

Entwicklung eines großserientauglichen Aufheizprozesses für naturfaserverstärkte Kunststoffe

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Jovana Džalto

aus Zenica (BiH)

| | |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| Tag der mündlichen Prüfung: | 18. August 2017 |
| Prüfungsvorsitzender: | Jun.-Prof. Dr.-Ing. Erik von Harbou |
| 1. Berichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang |
| 2. Berichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann |

D386

Für meine Mutter

und alle anderen starken Frauen.

Vorwort

Diese Arbeit entstand in den Jahren 2012 bis 2017 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Verarbeitungstechnik der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH.

Mein herzlichster Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang, für die exzellente Betreuung, die Unterstützung sowie Diskussionsbereitschaft, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Des Weiteren bedanke ich mich bei Jun.-Prof. Dr.-Ing. Erik von Harbou für die Zeitinvestition und die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie bei Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann für die Zweitbegutachtung. Ferner danke ich dem Geschäftsführer, Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer, für das Vertrauen in meine Arbeit und das hervorragende Arbeitsumfeld.

Während meiner Tätigkeit am Institut wurde ich stets von allen Kolleginnen und Kollegen abteilungsübergreifend sowohl bei beruflichen als auch privaten Vorhaben unterstützt. Die ausgesprochen gute Kollegialität zwischen sämtlichen Mitarbeitern des IVW hat durchgehend zu meiner Motivation beigetragen. Ganz besonders danke ich meinen Kollegen und Freunden Dr.-Ing. David May, Erhard Natter, Dr. Barbara Güttler, Matthias Domm, Christian Goergen und Stefan Weidmann.

Meinen tiefsten Dank möchte ich insbesondere Andrea Hauck aussprechen, die sich auch jetzt noch um mich sorgt und die ich immer vermissen werde.

Die Grundlage für den erfolgreichen Abschluss meiner Dissertation haben vor allem meine ehemaligen Kolleginnen und Kollegen geschaffen und ich danke Prof. Dr.-Ing. Luisa A. Medina, Martina Hümbert, Dr.-Ing. René Holschuh, Dr.-Ing. Marcel Christmann sowie Dr.-Ing. Thomas Bayerl von Herzen dafür, dass sie immer mehr an mich geglaubt haben als ich selbst. Darüber hinaus danke ich Marcel für einen Quadratmeter seiner Garagenstellfläche. Selbstverständlich danke ich auch allen weiteren Mitarbeitern und Alumni des IVW.

Meinem fleißigen HiWi, Andreas Krämer, danke ich für seine stets zuverlässige und aufopfernde Hilfe, seinen Humor und die Behütung meiner anscheinend lebendigen Messutensilien. Meinen tiefsten Dank möchte ich auch allen Studenten ausdrücken, die durch ihre tatkräftige Unterstützung und den vielen Schweiß am Infrarotfeld und

sonstigen Heizgeräten einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben. Dazu gehören Maria Tonkinson, Frieder Seibt, Gordon Foltinek, Heinrich Barz, Mario Weiland, Dominik Linster, Kirsten Kempf, Adrian Ackermann, Simon Felder, Manuela Bauer, Pascal Polster, Fabian Kohler, Florian Mischo, Andreas Kinsvater, Maximilian Schubert, Martje Lönne, Michael Henn, David Reichling und Lukas Valerius.

Für die Erweiterung meines wissenschaftlichen Horizonts und für die berufliche sowie private Unterstützung möchte ich Jun.-Prof. Dr.-Ing. Katharina Resch-Fauster danken, die mir in vielen Lebenslagen als Vorbild dient.

Für die kostenlose Bereitstellung von Material und Gerätschaften danke ich der J.H. Ziegler Natural Nonwovens GmbH.

Sicherlich mein größter Dank gilt meiner Familie und insbesondere meiner Mutter, die nur durch persönlichen Verzicht meinen akademischen und beruflichen Werdegang ermöglicht hat. Zuletzt, aber von ganzem Herzen, danke ich auch meinem Freund, Frank Schwerdtfeger, für den privaten Rückhalt und die bedingungslose Unterstützung, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ludwigshafen, November 2017

