswahl an Wirkungskategorien (Tabelle 1) unter Berücksichtigung des Gesamtziels des Vorhabens getroffen. Mit dem Treibhauseffekt, der Wassernutzung und dem primären Energiebedarf können hier drei Wirkungskategorien als zentral angesehen werden. Die abschließende Charakterisierung der Wirkungsindikatoren für das Treibhauspotential und die Wassernutzung erfolgt nach der allgemein anerkannten Methode Environmental Footprint 3.1 (EF 3.1) [34].

| Wirkungsindikator | Einheit | Methode |
|---|--------------------------|----------------------------|
| Treibhauspotential GWP 100 | kg CO ₂ eq. | EF 3.1 – Climate Change |
| Wassernutzung | m ³ world eq. | EF 3.1 – Water use |
| Primärer Energiebedarf von erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Ressourcen | MJ (Heizwert) | kumulativer Energieaufwand |

Tabelle 1: Auswahl der relevanten Wirkungskategorien (Quelle: Fraunhofer ICT)

Zum besseren Verständnis werden im Nachfolgenden die ausgewählten Umweltwirkungskategorien näher erläutert.

Treibhauspotential GWP 100 (kg CO₂ eq.)

Unter dem Treibhauspotential (engl. „Global Warming Potential“) kann in der Klimadiskussion der zusätzliche anthropogene (durch menschliches Handeln verursachte) Treibhauseffekt verstanden werden. Er beschreibt die Emissionen (Freisetzung von Schadstoffen), welche zu einer Zunahme der Wärmeabsorption der Sonnenstrahlung in der Atmosphäre führen und dadurch zu einer Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur beitragen können. GWP 100 steht dabei für das Potential der globalen Erwärmung über einen Zeithorizont von 100 Jahren. Die Referenzsubstanz für das Treibhauspotential ist Kohlenstoffdioxid (CO₂), zu dem alle anderen wirksamen Substanzen wie bspw. Wasserdampf (H₂O) oder Methan (CH₄) ins Verhältnis gesetzt werden [33].

Wassernutzung

Der Wassernutzungsindikator beschreibt die Wasserentnahme unter Berücksichtigung lokaler Frischwasser-Ressourcen. Es bewertet also die lokale Knappheit an Wasser und drückt diese in dem Wert der Wassernutzung aus in m³ Wasser Welt Äquivalenten. Die Methode basiert auf der AWARE-Methodik („assessing impacts of water consumption based on available water remaining“) [36].

Primärer Energiebedarf (PED)

Der primäre Energiebedarf ist die berechnete, primäre Energiemenge, die direkt aus der Biosphäre, z.B. der Sonne bei Photovoltaik oder Wind durch Windkraftanlagen, oder aus den Energiemengen (Heizwerte) der jeweiligen fossilen Rohstoffe für die Energiebereitstellung, z.B. von Kohle, kommen. Der PED, im Deutschen auch als kumulativer Energieaufwand (KEA) bekannt, ist ein Indikator zur Bewertung der mit den Rohstoffen verbundenen energetischen Ressourcenverbrauch. Durch die unterschiedlichen Effizienzen bei der Stromherstellung kann es hierbei zu einem Unterschied zwischen den erneuerbaren und nicht-erneuerbaren, primären Energiebedarf kommen [37]. Diese Unterscheidung ist für die Nutzungsphase des Elektromotors von Bedeutung.

Basierend auf dem eingangs definierten Ziel- und Untersuchungsrahmen wurden entsprechende Datenerfassungsbögen erstellt und an die relevanten Projektpartner verteilt. Somit lässt sich eine strukturierte Datenerfassung sicherstellen.

2.1.6.3 Ganzheitliche Bilanzierung der Ressourcen- und CO₂-Einsparungen (AP 5.4) Demonstrator Transponder

Die Systemgrenzen für den Transponder sind grafisch in Abbildung 71 dargestellt. Neben der Rohmaterialgewinnung und der Verarbeitung und Herstellung des Transponders wird die Transportphase sowie die Verwertung am Ende des Lebens (engl. end-of-life) betrachtet. Damit ist die Systemgrenze von der Wiege bis zur Bahre (engl. cradle-to-grave) definiert.

Die funktionelle Einheit bezieht sich auf einen bei Sportveranstaltungen im Personen- und Rennsport zur Zeitmessung verwendeten Transponder, der über 5 Jahre genutzt werden kann und in Deutschland hergestellt und verwertet wird.

Ziel und Untersuchungsrahmen: Systemgrenzen

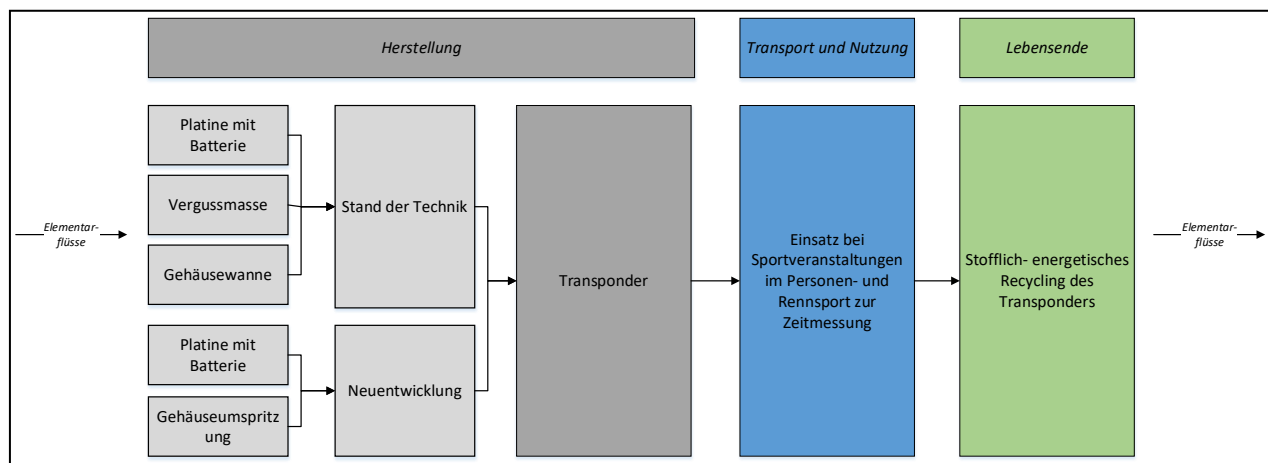


Abbildung 71: Transponder – Ziel und Untersuchungsrahmen: Systemgrenzen (Quelle: Fraunhofer ICT)

Sachbilanz

Basierend auf dem eingangs definierten Ziel und Untersuchungsrahmen wurden Datenerfassungsbögen an die relevanten Projektpartner verteilt. Nachfolgend wird beschrieben, welche Primär- und Sekundärdaten im Rahmen der Studie erfasst wurden, sowie die softwarebasierte Modellierung zur Datenberechnung. Sekundärdaten beziehen sich auf LCA-Datenbank-spezifische Datensätze. Weitere Quellen der Prozesse sind jeweils angegeben.

In der nächsten Tabelle sind die Eingangsdaten der Materialien vom Stand der Technik des Transponders aufgeschlüsselt.

| Eingangsdaten - Transponder Stand der Technik Materialien | | | | | |
|---|--------------------|-------------|----------|---------------|--|
| Komponente | Werkstoff | Menge | Einheit | Datenherkunft | Sekundärdaten |
| Gehäusewanne (Spritzguss) | TPE-U | 4,3 | g | Gemessen | DE: Thermoplastic polyurethane (TPU, TPE-U) adhesive Sphera |
| Kupferantenne | Kupfer | 0,4 | g | Berechnet | GLO: Copper mix (99,999% from electrolysis) Sphera |
| Magnetkern | Materialmix | 1,1 | g | Berechnet | GLO: permanent magnet production, for electric motor ecoinvent 3.7.1 |
| Batterie | Materialmix | 3,2 | g | Gemessen | GLO: market for battery cell, Li-ion ecoinvent 3.7.1 |
| Platine bedruckt | Materialmix | 1,0 | g | Gemessen | GLO: market for printed wiring board, through-hole mounted, unspecified, Pb free ecoinvent 3.7.1 |
| Vergussmasse | Polyurethan (PU) | 4,7 | g | Gemessen | DE: 2-component PUR adhesive based on polyether and castor oil (approximation) Sphera |
| Summe | Transponder | 14,7 | g | | |

Tabelle 2: Eingangsdaten des Transponders: Stand der Technik - Materialien (Quelle: Fraunhofer ICT)

In Tabelle 1 Tabelle 3 sind die Eingangsdaten der Prozesse vom Stand der Technik des Transponders zu finden.

| Eingangsdaten - Transponder Stand der Technik Prozesse | | | | | |
|--|----------------------------------|----------|---------|---------------|---------------------------------|
| Prozess | Bestandteil der Komponente | Menge | Einheit | Datenherkunft | Quelle |
| Spritzgießen | Gehäusewanne | 0,08815 | MJ | Literatur | Ashby et al. 2021 |
| Kupfer Drahtziehen | Kupferantenne | - | - | Literatur | DE: Copper wire (0.6 mm) Sphera |
| Bestückungsvorgang | Transponder Platine mit Batterie | 0,00181 | MJ | Geschätzt | Fraunhofer ICT |
| Vergussprozess | Vergussmasse | 0,000846 | MJ | Berechnet | Fraunhofer ICT |

Tabelle 3: Eingangsdaten des Transponders: Stand der Technik - Prozesse (Quelle: Fraunhofer ICT)