Jovana Džalto

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----------|
| Verzeichnis verwendeter Abkürzungen | IV |
| Verzeichnis verwendeter Formelzeichen | VI |
| Kurzfassung..... | IX |
| Abstract | X |
| 1 Einleitung und Zielsetzung | 1 |
| 1.1 Naturfaserverstärkte Kunststoffe im Automobilbau | 3 |
| 1.2 Potenziale und Herausforderungen von Naturfaser-Thermoplast- Halbzeugen | 5 |
| 1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit | 6 |
| 2 Stand der Technik..... | 9 |
| 2.1 Definition von Naturfasern | 9 |
| 2.1.1 Aufbau von Bastfasern | 10 |
| 2.1.2 Bastfaserröste und chemische Erhöhung des Celluloseanteils | 12 |
| 2.1.3 Bestimmung des Röstgrades von Naturfasern | 13 |
| 2.2 Verarbeitung naturfaserverstärkter Thermoplaste | 16 |
| 2.2.1 Herstellung von Bauteilen aus Hybridvliesen | 16 |
| 2.2.2 Thermische Restriktionen bei der Verarbeitung von NFK | 20 |
| 2.2.3 Geruch und Emissionen von NFK | 22 |
| 2.3 Grundlagen der Erwärmung von Organoblechen | 24 |
| 2.3.1 Erwärmungsmethoden für Organobleche..... | 25 |
| 2.3.2 Konduktive Erwärmung | 27 |
| 2.3.3 Konvektive Erwärmung | 29 |
| 2.3.4 Erwärmung durch Strahlung..... | 32 |
| 2.4 Schlussfolgerung..... | 37 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | Entwicklung eines großserientauglichen Aufheizprozesses für naturfaserverstärkte Organobleche | 40 |
| 3.1 | Auswahl einer geeigneten Erwärmungsmethode | 40 |
| 3.2 | Konzeptentwicklung für die Erwärmung von NFOB..... | 44 |
| 4 | Experimentelle Studien zu den Einflüssen auf die IR-Erwärmung naturfaserverstärkter Thermoplaste | 49 |
| 4.1 | Versuchsmaterialien..... | 49 |
| 4.2 | Entwicklung einer Messmethodik für die Untersuchung des IR-Erwärmungsverhaltens von NFOB | 50 |
| 4.2.1 | Ermittlung der Heizwendeltemperatur des IR-Strahlers | 51 |
| 4.2.2 | Ermittlung eines Heizstrahler-Temperaturprozessfensters..... | 53 |
| 4.2.3 | Einfluss der Probekörpergröße auf die IR-Erwärmung von NFOB.. | 60 |
| 4.3 | Einfluss der Rohstoffqualität auf die Erwärmung von NFOB | 62 |
| 4.3.1 | Einfluss des Röstgrades auf die Absorption von IR-Strahlung | 64 |
| 4.3.2 | Einfluss der chemischen Zusammensetzung von Naturfasern auf die Absorption von IR-Strahlung | 67 |
| 4.4 | Einfluss der Halbzeugbeschaffenheit auf die IR-Erwärmung von NFOB... .. | 71 |
| 4.4.1 | Probenherstellung | 71 |
| 4.4.2 | Allgemeiner Einfluss des Flächengewichts auf die IR-Erwärmung.. | 72 |
| 4.4.3 | Allgemeiner Einfluss der Dicke auf die IR-Erwärmung..... | 74 |
| 4.5 | Mathematische Beschreibung des Einflusses der Halbzeugbeschaffenheit auf die IR-Erwärmung von NFOB..... | 76 |
| 4.5.1 | Ermittlung physikalischer Größen für die Berechnung der Wärmeströme..... | 79 |
| 4.5.2 | Modellbildung und Ergebnis | 82 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5 | Prozessoptimierung | 91 |
| 5.1 | Einfluss der NFOB-Rekonsolidierungstemperatur auf die mechanischen Eigenschaften..... | 91 |
| 5.2 | Geruch und Emissionen | 97 |
| 6 | Richtlinien für die IR-Erwärmung von NFOB..... | 104 |
| 7 | Zusammenfassung und Fazit..... | 109 |
| 8 | Literaturverzeichnis..... | 112 |
| 9 | Anhang..... | 125 |
| | Betreute studentische Arbeiten | 128 |
| | Publikationen | 130 |
| | Lebenslauf..... | 133 |

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

| Kurzform | Beschreibung |
|-----------------|--|
| ABS | Acrylnitril-Butadien-Styrol |
| Abs.(x nm) | Absorption bei einer Wellenlänge von x Nanometer |
| ATR | Abgeschwächte Totalreflexion |
| C | Kohlenstoff |
| C-H | Kohlenstoff-Wasserstoff (-Bindung) |
| CFK | Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| DTG | Differentielles thermogravimetrisches Signal |
| d. h. | das heißt |
| EG | Europäische Gemeinschaft |
| EM | Elektromagnetisch |
| E-Glas | Glasfaser für elektrische Anwendungen |
| FKV | Faser-Kunststoff-Verbund |
| FTIR | Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie |
| Gew.-% | Gewichts-Prozent |
| GFK | Glasfaserverstärkter Kunststoff |
| GMT | Glasmattenverstärkter Thermoplast |
| IR | Infrarot |
| IVW | Institut für Verbundwerkstoffe GmbH |
| KP | Kontaktheizpresse |
| LFT | Langfaserverstärkter Thermoplast |
| LP | Laborheizpresse |
| MEA | Monoethanolamin |
| NF | Naturfaser(n) |
| NIR | Nahes Infrarot |
| NFK | Naturfaserverstärkter Kunststoff |
| NFOB | Naturfaser-Organoblech |
| NF/PP | Naturfaserverstärktes Polypropylen |
| Nr. | Nummer |
| OB | Organoblech |
| PP | Polypropylen |
| PTFE | Polytetrafluorethylen |
| RK | Röstklasse |
| SMC | Sheet Molding Compound |

| | |
|--------|----------------------------------|
| TVOC | Total Volatile Organic Compounds |
| UV | Ultraviolett |
| VOC | Volatile Organic Compounds |
| Vol.-% | Volumen-Prozent |
| WPC | Holzfaserverstärkter Kunststoff |

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

| Symbol | Einheit | Beschreibung |
|-----------------------------------|---------|---|
| <i>Lateinische Formelzeichen:</i> | | |
| A | - | Absorption |
| A | m^2 | Oberfläche des Organoblechs |
| A_{NFOB} | m^2 | Oberfläche des Organoblechs |
| $A_{Strahler}$ | m^2 | Strahleroberfläche |
| A_1 | m^2 | Strahleroberfläche |
| A_2 | m^2 | Oberfläche des Organoblechs |
| b | mK | Wiensche Konstante |
| c_0 | m/s | Lichtgeschwindigkeit |
| \dot{E} | W | Wärmestrom des schwarzen Strahlers |
| $\dot{E}_{Kern(t)}$ | W | Wärmestrom des NFOB-Kerns zum Zeitpunkt t |
| $\dot{E}_{Oberfläche(t)}$ | W | Wärmestrom der NFOB-Oberfläche zum Zeitpunkt t |
| e | - | Eulersche Zahl |
| $F_{Strahler \rightarrow NFOB}$ | - | Sichtfaktor zwischen IR-Strahler und NFOB |
| $F_{1 \rightarrow 2}$ | - | Sichtfaktor von 1 nach 2 |
| $F(R)$ | - | Absorption als Funktion der Reflexion |
| $f(Pr)$ | - | Prandtl-Funktion |
| g | m/s^2 | Erdbeschleunigung |
| Gr | - | Grashofzahl |
| h | Js | Plancksches Wirkungsquantum |
| k | - | Korrekturfaktor |
| k | J/K | Boltzmannkonstante |
| L | m | Charakteristische Länge |
| L | mm | Stützweite |
| Nu | - | Nußeltzahl |
| Pr | - | Prandtlzahl |
| \dot{Q} | W | Wärmestrom |
| \dot{Q}_{IR} | W | Wärmestrom vom Strahler auf das NFOB |
| \dot{Q}_{IR_real} | W | Korrigierter Wärmestrom vom Strahler auf das NFOB |
| \dot{Q}_{Kern_1} | W | Wärmestrom von der Oberfläche in 1/6 der NFOB-Dicke |
| \dot{Q}_{Kern_2} | W | Wärmestrom 1/6 in 1/3 der NFOB-Dicke |
| \dot{Q}_{Kern_3} | W | Gesamtwärmestrom in den NFOB-Kern |
| $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2}$ | W | Wärmestrom vom Strahler auf das Organoblech |

| | | |
|-------------------------|------------------|--|
| \dot{q} | W/m ² | Wärmestromdichte |
| R | - | (diffuse) Reflexion |
| Ra | - | Rayleighzahl |
| $S_\lambda(T, \lambda)$ | W/m ³ | Spektralspezifische Intensität schwarzer Strahlung |
| s | m | Organoblechdicke |
| s_{Luft} | m | Schichtdicke Luft |
| s_{NF} | m | Schichtdicke Naturfasern |
| s_{NFOB} | m | Dicke des Organoblechs |
| s_{PP} | m | Schichtdicke Polypropylen |
| T | - | Transmission |
| T_F | K | Temperatur des Fluids |
| $T_{Kern_berechnet}$ | K | Berechnete Kerntemperatur |
| T_{Kern_x} | K | Kerntemperatur des Flächengewichts x |
| $T_{Oberfläche}$ | K | Oberflächentemperatur |
| T_{real} | K | Reale Temperatur des NFOB |
| T_S | K | Temperatur des Festkörpers |
| $T_{schwarz}$ | K | Temperatur eines idealen schwarzen Strahlers |
| $T_{Strahler}$ | K | Strahlertemperatur |
| T_1 | K | Temperatur des Organoblechs auf der Oberseite |
| T_1 | K | Temperatur des IR-Strahlers |
| $T_{1/2_NFOB}$ | K | Kerntemperatur des NFOB (1/2 Dicke) |
| $T_{1/3_NFOB}$ | K | Temperatur NFOB bei 1/3 der NFOB-Dicke |
| $T_{1/6_NFOB}$ | K | Temperatur NFOB bei 1/6 der NFOB-Dicke |
| T_2 | K | Temperatur des Organoblechs auf der Unterseite |
| T_2 | K | Temperatur des Organoblechs |
| t | s | Zeit |
| x | g/m ² | Flächengewicht des NFOB |
| z | m | Kantenlänge |

Griechische Formelzeichen:

| | | |
|-------------------------------|------------------------------------|--|
| α | W/(m ² K) | Wärmeübergangszahl |
| β | 1/K | Thermischer Ausdehnungskoeffizient |
| β_1 | - | Raumwinkel Strahler/Organoblech |
| β_2 | - | Raumwinkel Organoblech/Strahler |
| ΔT | K | Temperaturdifferenz |
| Δt | K | Zeitdifferenz |
| Δx | m | Differenz einer Längeneinheit |
| ε | - | Emissionszahl |
| ε_{NFOB} | - | Emissionszahl des NFOB |
| ε_S | - | Emissionszahl des Strahlers |
| λ | μm | Wellenlänge |
| $\lambda_{\text{Hanfmatten}}$ | W/(mK) | Wärmeleitfähigkeit von Hanfmatten |
| λ_{max} | μm | Wellenlänge beim Maximum der Intensität |
| λ_{Luft} | W/(mK) | Wärmeleitfähigkeit von Luft |
| λ_{NF} | W/(mK) | Wärmeleitfähigkeit von Naturfasern |
| λ_{NFOB} | W/(mK) | Gemischte Wärmeleitfähigkeit von NFOB |
| λ_{PP} | W/(mK) | Wärmeleitfähigkeit von Polypropylen |
| λ_w | W/(mK) | Wärmeleitfähigkeit |
| ν | m ² /s | Kinematische Viskosität |
| π | - | Kreiszahl |
| ρ_{NF} | g/cm ³ | Dichte Naturfasern |
| ρ_{NFOB} | g/cm ³ | Dichte naturfaserverstärktes Organoblech |
| ρ_{PP} | g/cm ³ | Dichte Polypropylen |
| σ | W/(m ² K ⁴) | Stefan-Boltzmann-Konstante |
| φ_{NF} | - | Volomengehalt Naturfasern |
| φ_{PP} | - | Volomengehalt Polypropylen |
| $\varphi_{\text{Porosität}}$ | - | Porositätsgehalt |
| ψ_{NF} | - | Massegehalt Naturfasern |
| ψ_{PP} | - | Massegehalt Polypropylen |