Es folgen in Tabelle 4 die Eingangsdaten der Materialien der Neuentwicklung des Transponders.

| Eingangsdaten - Transponder Neuentwicklung Materialien | | | | | |
|--|--------------------|-------------|----------|---------------|--|
| Komponente | Werkstoff | Menge | Einheit | Datenherkunft | Sekundärdaten |
| Gehäusewanne (Spritzguss) | TPE-U | 4,3 | g | Gemessen | DE: Thermoplastic polyurethane (TPU, TPE-U) adhesive Sphera |
| Kupferantenne | Kupfer | 0,4 | g | Berechnet | GLO: Copper mix (99,999% from electrolysis) Sphera |
| Magnetkern | Materialmix | 1,1 | g | Berechnet | GLO: permanent magnet production, for electric motor ecoinvent 3.7.1 |
| Batterie | Materialmix | 3,2 | g | Gemessen | GLO: market for battery cell, Li-ion ecoinvent 3.7.1 |
| Batterieklemme | Kupfer-Beryllium | 0,026 | g | Berechnet | BR: Copper sheet Sphera |
| Platine bedruckt | Materialmix | 0,87 | g | Gemessen | GLO: market for printed wiring board, through-hole mounted, unspecified, Pb free ecoinvent 3.7.1 |
| Vergussmasse | Epoxid Harz | 2,1 | g | Gemessen | DE: Epoxy Resin (EP) Mix Sphera |
| Deckel | Polyurethan (PU) | 2,0 | g | geschätzt | DE: 2-component PUR adhesive based on polyether and castor oil (approximation) Sphera |
| Summe | Transponder | 14,0 | g | | |

Tabelle 4: Eingangsdaten des Transponders: Neuentwicklung - Materialien (Quelle: Fraunhofer ICT)

In nachfolgender Tabelle 5 sind die Prozesse der Neuentwicklung des Transponders dargestellt.

| Eingangsdaten - Transponder Neuentwicklung Prozesse | | | | | |
|---|----------------------------------|---------|-------|---------------|---------------------------------|
| Prozess | Bestandteil der Komponente | Einheit | Menge | Datenherkunft | Quelle |
| Spritzgießen | Gehäusewanne | 0,08815 | MJ | Literatur | Ashby et al. 2021 |
| Kupfer Drahtziehen | Kupferantenne | - | - | Literatur | DE: Copper wire (0.6 mm) Sphera |
| Bestückungsvorgang | Transponder Platine mit Batterie | 0,00181 | MJ | Geschätzt | Fraunhofer ICT |
| Vergussprozess | Vergussmasse | 0,00038 | MJ | Berechnet | Fraunhofer ICT |
| Vergussprozess | Deckel | 0,0036 | MJ | Berechnet | Fraunhofer ICT |

Tabelle 5: Eingangsdaten des Transponders: Neuentwicklung - Prozesse (Quelle: Fraunhofer ICT)

Für den Transport wurden 1000 km Fahrt für den Transponder angenommen.

Die Recycling-Raten und Verwertungsraten sind in Tabelle 6 aufgeschlüsselt.

| Material | Menge in kg | Recycling-Rate in % | thermische Verwertung in % | Deponierungsrate in % | Quelle |
|--------------|-------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|
| Stahl | 0,0047 | 0% | 100% | 0% | eigene Annahmen |
| Polyurethan | 0,0090 | 0% | 100% | 0% | eigene Annahmen |
| Leiterplatte | 0,0010 | 0% | 100% | 0% | eigene Annahmen |

Tabelle 6: Verwertungswege und Verwertungsanteile vom End-of-life Abfall für den Transponder (Quelle: Fraunhofer ICT)

Für die Verwertung der Transponder für Stand der Technik und Neuentwicklung wurde eine 100%-ige thermische Verwertung angenommen, da es unklar ist, in welchem Land bei weltweiter Nutzung die Produkte verwertet werden. Die Thermische Verwertung verursacht neben den Emissionen auch Wärme und Strom. Für die Wärme wird angenommen, dass Wärme durch Erdgas substituiert wird.

Beitragsanalyse: „EF 3.1 Climate Change“ Anteile Stand der Technik

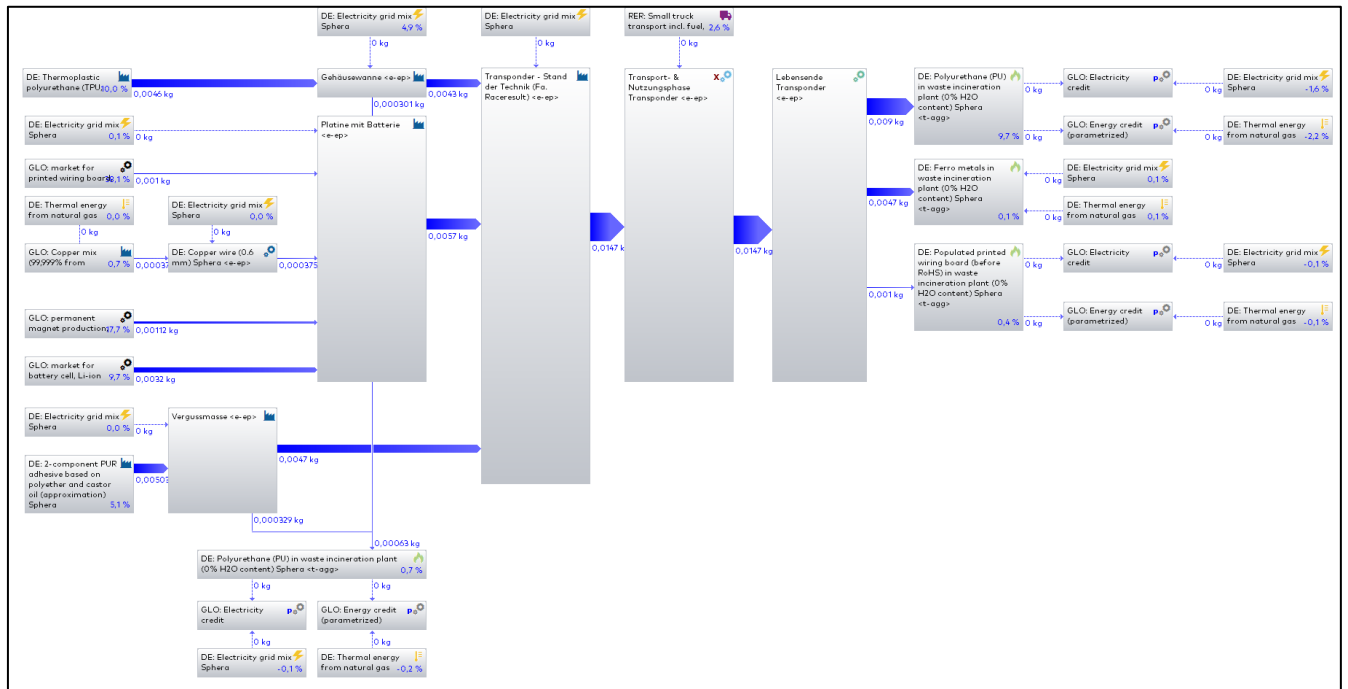


Abbildung 72: Transponder – Stand der Technik: Modellierung und Beitragsanalyse: „EF 3.1 Climate Change“ Anteile (Quelle: Fraunhofer ICT)

Beitragsanalyse: „EF 3.1 Climate Change“ Anteile Neuentwicklung

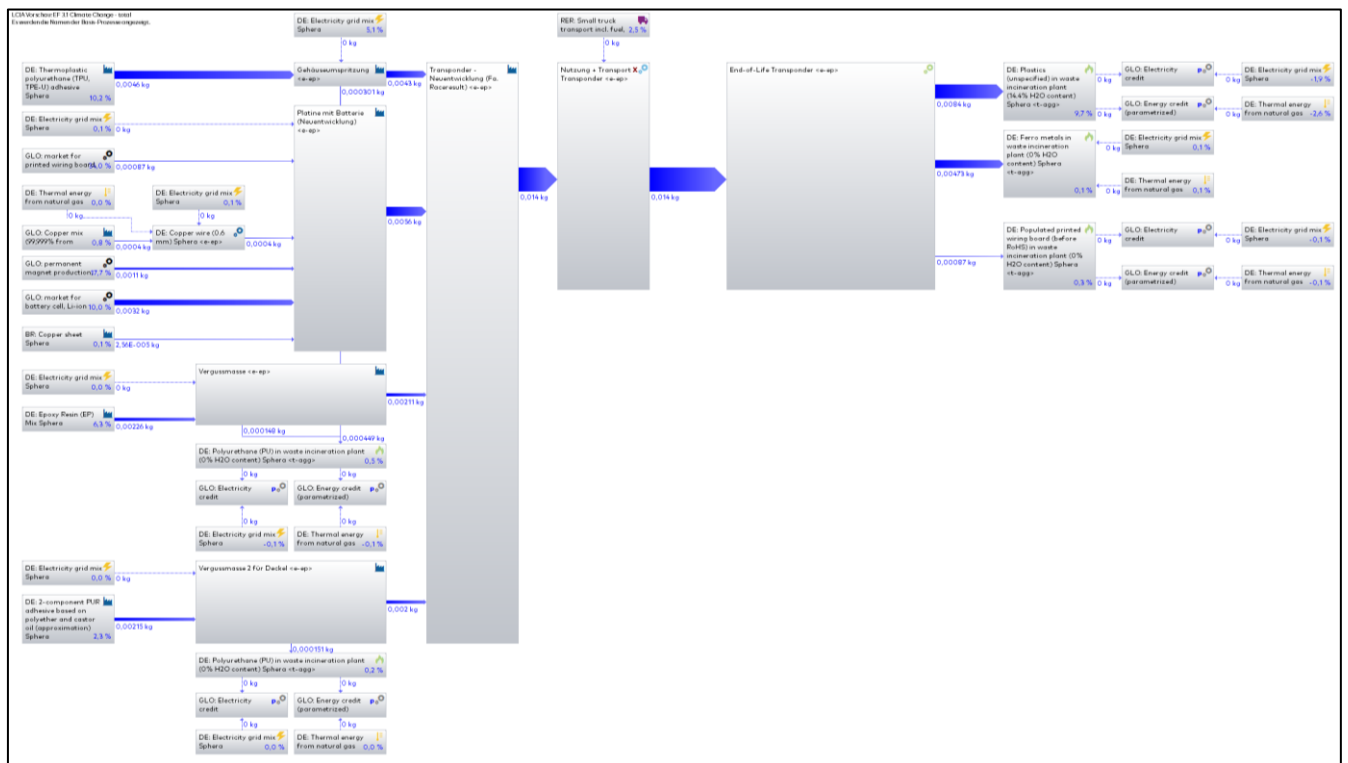


Abbildung 73: Transponder – Neuentwicklung: Modellierung und Beitragsanalyse: „EF 3.1 Climate Change“ Anteile (Quelle: Fraunhofer ICT)

Transponder: Neuentwicklung versus Stand der Technik

Die nachfolgend berechneten Werte beziehen sich auf die in diesem Kapitel definierte funktionelle Einheit.

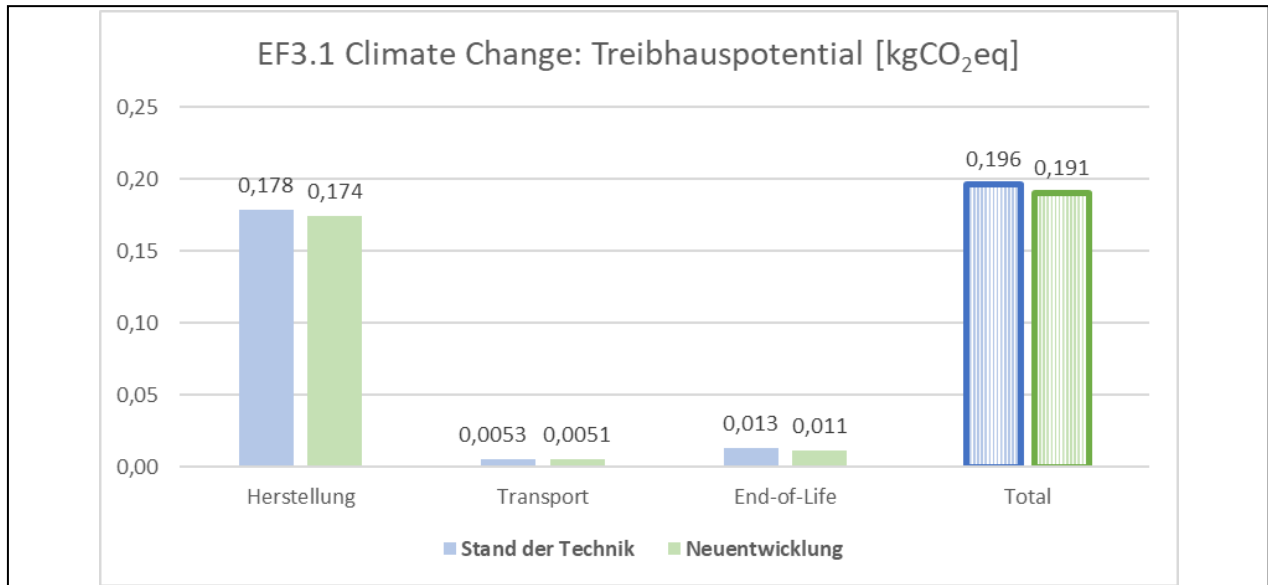


Abbildung 74: Transponder – Stand der Technik vs. Neuentwicklung: Treibhauspotential „EF 3.1 Climate Change“ (Quelle: Fraunhofer ICT)

In Abbildung 74 ist über den Lebenszyklus des Transponders das Treibhauspotential zu sehen. Insgesamt beträgt die CO₂-Reduzierung der Neuentwicklung im Vergleich zum Stand der Technik 3% (ca. 6 g CO₂ eq.). Der größte Beitrag kommt hierbei von der Herstellungsphase des Transponders, wo eine Reduzierung des Gewichts der Leiterplatte zu dem größten Beitrag der CO₂-Reduzierung führt. Das insgesamt kleinere Gewicht macht sich in den Treibhauspotentialen im Transport sowie den Aufwänden in der Verwertung am Lebensende bemerkbar. Etwa 54% der Treibhauspotentiale kommen von den Materialien der Elektronikkomponenten, wobei die Leiterplatte und der Dauermagnet den größten CO₂-Fußabdruck aufweisen. Die Kunststoffkomponenten, Gehäuse und Umspritzungen sind für ca. 20% der Treibhauspotentiale verantwortlich.

In Abbildung 75 sind die Auswirkungen der Wassernutzung über den Lebenszyklus des Transponders zu sehen.

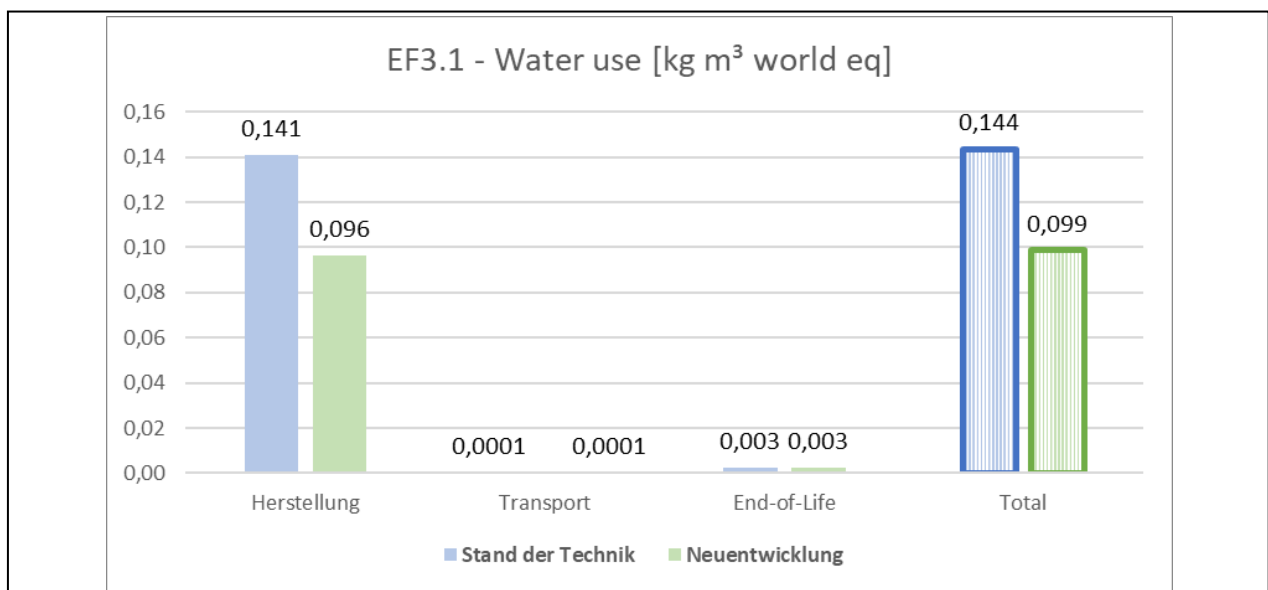


Abbildung 75: Transponder – Stand der Technik vs. Neuentwicklung: Wassernutzung „EF 3.1 Water use“ (Quelle: Fraunhofer ICT)

Insgesamt führt die Neuentwicklung des Transponders zu einer Verbesserung um 31% in der Wassernutzung, was 0,045 m³ world eq. entspricht. Erkennbar ist hierbei ein großer Beitrag von der Herstellungsphase kommend,

der hauptsächlich durch den Datensatz „2-component PUR adhesive based on polyether and castor oil (approximation) Sphera“ entsteht.

In der nächsten Abbildung sind die Ergebnisse des Primärenergiebedarfs zu sehen.