Kurzfassung

Die konventionelle Verarbeitung naturfaserverstärkter, thermoplastischer Kunststoffe zu Bauteilen erfolgt derzeit in einem aufwändigen, mehrstufigen Pressverfahren, welches mit hohen Investitionskosten und hohem Platzbedarf verbunden ist. Ausgangsmaterial bilden Hybridvliese aus Naturfasern und thermoplastischen Schmelzfasern, welche eine Straße mit mindestens zwei Pressen durchlaufen müssen. In der Heizpresse wird das Vlies unter Wärmezufuhr und Druck kompaktiert und die Naturfasern dabei imprägniert. Anschließend erfolgt die Formgebung in einer Umformpresse. Das Verfahren hat den wirtschaftlich großen Nachteil, dass die Imprägnierung und die Formgebung zeitlich wie räumlich direkt aneinander gekoppelt sind, da es keine Alternative zur Erwärmung der Hybridvliese mit gleichzeitiger Imprägnierung gibt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuartiger Aufheizprozess für naturfaserverstärkte Thermoplaste auf Basis von Infrarotstrahlung entwickelt, der diese Probleme aufgreift. Als Ausgangsmaterial hierfür werden bereits imprägnierte und vorkompaktierte Naturfasermatten verwendet, mit denen die hocheffizienten Thermoform-Prozessketten genutzt werden sollen, wie sie beispielsweise bei glas- oder kohlenstofffaserverstärkten Thermoplasten zum Einsatz kommen. Aufgrund der thermischen Restriktionen von Naturfasern bei der Verarbeitung wird eine materialelektive Infrarot-Erwärmungsmethode konzipiert und untersucht, deren Ziel eine optimierte, maximierte Absorption der Strahlung durch das Polymer darstellt. Es wird gewährleistet, dass die Absorption durch Naturfasern auch bei der Variation der Rohstoffqualität minimal ist. So können auch geringfügig kompaktierte Naturfaser-Halbzeuge mit hohem Porengehalt mithilfe des Aufheizprozesses auf eine ausreichende Umformtemperatur erwärmt werden, ohne die Verstärkungsfasern thermisch zu schädigen. Die Untersuchung des Prozesseinflusses im Hinblick auf mechanische Eigenschaften sowie Geruch und Emissionen validiert die Großserientauglichkeit des entwickelten Aufheizverfahrens.

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in Richtlinien für die Verarbeitung thermoplastischer, vorimprägnierter und kompaktierter, naturfaserverstärkter Kunststoffe zusammengefasst und sollen dem Verarbeiter eine gezielte Auswahl von Halbzeugen und die Minimierung der Prozesszykluszeit ermöglichen.

Abstract

Natural fiber reinforced polymers have been used since decades for semi-structural applications in the automotive industry like door panels, roof stiffenings, backrests and others. Compared to glass fibers, natural fibers have a lower density and, in combination with good mechanical properties, a good lightweight potential. Moreover, the production of natural fiber composites can save up to three-fourths of the greenhouse gas emissions compared to a similar part made of glass fiber composites. By now, there is a trend in applying thermoplastic based natural fiber composites, because they can be manufactured by using novel hybrid processing methods like thermoforming with a simultaneous back injection. The weight of a door panel processed thereby can be reduced furthermore by 20 % compared to a conventional natural fiber composite door.

However, the conventional processing of thermoplastic natural fiber composites is performed by a multi-stage press process, associated with high investment costs and floor space requirement. The basic material for this process is a hybrid nonwoven consisting of natural fibers and thermoplastic melt fibers. It passes through a press plant with at least two presses. The first one is the compression molding press in which the nonwoven is compacted and heated to melt the polymer fibers and impregnate the natural fibers. Afterwards, the forming process to a finished component takes place in a forming press. The great economic disadvantage of this process is the fact that impregnation and forming are directly linked to one another, because there is no alternative for the heating of hybrid nonwovens with simultaneous impregnation possibility. The highly efficient and automated thermoforming processes used to produce glass or carbon fiber reinforced thermoplastic polymers, cannot be applied for natural fiber composites.

Therefore, the aim of this work is to address these disadvantages by developing a novel heating method for thermoplastic based natural fiber composites based on infrared radiation. The basic material for this process is an impregnated and precompacted natural fiber mat similar to already applied glass or carbon fiber organic sheets. By means of natural fiber organic sheets, the efficient thermoforming process chains can be used for the manufacture of parts.

Due to thermal constraints of natural fibers, an absorption optimized infrared heating method is designed and investigated. Goal is a selective, maximized absorption of radiation by the polymer, which can only be met by using a middle-wave infrared heater.