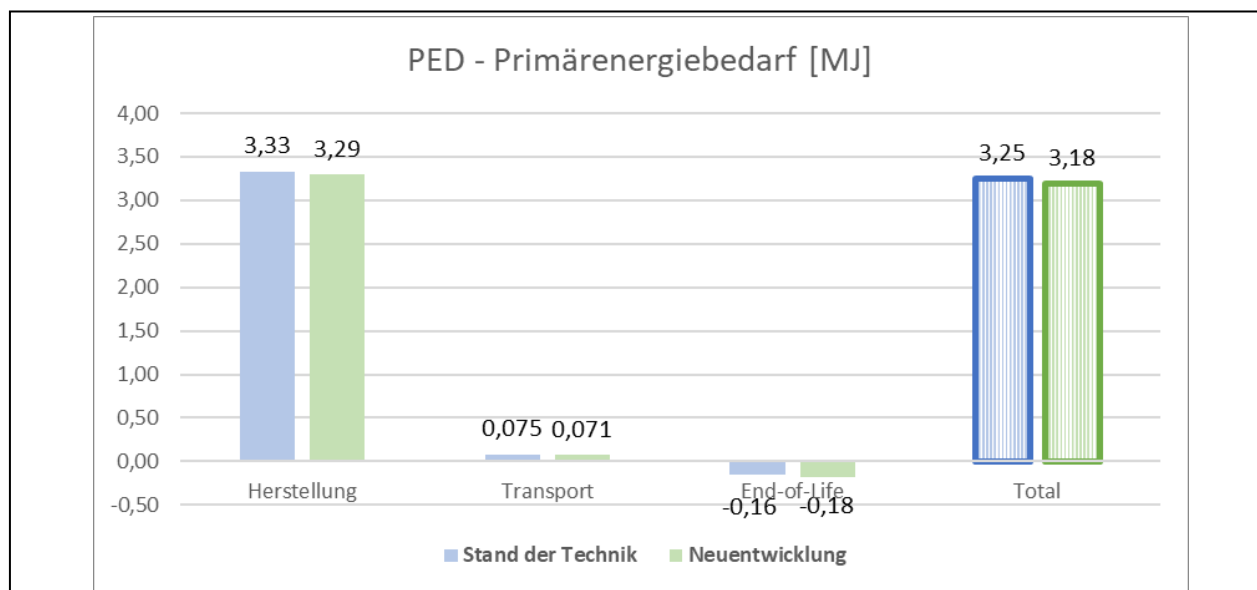


Abbildung 76: Transponder – Stand der Technik vs. Neuentwicklung: Primärenergiebedarf (Quelle: Fraunhofer ICT)

Die Reduzierung des Primärenergieverbrauchs beträgt ca. 2% (0,07 MJ), wobei die größte Reduzierung mit 0,04 MJ von der Herstellungsphase kommt, sowie mit 0,02 MJ von der Verwertung am Ende des Lebens. Der primäre Energiebedarf zeigt am Ende des Lebens als einziger Indikator Gesamtgutschriften auf, weshalb die Ergebnisse negativ sind.

Transponder: Ableitung von Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Anhand der Ergebnisse ist erkennbar, dass die Hot-Spots der Umweltwirkungen von den elektronischen Materialien kommen; jedoch haben die Kunststoffteile des Transponders dennoch ganzheitlich einen relevanten Beitrag von über 20%. Aufgrund des technisch nicht möglichen, gleichzeitigen Umspritzens der Batterie sind zwei Spritzgießprozesse notwendig. Einen für die Platinenumspritzung und einen für den PP-Deckel des Transponders. Eine Wiedernutzung (Re-Use) infolge des überarbeiteten Designs mit wechselbarer Batterie kann die Ergebnisse durch Lebensdauererlängerung hierbei positiv beeinflussen. Wenn der Deckel und die Platine am Ende des Lebens wiederverwendet werden, könnten ca. 80% der Umweltwirkungen für die Neuherstellung des Transponders vermieden werden. Dies bedarf aber einer systematischen Rückführung der Transponder und somit eine geregelte Gewährleistung des Produkts. Dadurch würden wieder mehr Aufwände bei einer potentiellen Demontage und Transport entstehen.

Um die Umweltwirkungen in der Herstellung langfristig zu reduzieren, ist ein Umstieg auf einen erneuerbaren Energiestrommix zu empfehlen, sowie jegliche, anfallende Abfälle zu minimieren. Eine Rückführung und Verwertung der Abfälle z.B. über Wege der Elektro- und Elektronik-Altgeräte Verordnung (Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)) oder ähnliche Sammlungskategorien vor Ort kann potentiell für die elektronischen Bauteile zu einer Verbesserung des Recyclings führen.

2.1.6.4 Ganzheitliche Bilanzierung der Ressourcen- und CO₂-Einsparungen (AP 5.4) Demonstrator Elektromotor-Getriebe-Einheit (EMG)

Ziel und Untersuchungsrahmen: Systemgrenzen

Abbildung 77 veranschaulicht das Produktsystem für die Elektromotor-Getriebe-Einheit mit den gleichen enthaltenden Lebenszyklusphasen wie beim Transponder als cradle-to-grave Systemgrenze. Außerhalb der Systemgrenzen ist die Herstellung des Werkzeugs.

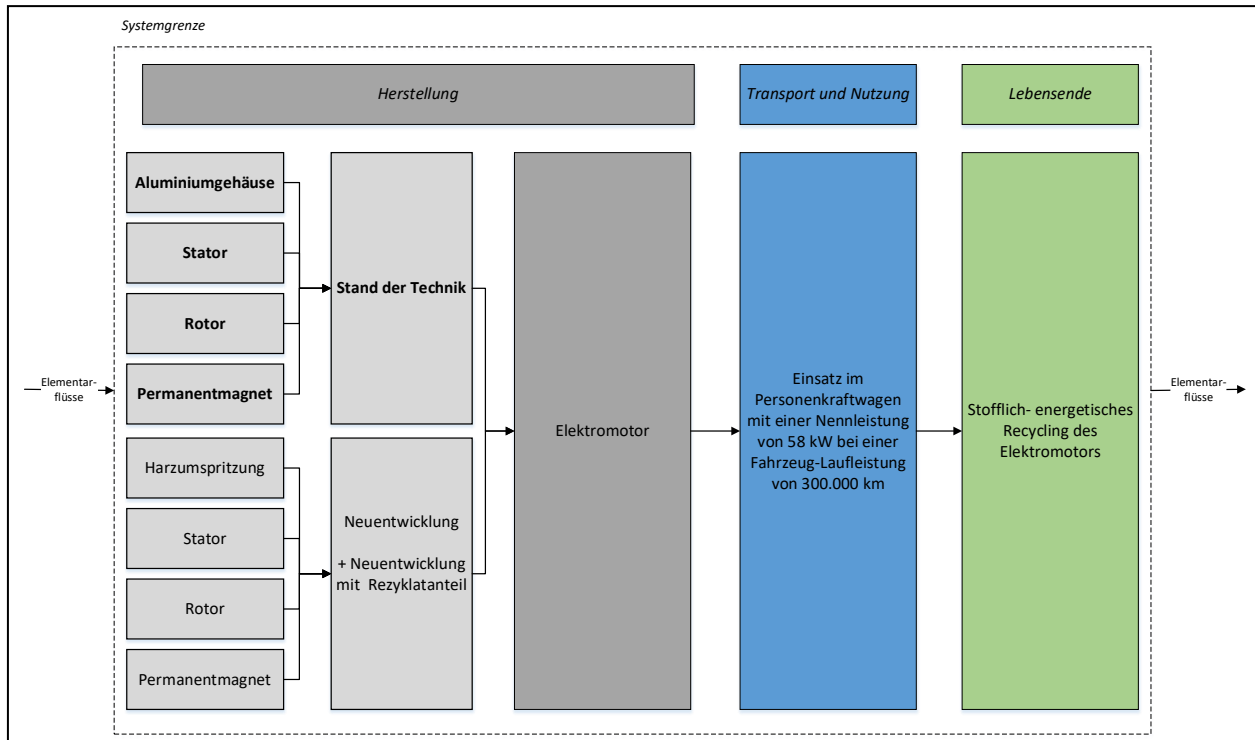


Abbildung 77: EMG – Ziel und Untersuchungsrahmen: Systemgrenzen (Quelle: Fraunhofer ICT)

Die funktionelle Einheit bezieht sich auf einen im Personenkraftwagen verbauten Elektromotor mit einer Nennleistung von 58 kW bei einer Fahrzeug-Laufleistung von 300.000 km. Die konzeptionellen Änderungen der neu entwickelten Elektromotor-Getriebe-Einheit konnten durchgehend auf ihre ökobilanziellen Auswirkungen hin überprüft werden, sodass die Konzeption durchgängig vor diesem Hintergrund reflektiert wurde.

Nun folgen in Tabelle 7 die Eingangsdaten vom Stand der Technik des Elektromotors.

| Eingangsdaten - Stand der Technik (Aluminium 58kW) - Materialien | | | | | |
|--|--|-------------|-----------|---------------|---|
| Komponente | Werkstoff | Menge | Einheit | Datenherkunft | Sekundärdaten |
| Gehäuse | Aluminium | 1,400 | kg | Berechnet | DE: Aluminium extrusion profile mix- primary Sphera |
| Lagerschild | Aluminium | 0,222 | kg | Gemessen | RER: Aluminium sheet mix primary Sphera |
| Statorwicklungen | Kupfer | 2,102 | kg | Berechnet | GLO: Copper mix (99,999% from electrolysis) Sphera |
| Statorblech | Stahl | 5,000 | kg | Berechnet | DE: Steel sheet (EN 15804 A1-A3) Sphera |
| Rotorblech und Rotorwelle | Stahl | 3,550 | kg | Berechnet | GLO:Steel UO pipe world steel |
| Permanentmagnet | Neodym-Eisen-Bor | 0,664 | kg | Berechnet | GLO: market for permanent magnet, for electric motor ecoinvent 3.10 |
| Kleinteile / Sonstiges | Stahl | 0,380 | kg | Geschätzt | DE: Fixing material screws stainless steel (EN15804 A1-A3) Sphera |
| Summe | Elektro Motor Stand der Technik | 13,3 | kg | | |

Tabelle 7: Eingangsdaten des Elektromotors: Stand der Technik - Materialien (Quelle: Fraunhofer ICT)

Anschließend sind dazu die Eingangsdaten der Prozesse in Tabelle 8 dargestellt.

| Eingangsdaten - Stand der Technik (Aluminium 58kW) - Prozesse | | | | | |
|---|----------------------------|-------|---------|---------------|---------------------------------------|
| Prozess | Bestandteil der Komponente | Menge | Einheit | Datenherkunft | Quelle |
| Drehprozess (mechanische B | Gehäuse | - | - | Datenbank | DE: Steel turning (adjustable) Sphera |
| Kupfer Drahtziehen | Statorwicklungen | - | - | Datenbank | DE: Copper wire (0.6 mm) Sphera |

Tabelle 8: Eingangsdaten des Elektromotors: Stand der Technik - Prozesse (Quelle: Fraunhofer ICT)

Für den Transport wurden 1000 km Fahrt für die Elektromotor-Getriebe-Einheit angenommen.

Für die Neuentwicklung der Elektromotor-Getriebe-Einheit befinden sich die Eingangsdaten der Materialien in Tabelle 9.

| Eingangsdaten - Neuentwicklung (Harzumspritzung 58kW) - Materialien | | | | | |
|---|--------------------------------------|-------------|-----------|---------------|--|
| Komponente | Werkstoff | Menge | Einheit | Datenherkunft | Sekundärdaten |
| Gehäuse | Phenolharz gefüllt 55-Gew.% Glas | 1,05 | kg | Berechnet | RER: phenolic resin production ecoinvent 3.10; DE: Glass fibres Sphera |
| Umspritzung | Epoxidharz gefüllt 70-Gew.% Al2O3 | 0,86 | kg | Berechnet | DE: Epoxy Resin (EP) Sphera; RER: Alumina (Al2O3) Sphera |
| Lagerschild | Aluminium | 0,22 | kg | Gemessen | RER: Aluminium sheet mix primary Sphera |
| Statorwicklungen | Kupfer | 1,24 | kg | Berechnet | GLO: Copper mix (99,999% from electrolysis) Sphera |
| Statorblech | Stahl | 3,84 | kg | Berechnet | DE: Steel sheet (EN 15804 A1-A3) Sphera |
| Wickelhilfe Guss | Phenolharz gefüllt 55-Gew.% Glas | 0,025 | kg | Berechnet | BR: Copper sheet Sphera |
| Anschlusscheibe | Kupfer | 0,23 | kg | Berechnet | DE: Epoxy Resin (EP) Mix Sphera |
| Rotorblech und Rotorwelle | Stahl | 2,46 | kg | Berechnet | GLO:Steel UO pipe world steel |
| Permanentmagnet | Neodym-Eisen-Bor | 0,46 | kg | Berechnet | GLO: market for permanent magnet, for electric motor ecoinvent 3.10 |
| Kleinteile / Sonstiges | Stahl | 0,38 | kg | Geschätzt | DE: Fixing material screws stainless steel (EN15804 A1-A3) Sphera |
| Summe | Elektro Motor Getriebeeinheit | 10,8 | kg | | |

Tabelle 9: Eingangsdaten des Elektromotor-Getriebe-Einheit: Neuentwicklung - Materialien (Quelle: Fraunhofer ICT)

Dazu sind die Eingangsdaten der Prozesse in nachfolgender Tabelle 10 aufgelistet.

| Eingangsdaten - Neuentwicklung (Harzumspritzung 58kW) - Prozesse | | | | | |
|--|--|---------|-------|---------------|---------------------------------|
| Prozess | Bestandteil der Komponente | Einheit | Menge | Datenherkunft | Quelle |
| Harzumspritzung | Gehäuse, Umspritzung, Wickelhilfe Guss | MJ/kg | 2,85 | Gemessen | Krauss-Maffei |
| Kupfer Drahtziehen | Statorwicklungen | - | - | Literatur | DE: Copper wire (0.6 mm) Sphera |

Tabelle 10: Eingangsdaten des Elektromotor-Getriebe-Einheit: Neuentwicklung – Prozesse (Quelle: Fraunhofer ICT)

Materialanteile: Stand der Technik vs. Neuentwicklung

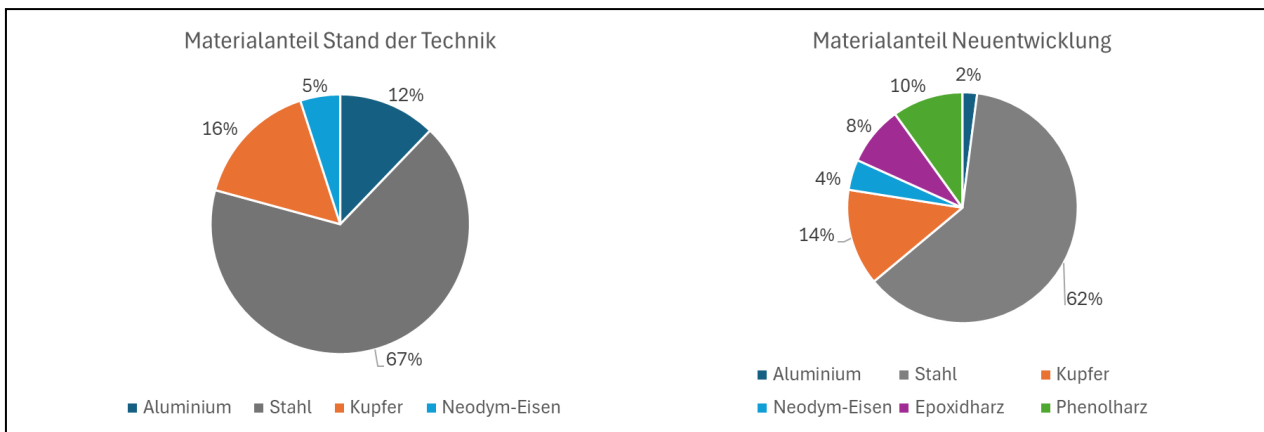


Abbildung 78: EMG – Materialanteile: Stand der Technik vs. Neuentwicklung (Quelle: Fraunhofer ICT)

Anhand von Abbildung 78 ist ein Materialwechsel hinzu dem vermehrten Einsatz von Kunststoffen erkennbar. Durch eine technologische Innovation und eine aktive Kühlung, was zu einer erhöhten Leistung führt, ist so das Gesamtgewicht von 13,3 kg auf 10,8 kg (-19%) reduziert worden.

Die Recycling-Raten und Verwertungsraten sind in Tabelle 11 aufgeschlüsselt. Die Recycling-Aufwände der Metalle für das Wiedereinschmelzen am Ende des Lebens stammen von Ashby, 2021 [38]. Dabei beruht die Annahme darauf, dass für die Einsatzenergie des Wiedereinschmelzens 2/3 elektrische und 1/3 thermische Energie über Erdgas verwendet wird.

| Material | Recycling-Rate in % | thermische Verwertung in % | Deponierungsrate in % | Quelle |
|---------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------|
| Aluminium | 80% | 0% | 20% | [39] |
| Stahl | 95% | 0% | 5% | angepasst an [39] |
| Kupfer | 90% | 0% | 10% | [39] |
| Epoxidharz und Phenolharz | 0% | 100% | 0% | eigene Annahmen |
| Neodym-Eisen | 0% | 0% | 100% | eigene Annahmen |

Tabelle 11: Verwertungswege und Verwertungsanteile vom End-of-life Abfall für die Elektromotor-Getriebe-Einheit (Quelle: Fraunhofer ICT)

Beitragsanalyse: „EF 3.1 Climate Change“ Anteile Stand der Technik

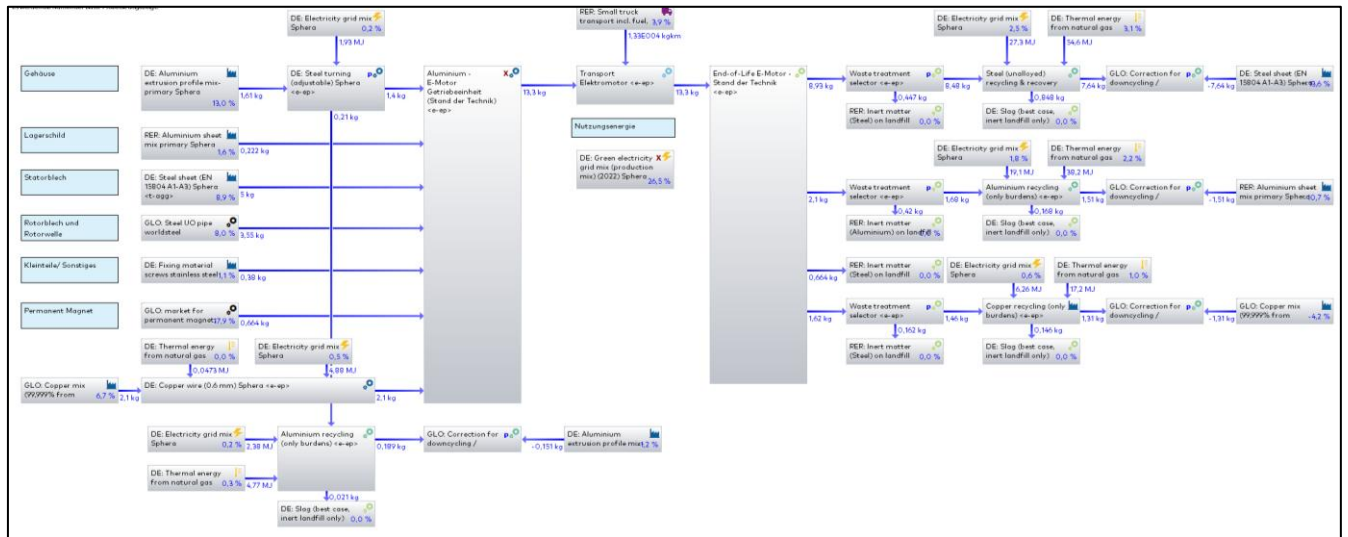


Abbildung 79: EMG – Modellierung und Beitragsanalyse Stand der Technik (Quelle: Fraunhofer ICT)