Also, the absorption is minimized for natural fibers regardless of their retting degree or chemical composition. First Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) tests show that a completely selective heating of the polymer is not possible due to the superposition of the spectra of both material partners. However, the radiation absorption by the polymer is higher than for natural fibers at heater temperatures below 625 °C. Experimental studies validate these findings and show an optimum temperature process window for the infrared heater between 500 °C and 590 °C. In the following course of the work, a temperature of 572 °C has been selected as compromise between quick and careful heating of natural fiber organic sheets.

In a next step, FTIR tests were performed on hemp fibers with different retting degrees and thus, different colors. Almost the entire spectrum of natural fiber colors could be investigated by selecting fibers with minimum and maximum retting degrees. The results show that the change of absorption in the interesting region of wavelengths for different retting degrees is minimum and does not affect the heating time and the surface temperature of specimens significantly. Also, different chemical compositions were tested by chemical separation of individual constituents of natural fibers. Again, there is no significant change in infrared heating behavior of natural fibers with diverse chemical compositions. For the heating concept, this means that the absorption cannot be optimized by using a specific natural fiber type. However, there is also no risk and no need for restrictions concerning the raw material selection.

The organic sheet condition, that is the area weight and the compaction, has the greatest influence on the heating behavior. A greater compaction of organic sheets is more expensive and difficult than a light compaction of nonwovens to low densities and high porosities. However, a low density and high porosity may adversely influence the infrared heating behavior of the sheets, since the entrapped air has a very low thermal conductivity and leads to self-insulation. Comprehensive infrared heating investigations were performed with natural fiber organic sheets with area weights between 1000 g/m² and 1700 g/m², which were compacted to thicknesses between 2 mm and 4 mm. It could be shown that the area weight of the sheets significantly influences the heating time, whereas the thickness of the sheets determines the surface temperature. Both factors could be described mathematically for a development of processing guidelines.

The examination of the process result showed that the selection of the forming temperature does not influence the mechanical performance, so that the forming temperature can be selected according to the degree of deformation to avoid wrinkling. The mechanical performance is mainly determined by the final part density. Also the odor of the heated organic sheets is not worse than the odor of calibrated nonwovens, although the organic sheets are exposed to high temperatures twice. All in all, it could also be shown that the emissions of the finished parts made of natural fiber organic sheets are on average as high as the emissions of conventional natural fiber materials.

At the end of this work, the results are summarized in guidelines for the processing of natural fiber organic sheets. The guidelines offer the possibility to select an appropriate natural fiber organic sheet according to the desired heating and emission properties.

The development of a material selective IR heating method is a basis for the automation and further weight reduction of natural fiber parts. The research results are a first major step towards the improvement of the competitiveness of natural fiber parts compared to glass fiber composites. This can lead to new applications and markets for thermoplastic based natural fiber composites.

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Verbrennung fossiler Energieträger durch den Menschen setzt klimawirksame Spurengase wie Kohlenstoffdioxid (CO₂) in die Erdatmosphäre frei, welche einen Teil der Sonneneinstrahlung absorbieren und wieder zurück zur Erde emittieren. Die dadurch verursachte Erderwärmung wird anthropogener Treibhauseffekt genannt, und seine Folgen und Risiken für das Klima sind schwer einzuschätzen, wobei Experten einhellig weitreichende, negative Folgen erwarten [1, 2]. Ausgehend von der Erkenntnis dieses Zusammenhangs kam es zum Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls in 2005 und der nachfolgenden Vereinbarungen der Pariser Klimaschutzabkommen in 2015, welche die Automobilindustrie unter Druck setzen, umweltfreundlichere Fahrzeuge zu entwickeln, die sowohl in der Herstellung als auch während des späteren Gebrauchs weniger Treibhausgase freisetzen [3, 4]. Laut der europäischen Verordnung EG Nr. 443/2009 müssen neu zugelassene Personenkraftwagen seit 2015 weniger als durchschnittlich 130 g CO₂ pro gefahrenem Kilometer emittieren. Bis 2021 soll der Durchschnittswert auf 95 g/km CO₂ gesenkt werden [5]. Allerdings erhöhen die seit den 90-er Jahren aufgekommenen Sicherheits- und Komfortsysteme sowie die Elektrifizierung das Fahrzeuggewicht drastisch, wodurch es auch wiederum zur Zunahme des Kraftstoffverbrauchs und damit einhergehend auch der klimawirksamen Emissionen kommt [6].

Um diese Gewichtsspirale umzukehren und einen Beitrag zur Ressourceneffizienz zu leisten, gehört die Förderung von Leichtbautechnologien zur strategischen Innovationspolitik der Bundesregierung [7]. Aufgrund ihrer hohen mechanischen Performance bei gleichzeitig geringem Gewicht weisen Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) ein besonders hohes Leichtbaupotenzial auf und ersetzen so branchenübergreifend immer mehr konventionelle Kunststoffe und auch Metalle. Widersprüchlich zur Ressourceneffizienz ist jedoch der hohe CO₂-Footprint von konventionellen FKV mit Glas- und Kohlenstofffasern (GFK, bzw. CFK), da sowohl die Herstellung der Verstärkungsfasern als auch die Verarbeitung zu FKV energieintensiv ist [8].