Beitragsanalyse: „EF 3.1 Climate Change“ Anteile Neuentwicklung

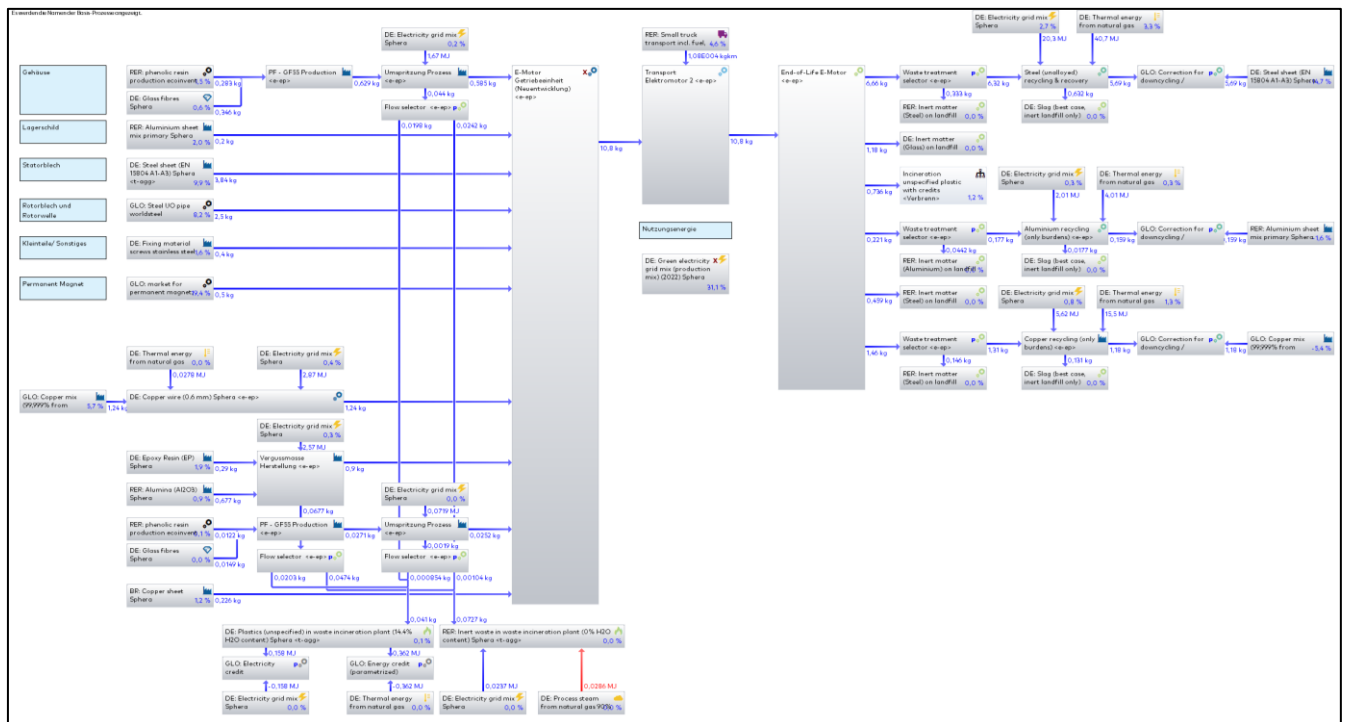


Abbildung 80: EMG – Modellierung und Beitragsanalyse Neuentwicklung (Quelle: Fraunhofer ICT)

Elektromotor-Getriebe-Einheit: Neuentwicklung versus. Stand der Technik

Zu Beginn werden die Eingangsdaten des Life Cycle Inventory (LCI) gesammelt.

Beim Elektromotor wird für die Nutzungsphase ein erneuerbarer Strommix von Sphera vom Jahr 2022 genutzt, sowie eine Fahrleistung von 30.000 km/Jahr und eine Lebensdauer von 10 Jahren. Damit beträgt die Gesamtfahrdistanz 300.000 km. Ein durchschnittliches Autogewicht von 1,94 t und ein Energiebedarf von 21 kWh pro 100 km werden angenommen. Zusätzlich sind Ladungsverluste von 15% implementiert [40].

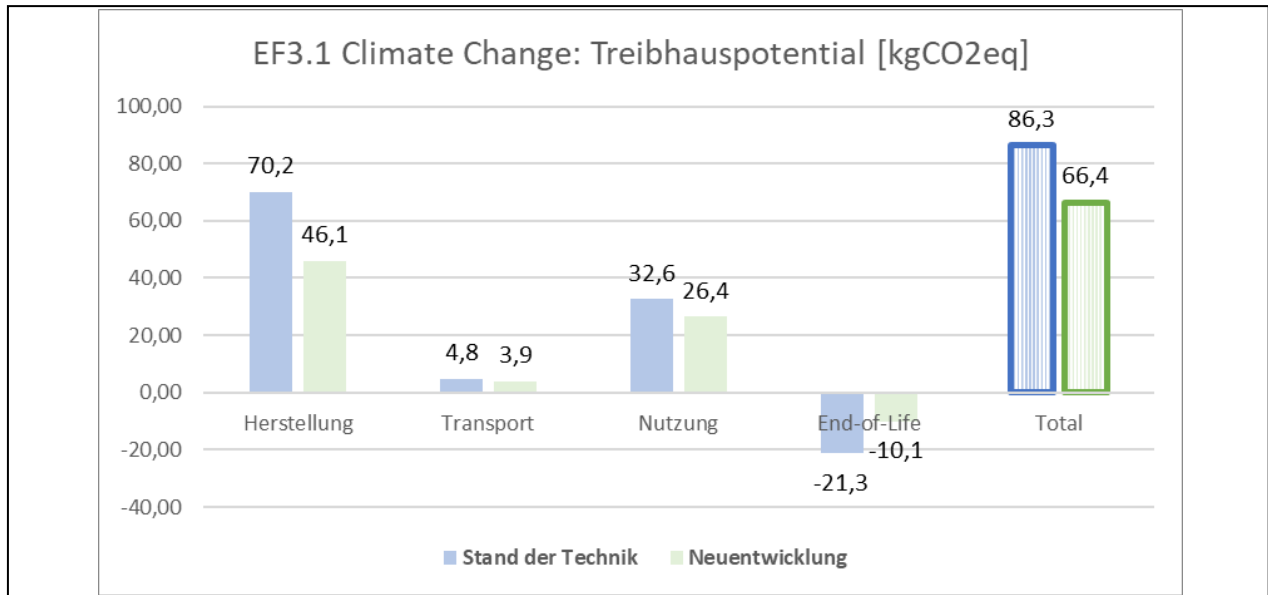


Abbildung 81: EMG – Stand der Technik vs. Neuentwicklung: Treibhauspotential „EF 3.1 Climate Change“ (Quelle: Fraunhofer ICT)

In Abbildung 81 ist über den Lebenszyklus des Elektromotors das Treibhauspotential zu sehen. Insgesamt beträgt die CO₂-Reduzierung der Neuentwicklung im Vergleich zum Stand der Technik 23% (~19,9 kg CO₂ eq.). Der größte Beitrag kommt hierbei von der Herstellungsphase des Elektromotors, wo eine Reduzierung des Gewichts und der geringere Bedarf an Aluminium zum größten Beitrag der CO₂-Reduzierung führt. Das insgesamt kleinere Gewicht macht sich in den Treibhauspotentialen im Transport und in der Nutzungsphase bemerkbar mit einer Reduzierung von 0,9 kg CO₂ eq. und 6,1 kg CO₂ eq.. Am Ende des Lebens sind die Gutschriften für die Neuentwicklung aufgrund vermehrten Einsatzes von Kunststoffen, die thermisch verwertet werden, reduziert. Die Gesamtbilanz für die Neuentwicklung ist dennoch über den gesamten Lebenszyklus besser im Vergleich zum Stand der Technik.

In Abbildung 82 ist über den Lebenszyklus der Elektromotor-Getriebe-Einheit die Auswirkungen der Wassernutzung zu sehen.

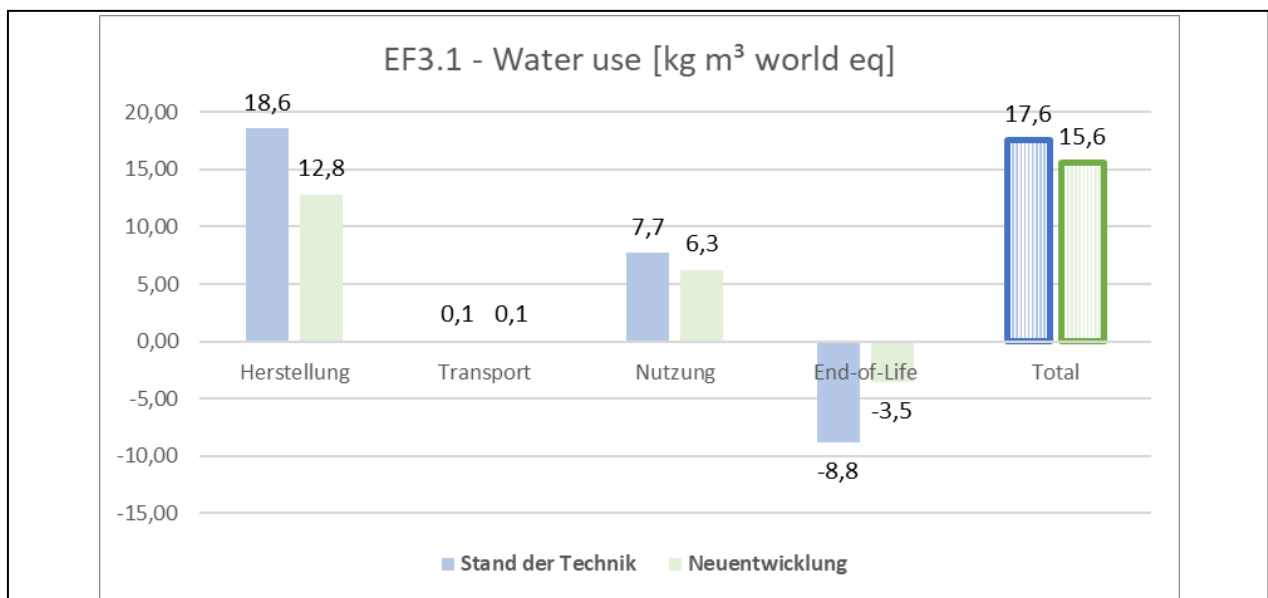


Abbildung 82: EMG – Stand der Technik vs. Neuentwicklung: Wassernutzung „EF 3.1 Water use“ (Quelle: Fraunhofer ICT)

Die Neuentwicklung der Elektromotor-Getriebe-Einheit führt für den gesamten Lebenszyklus zu einer Verbesserung um 11% in der Wassernutzung, was 2 m³ world eq. entspricht. Der größte Anteil kommt hierbei vom Einsatz von Metallen beim Stand der Technik.

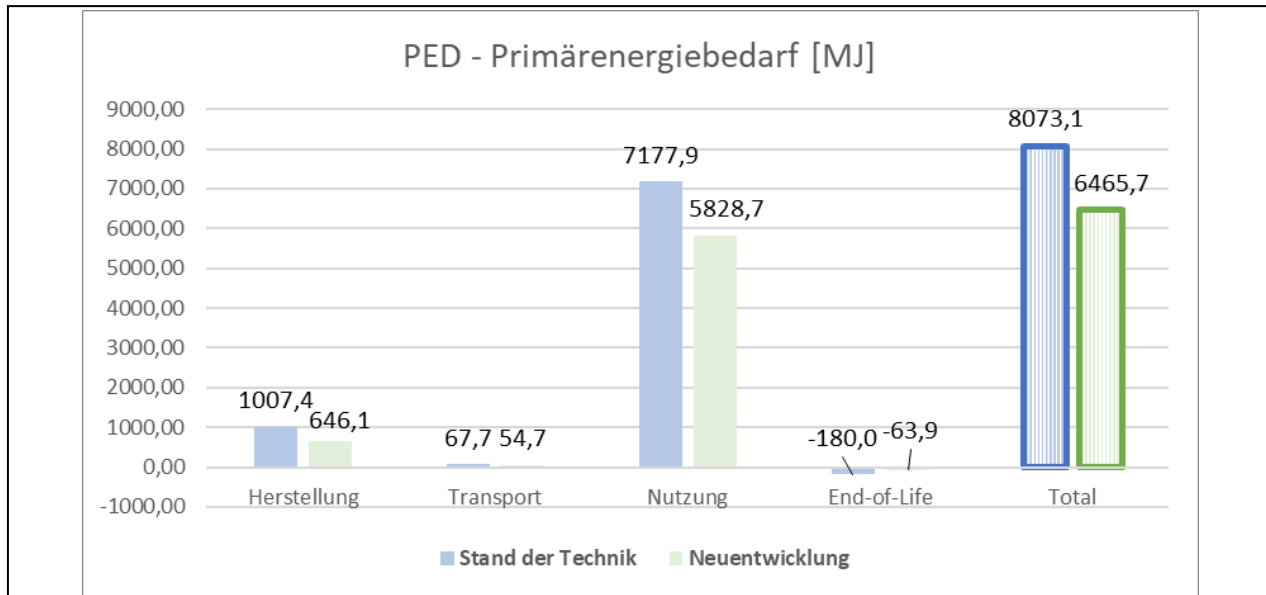


Abbildung 83: EMG – Stand der Technik vs. Neuentwicklung: Primärenergiebedarf (Quelle: Fraunhofer ICT)

Die Reduzierung des Primärenergieverbrauchs beträgt 19% (1607 MJ), wobei die größte Reduzierung mit 1349 MJ von der Nutzungsphase kommt. Hierbei kommen die hohen Werte während der Nutzungsphase durch den Datensatz und die angenommene Nutzung eines erneuerbaren Strommix.

Elektromotor-Getriebe-Einheit: Ableitung von Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Die Hot-Spots der Umweltwirkungen kommen hauptsächlich durch energieintensive Materialien wie Aluminium und dem Magneten (ca. 30% des CO₂-Fußabdruck). Der Einsatz von Kunststoff führt durch den Leichtbau zu indirekten Verbesserungen während der Nutzungsphase sowie zu einer Reduzierung des Energieaufwands für die Materialbereitstellung. Die Wassernutzungswirkungen zeigen ähnliche Hot-Spots wie der CO₂-Fußabdruck. Beim Primärenergiebedarf ist es genauso; jedoch sind die Werte proportional viel größer kommend von der Nutzungsphase. Diese stammen jedoch von der Nutzung und dem Einsatz des erneuerbaren Energiemix für das Laden des E-Autos.

Da die Funktionalität des Demonstrators auf ein Getriebegehäuse ausgeweitet wurde, sind zusätzliche Einsparungen im Vergleich zum Stand der Technik Elektromotor und Getriebegehäuse möglich.

Zusätzlich wurde untersucht, wie sich der CO₂-Fußabdruck mit einem zugemischten Rezyklatanteil von 8% verändern würde. Dabei zeigte sich, dass die Gesamtemissionen im gleichen Maßstab wie bei dem Ölpumpenstellring um ~1% verringert werden könnten.

Das durch die Neuentwicklungen im Projektantrag in Aussicht gestellte Einsparpotenzial von 50% bei den Treibhausgasemissionen bzw. beim Rohstoffeinsatz konnte nicht erreicht werden. Auch aufgrund einer konservativeren Einschätzung sind die „versprochenen“ Verbesserungen durch die Prozessinnovationen im Laufe des Projekts nicht im gewünschten Maße bei den Demonstratoren eingetreten.

2.2 Veröffentlichung des Ergebnisses

Schutzrechtsanmeldungen

Erfindungen und Schutzrechte wurden im Rahmen des Projekts nicht angemeldet.

Veröffentlichungen

Es wurden folgende Veröffentlichungen herausgegeben:

- Maertens, Robert; Dieterle, Michael; Herrmann, Tayla; Hirz, Jan; Klaas, Dietmar:
„Angussverwertung schont Ressourcen“, Kunststoffe Ausgabe 12 / 2022
- Kraft, Julian; Jetty, Bhimesh; Hohberg, Martin; Wittemann, Florian; Henning, Frank:
„Kavitätsbalancierung bei Mehrkavitäten-Werkzeugen im Duromerspritzgießen“, Jahresmagazin WAK 2024
- Jetty, Bhimesh; Wittemann, Florian; Kärger, Luise:
„Modeling Approach for Reactive Injection Molding of Polydisperse Suspensions with Recycled Thermoset Composites“, Polymers 2024 16, 2245. 2024. <https://doi.org/10.3390/polym16162245>

Studentische Arbeiten im Rahmen dieses Projekts

- Hoffmann, Alexander: „Entwicklung und Standardisierung einer Plastifiziereinheit für große Schussgewichte für das Duroplastspritzgießen“, Projektarbeit T2000 bei KraussMaffei Technologies, Duale Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg (DHBW) (nicht freigegeben), 2022

Öffentlichkeitsarbeit

Neben den Veröffentlichungen wurde das Projekt auch von Projektpartnern auf verschiedenen Fachmessen vorgestellt. Es wurden insgesamt vier Demonstrationsmodelle der Elektromotor-Getriebe-Einheit vom Fraunhofer ICT angefertigt; davon 3 als Schnittmodell inklusive Elektromotor. Ein Schnittmodell wurde vom Fraunhofer ICT auf der Fakuma 2024 gezeigt. Lite₂Duro wurde ferner in einem Vortrag auf der 13. Internationalen Duroplasttagung Iserlohn am 21./22. Mai 2025 vorgestellt. Es wurden außerdem von den einzelnen Partnern u.a. Newsletter auf den Internet-Seiten bzw. Mitteilungen auf den SocialMedia-Kanälen verbreitet.

2.3 Fazit und Erreichung der Projektziele

Mit den beiden im BMWK-Projekt Lite₂Duro aufgebauten Pilotzellen ist es gelungen, die zwei Produktinnovationen herzustellen. Die Machbarkeit der drei Prozessinnovationen wurde nachgewiesen. Alle Arbeitspakete wurden abgeschlossen und alle Meilensteine wurden vollendet. Das Gesamtziel des Vorhabens wurde erreicht.

Notwendigkeit der Projektarbeiten

Die Arbeiten in den Arbeitspaketen AP 2 und AP 5 waren notwendig, um die Fertigungszellen zu entwickeln und die Produktinnovationen zu demonstrieren. In AP 3 und AP 4 wurden die grundsätzlichen Untersuchungen durchgeführt.