Großes Potenzial zur Auflösung dieses Widerspruchs bieten naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK). Speziell pflanzliche Fasern wie Flachs, Hanf und Kenaf entziehen der Erdatmosphäre während ihres natürlichen Wachstums durch Photosynthese un-

gefähr 1,3 kg - 1,4 kg CO₂ pro kg Faser [9]. Der Primärenergieverbrauch für die Herstellung von Hanffasern ist ca. 95 % geringer als für Kohlenstofffasern und 85 % geringer als für Glasfasern [10]. Mechanisch gesehen haben Pflanzenfasern den Vorteil, dass sie mit 1,5 g/cm³ eine deutlich geringere Dichte als Glasfasern mit 2,5 g/cm³ haben und somit herausragende Leichtbaueigenschaften besitzen. Darüber hinaus werden sie auch wegen ihres splitterfreien Crashverhaltens, den guten Dämpfungseigenschaften und ihrer Formstabilität eingesetzt [11]. Die spezifischen mechanischen Eigenschaften von NFK reichen teilweise fast bis an die von GFK heran, erreichen ihr Niveau jedoch nicht vollständig. Daher besitzen sie ein großes Substitutionspotenzial und können heute schon konventionelle teure Kunststoffe sowie GFK-Strukturen zum Teil ersetzen [12]. Abbildung 1.1 zeigt die spezifische Festigkeit über der spezifischen Steifigkeit von kommerziell verfügbaren naturfaserverstärkten Duroplasten (NF/Duroplast), naturfaserverstärktem Polypropylen (NF/PP) sowie im Heißpressverfahren verarbeiteten holzfaserverstärkten Duroplasten (WPC) im Vergleich zu konventionellen, bspw. in der Automobilindustrie eingesetzten Thermoplasten wie Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Polypropylen (PP) mit Talkum, Sheet Molding Compound (SMC), langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) sowie glasmattenverstärkten Kunststoffen (GMT).

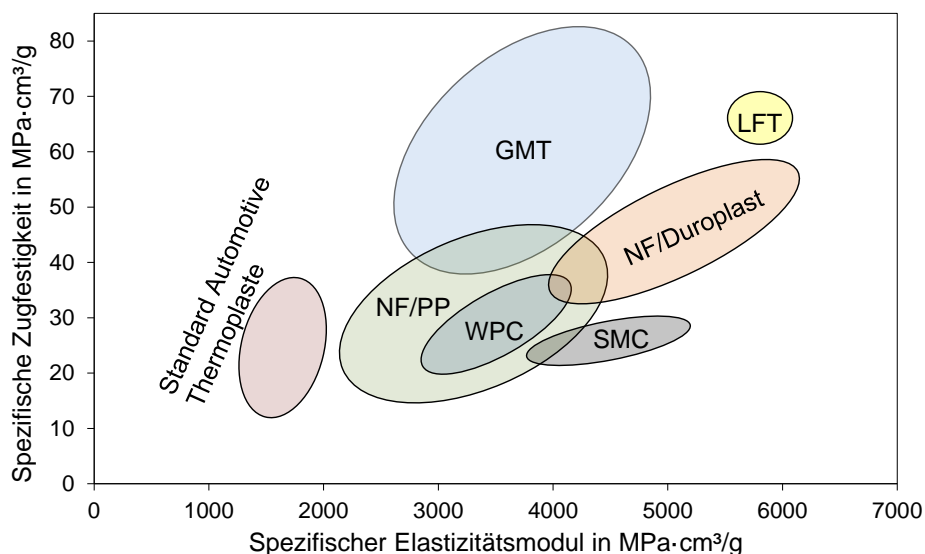


Abbildung 1.1: NFK im Vergleich zu konventionellen FKV

1.1 Naturfaserverstärkte Kunststoffe im Automobilbau

Speziell in der Automobilbranche eignen NFK sich aufgrund ihres Eigenschaftsprofils primär für semi-strukturelle Bauteile wie Türverkleidungen und Dachversteifungen, wofür sie bereits seit Jahrzehnten Anwendung finden [13]. Derzeit enthält ein europäisches Automobil durchschnittlich 4 kg Natur- und Holzfasern [14], wobei die mengenmäßig bedeutendsten natürlichen Verstärkungsfasern in FKV die Pflanzenfasern Flachs (50 %), Hanf (12 %) und Kenaf (20 %) sind [15]. Rein bei der Herstellung von Türverkleidungen können material- und prozessbedingt 45 % Energie und bis zu 28 % Treibhausgasemissionen im Vergleich zu konventionellen Türverkleidungen aus Standardkunststoffen wie ABS eingespart werden [10]. Verglichen mit GFK-Türverkleidungen können sogar bis zu 74 % Treibhausgasemissionen eingespart werden [10]. Für die Automobilindustrie ist dabei neben der technischen Performance und der positiven Energiebilanz auch die ökonomische Perspektive interessant.

Während der Verbrauch fossiler Energieträger ökonomische Abhängigkeitsverhältnisse und politische Unruhen verursacht, unterliegt der Preis von Naturfasern überwiegend saisonalen Schwankungen und liegt ungefähr zwischen 0,4 USD - 3 USD [10, 16]. Besonders subtropische Fasern wie Kenaf, aber auch der überwiegend in Europa angebaute Hanf sind für die Automobilindustrie ökonomisch bedeutsam, da ihr Preis unabhängig von der Textilindustrie ist [17, 18]. Im Gegensatz dazu ist das Hauptwerterschöpfungsprodukt der Flachspflanze die textile Langfaser, wobei der für die Herstellung von FKV verwendete Flachswerg lediglich als Beiprodukt anfällt. Dieser findet allerdings durch die starke Nachfrage und Modetrends der letzten Jahre inzwischen auch Verwendung in der chinesischen Textilbranche, sodass der Preis für technisch nutzbare Flachsfasern seit 2010 über 50 % gestiegen ist [17, 19].