2.4 Literaturverzeichnis

- [1] Langheck, A.; Reuter, S.; Saburow, O.; Maertens, R.; Wittemann, F.; Berg, L. F.; Doppelbauer, M.:
„Evaluation of an Integral Injection Molded Housing for High Power Density Synchronous Machines with Concentrated Single-Tooth Winding“, 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.), 2018
- [2] Reuter, S.; Berg L. F.; Doppelbauer, M.: „Performance evaluation of a high-performance motor with thermoset molded internal cooling“, 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Erlangen, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/EDPC53547.2021.9684222.
- [3] Jauernick, M.; Pohnert, D.; Kujawski, W.; Otte, R.:
„Hybrides Leichtbau-Zylinderkurbelgehäuse - Herausforderungen und Machbarkeit“, MTZ - Motortechnische Zeitschrift 80 (2019), Nr. 12, S. 72-78

- [4] VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik (Hrsg.): „Wirtschaftliche Herstellung von Duromer-Formteilen“, Düsseldorf, 1978 (Ingenieurwissen)
- [5] Castro, J. M.; Macosko, C. W.: „Studies of mold filling and curing in the reaction injection molding process“, *AIChE Journal* 28 (1982), Nr. 2, S. 250-260
- [6] KraussMaffei Technologies GmbH: „Technische Daten PolySet / DuroSet – Spritzgießmaschinen“
- [7] Wittemann, F.; Maertens, R.; Kärgler, L.; Henning, F.: „Injection molding simulation of short fiber reinforced thermosets with anisotropic and non-newtonian flow behavior“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 124, 105476 (2019)
- [8] Bailleul, J.-L.; Delaunay, D.; Jarny, Y.: „Determination of Temperature Variable Properties of Composite Materials: Methodology and Experimental Results“, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 15 (1996), Nr. 5, S. 479-496
- [9] Osswald, T. A.; Turng, L.-S.; Gramann, P. J.; Beaumont, J. (Hrsg.): „Injection molding handbook“, 2nd ed., Cincinnati, Hanser Gardner, 2008
- [10] Beaumont, J. P.; Young, J. H.; Jaworski, M. J.: „Mold Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner Systems“, *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 18, no. 6, pp. 572-590, Apr. 1999, doi: 10.1177/073168449901800609
- [11] Kim, J.; Ahn, S.; Atre, S. V.; Park, S. J.; Kang, T. G.; German, R. M.: „Imbalance filling of multi-cavity tooling during powder injection molding“, *Powder Technol.*, vol. 257, pp. 124-131, May 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.02.056
- [12] Wilczyński, K.; Narowski, P.: „A Strategy for Problem Solving of Filling Imbalance in Geometrically Balanced Injection Molds“, *Polymers*, vol. 12, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2020, doi: 10.3390/polym12040805
- [13] Chen, G.; Pham, T. T.: „Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems“, 1st ed., CRC Press, 2000, <https://doi.org/10.1201/9781420039818>
- [14] Zink, B.; Kovács, J. G.: „Pressure-Dependent Heat Transfer Coefficient Measurement for Thermoplastic Melts“, *Polym. Eng. Sci.* 2022, 62, S. 1137-1146, doi: 10.1002/pen.25912
- [15] Hoffmann, A.: „Entwicklung und Standardisierung einer Plastifiziereinheit für große Schussgewichte für das Duroplastspritzgießen“, Projektarbeit T2000, Duale Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg, 12.09.2022
- [16] Bernardeau, F.; Perrin, D.; Caro-Bretelle, A.-S.; Benezet, J.-C.; Lenny, P.: „Development of a Recycling Solution for Waste Thermoset Material. Waste Source Study, Comminution Scheme and Filler Characterization.“, *Journal of Material Cycles and Waste Management* 57 (2018) 2, S. 1-17
- [17] Bernardeau, F.; Perrin, D.; Caro-Bretelle, A.-S.; Benezet, J.-C.; Lenny, P.: „Valorization of waste thermoset material as a filler in thermoplastic: Mechanical properties of phenolic molding compound waste-filled PP composites.“, *Journal of Applied Polymer Science* 135 (2018) 12, S. 1-12
- [18] Bream, C. E.; Hornsby, P. R.: „Comminuted thermoset recyclate as a reinforcing filler for thermoplastics. Part I Characterisation of recyclate feedstocks.“, *Journal of Materials Science* 36 (2001) 12, S. 2965-2975
- [19] Bream, C. E.; Hornsby, P. R.: „Comminuted thermoset recyclate as a reinforcing filler for thermoplastics. Part II Structure – property effects in polypropylene compositions.“, *Journal of Materials Science* 36 (2001) 12, S. 2977-2990
- [20] Iji, M.: „Recycling of epoxy resin compounds for moulding electronic components.“, *Journal of Materials Science* 33 (1998) 1, S. 45-53
- [21] Dzeskiewicz, L. A.; Ralston, J. D.: „Evaluation of regrind in thermoset applications.“, ANTEC 1994. San Francisco 1994, S. 931-934
- [22] Whalen, J. P.; Poston, D. D.: „Recycling of mineral filled thermoset epoxy.“, ANTEC 1994. San Francisco 1994, S. 924-928
- [23] Olson, B. A.; Keyser, H. D.: „Recycling cured phenolic material.“, *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 7 (1994) 1, S. 30-41
- [24] Maertens, R.; Dieterle, M.; Herrmann, T.; Hirz, J.; Klaas, D.: „Angussverwertung schont Ressourcen – Direkte Rückführung von ausgehärteten Duroplasten als Füllstoff in den Spritzgießprozess.“, *Kunststoffe*, Ausgabe 12 / 2022, pp. 58-61. (<https://www.kunststoffe.de/a/fachartikel/angussverwertung-schont-ressourcen-3158716>)
- [25] Castro, J. M.; Macosko, C. W.: „Studies of Mold Filling and Curing in the Reaction Injection Molding Process.“, *AIChE Journal* 1982, 28, S. 250-260, doi: 10.1002/aic.690280213.

- [26] Domurath, J.; Saphiannikova, M.; Ausias, G.; Heinrich, G.: „Modeling of Stress and Strain Amplification Effects in Filled Polymer Melts.“, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 2012, S. 171-172, S. 8-16, doi: 10.1016/j.jnnfm.2012.01.001.
- [27] Jetty, B.; Wittemann, F.; Kärger, L.: „Modeling Approach for Reactive Injection Molding of Polydisperse Suspensions with Recycled Thermoset Composites.“, *Polymers* 2024, 16, 2245, doi: 10.3390/polym16162245.
- [28] Deutsches Institut für Normung: „DIN EN ISO 527-2: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften. Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen.“, Beuth, Berlin, 2012
- [29] Englich, S.: „Strukturbildung bei der Verarbeitung von glasfasergefüllten Phenolformaldehydharzformmassen“, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2015
- [30] Höer, M.: „Einfluss der Material- und Verarbeitungseigenschaften von Phenolharzformmassen auf die Qualität spritzgegossener Bauteile“, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2014
- [31] Deutsches Institut für Normung: „DIN EN ISO 14040, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020). = Environmental management – life cycle assessment – principles and framework (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020). Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020.“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Februar 2021. Deutsche Norm.
- [32] Deutsches Institut für Normung: „DIN EN ISO 14044, Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020). = Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020). Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020.“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Februar 2021. Deutsche Norm.
- [33] Klöpffer, W.; Grahl B.: „Life Cycle Assessment (LCA). A guide to best practice.“, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2014. ISBN 978-3-527-65565-6.
- [34] Sala, S.; de Laurentiis, V.; Zampori, L.; Diaconu, E.; Fazio, S.; Biganzoli, F.: „Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods – Version 2, from ILCD to EF 3.0“, Publications Office, 2018
- [35] Dieterle, M.: „Die Life Cycle Gap Analyse – Herleitung, Definition und exemplarische Anwendung“, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Dissertation, 2023 (<https://doi.org/10.24406/publica-1161>)
- [36] Boulay, A.-M.; Bare, J.; Benini, L.; Berger, M.; Lathuillière, M. J.; Manzardo, A.; Margni, M.; Motoshita, M.; Núñez, M.; Pastor, A. V.; Ridoutt, B.; Oki, T.; Worbe, S.; Pfister, S.: „The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE)“ [online]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, 23(2), S. 368-378. ISSN 1614-7502. doi: 10.1007/s11367-017-1333-8
- [37] Verein Deutscher Ingenieure: „Kumulierter Energieaufwand (KEA) – Begriffe, Berechnungsmethoden. = Cumulative energy demand (KEA) – Terms, definitions, methods of calculation.“, Beuth Verlag, Berlin, Januar 2012. VDI-Richtlinien. 4600.
- [38] Ashby, M. F. (Hrsg.): „Materials and the Environment“ (3th Edition), Butterworth-Heinemann, 2021. ISBN 978-0-12-821521-0.
- [39] Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K.; Sibley, S. F.; Sonnemann, G.: „Recycling rates of metals. A status report.“, Nairobi, Kenya, United Nations Environment Programme, 2011
- [40] Reick, B.; Konzept, A.; Kaufmann, A.; Stetter, R.; Engelmann, D.: „Influence of Charging Losses on Energy Consumption and CO₂ Emissions of Battery-Electric Vehicles“ [online], *Vehicles*, 2021, 3(4), S. 736-748, doi: 10.3390/vehicles3040043