Derzeit gibt es einen eindeutigen Entwicklungstrend hin zur Verwendung von NFK mit thermoplastischer Matrix [14]. In der Vergangenheit wurde bislang weder das Material- noch das Prozesspotenzial voll ausgeschöpft. Mit neuartigen hybriden Formpressverfahren, in denen gleichzeitig ein Tiefziehen und Hinterspritzen des thermoplastischen NFK möglich ist, lässt sich inzwischen das Gewicht eines Türträgers um weitere 20 % gegenüber konventionellem NF/PP einsparen [20]. Allerdings ist für die Herstellung von NFK-Bauteilen mit thermoplastischer Matrix immer ein mehrstufiger Pressprozess

mit erheblichem Platzbedarf und Investitionen notwendig, der schematisch in Abbildung 1.2 beschrieben ist.

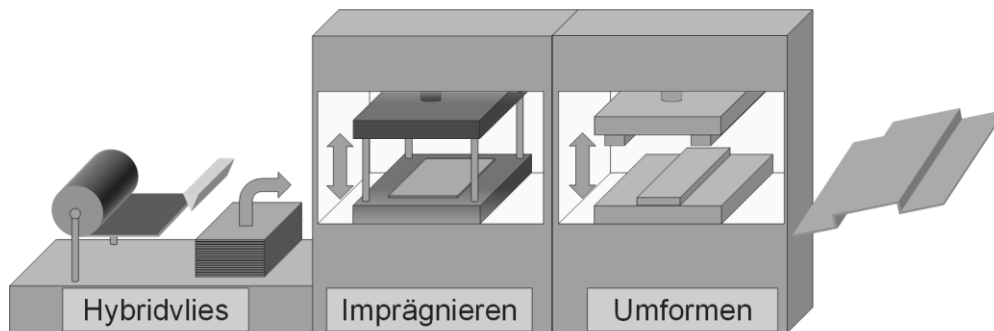


Abbildung 1.2: Mehrstufiger Pressprozess für die Herstellung von NFK-Bauteilen

Das Ausgangsmaterial bilden Hybridvliese aus Naturasern und thermoplastischen Schmelzfasern, welche nur unter Wärmezufuhr und Druck in einer Kontaktheizpresse die Naturfasern imprägnieren und das Vlies vorkompaktieren, bevor es in einer weiteren Presse im Niedertemperaturwerkzeug umgeformt und auf die gewünschte Enddicke kompaktiert wird. Besonders nachteilig hierbei ist, dass die Imprägnierung in der Kontaktheizpresse und die Formgebung in der Umformpresse (mit oder ohne Hinterspritzen) zeitlich wie räumlich direkt aneinandergeschlossen sind, da es keine Alternative zur Erwärmung der Hybridvliese mit gleichzeitiger Imprägnierung gibt. Eine Imprägnierung im Umformwerkzeug sollte möglichst vermieden werden, da sie mit prozessverlängernden Zusatzmaßnahmen wie der Erhöhung des Pressdrucks oder geringerer Abkühlrate einhergehen müsste [21]. Die hocheffizienten Thermoform-Prozessketten, wie sie beispielsweise bei glas- oder kohlenstofffaserverstärkten Thermoplasten zum Einsatz kommen, können dadurch nicht genutzt werden. Aus diesem Grund ist der Marktanteil von NFK auf duroplastischer Basis mit 45 % immer noch sehr hoch [15]. Duroplastische Systeme ermöglichen den Automobilzulieferern eine Verarbeitung auf bereits verfügbarem Equipment, da für die einstufige Herstellung von Bauteilen nur eine Heißpresse benötigt wird [14]. Um eine weitere Marktdurchdringung von thermoplastischen NFK und insbesondere NF/PP zu erreichen, muss der Verarbeitungsprozess weiterentwickelt werden.

1.2 Potenziale und Herausforderungen von Naturfaser-Thermoplast-Halbzeugen

Als Organobleche (OB) werden flächige, faserverstärkte Thermoplast-Halbzeuge bezeichnet, die vollständig imprägniert und konsolidiert sind [22]. Die Faserverstärkung, meist aus Glas- oder Kohlenstofffasern, liegt dabei gewöhnlich in Form eines Gewebes oder Geleges vor [23]. OB können bspw. im sogenannten Thermoformverfahren zu Bauteilen verarbeitet werden, indem sie zunächst über die Schmelztemperatur des Thermoplasten erwärmt und anschließend in einem Schritt in einem Niedertemperaturwerkzeug umgeformt werden, wobei Taktzeiten von unter einer Minute erreicht werden können. [22]

Im Rahmen dieser Arbeit sollen vollständig imprägnierte naturfaservliesverstärkte Thermoplast-Halbzeuge betrachtet werden, die im weiteren Verlauf der Arbeit als Naturfaser-Organobleche (NFOB) bezeichnet werden. Im Gegensatz zu konventionellen OB ist eine vollständige Konsolidierung bei NFK aufgrund der inhärenten Hohlstruktur der Fasern einerseits nicht realisierbar, andererseits auch nicht erwünscht, da dies zu Faserschädigung und verringerter Crash-Performance führen kann [24, 25]. Darüber hinaus liegt die Faserverstärkung aufgrund der wachstumsbedingten, endlichen Länge der Naturfasern als Wirrvlies vor.

Die Verwendung von GFK-/CFK-Organoblechen kann erhebliche ökonomische Vorteile gegenüber duroplastischen Verfahren aufweisen [22]. Dies liegt vor allem an der zeitlichen wie räumlichen Trennung von Imprägnierung und Formgebung, die unter anderem eine Automatisierung erlaubt. Bisher konnten diese Potenziale konventioneller OB aber nicht auf NFOB übertragen werden. Um den breiten industriellen Einsatz zu ermöglichen gibt es Forschungsbemühungen, effiziente Prozessketten durch die Herstellung von NFOB in kontinuierlichen Prozessen zu realisieren [26, 27]. Die Problematik liegt aber vor allem in ihrer Weiterverarbeitung begründet, da OB generell vor der Umformung im Thermoformverfahren erwärmt werden müssen. Die thermische Sensibilität von Naturfasern erfordert eine besonders gezielte Prozessführung. Es ergibt sich ein Spannungsfeld aus der Anforderung, die Mindesttemperatur für eine Umformung zu erreichen und der Gefahr, die NF thermisch zu schädigen. Diese Herausforderung wurde für NFOB bisher noch nicht zufriedenstellend gelöst, sodass die

Verarbeitung thermoplastischer NFK immer noch im aufwendigen, mehrstufigen Pressprozess mit Vliesen als Ausgangsmaterial geschieht.

Durch einen geeigneten, großserientauglichen Aufheizprozess für NFOB könnte der zur Halbzeugherstellung erforderliche zusätzliche Prozessschritt ökonomisch mehr als aufgewogen werden. Wesentliche Vorteile sind [28, 29]:

- Geringerer Logistikaufwand und Platzbedarf aufgrund einer um bis zu 75 % geringeren Wandstärke von NFOB im Vergleich zu Vliesen
- Zeitlich unbegrenzte Lager- und Transportfähigkeit, da die biologisch anfälligen Naturfasern bereits imprägniert vorliegen
- Beliebig kombinierbare Halbzeuge (bspw. Möglichkeit für multiple Lamine sowie Decklagen in Sandwichaufbauten)
- Keine Notwendigkeit für Trennfolien beim Thermoformen, da die NFOB bereits imprägniert und vorkompaktiert sind, was die Anhaftung minimiert
- Hohe Flexibilität bei der Anlagenplanung, da die Kontaktheizpresse wegfällt
- Hohe Materialeffizienz durch Zuschnitt und konturtreues Kompaktieren, da Vliesverschnitt anderweitig verwendet werden kann

Um einen geeigneten Aufheizprozess zu entwickeln, ist es wichtig, die Einflussfaktoren in der gesamten Prozesskette zur Herstellung eines NFK-Bauteils zu kennen. Während die Unkenntnis über Einflussfaktoren bei der Herstellung von NFK-Formteilen eine Gefahr für die mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie die reproduzierbare Prozessführung darstellt, kann ein entsprechendes Know-how dabei helfen, den Prozess ökonomisch zu optimieren und dennoch die Materialeigenschaften optimal auszuschöpfen.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines großserientauglichen Aufheizprozesses für NFOB mit dem Ziel, effizientere Prozessketten zur Herstellung von NFK-Bauteilen zu ermöglichen und gleichzeitig die hohen Anforderungen der Automobilindustrie an das Material in Bezug auf mechanische Eigenschaften und vor allem Emissionen und Geruch zu erfüllen. Aufgrund der erwarteten komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Faserrohmaterial, den Eigenschaften der Hybridvliese und den vorkompaktierten NFOB auf die Wärmeübertragung in das Material, muss

eine ganzheitliche Herangehensweise gewählt werden, welche neben der theoretischen Konzeptentwicklung des Erwärmungsvorgangs auch die Rohstoff- und Halbzeugauswahl abdeckt. Die Halbzeugentwicklung steht dabei nicht im Fokus dieser Arbeit. NFOB-Halbzeuge können im Großserienmaßstab auf kontinuierlichen Doppelband- oder Intervallheißpressen hergestellt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen dem Verarbeiter daher folgende Möglichkeiten eröffnen:

- Neuer, großserientauglicher Aufheizprozess, der die effiziente Nutzung des Thermoformverfahrens zur Herstellung von NFK-Bauteilen ermöglicht
- Gezielte, Zykluszeit-optimierte Auswahl von Naturfaser-Halbzeugen (NFOB) für den neuen Prozess
- Prozessoptimierung im Hinblick auf Umformgrad und Emissionen sowie Geruchsentwicklung des Endbauteils

Primäres Ziel der Entwicklung eines neuen Aufheizprozesses ist die zeitliche und räumliche Trennung der Imprägnierung von der Formgebung. Die Erwärmungsmethode soll für die für FKV mengenmäßig am häufigsten eingesetzten Langnaturfasern Hanf, Flachs und Kenaf gültig sein und die Gesamt-Zykluszeit soll die Zykluszeit des konventionellen, mehrstufigen Pressprozesses nicht überschreiten. Die Vorgehensweise der Arbeit ist in Abbildung 1.3 gezeigt.

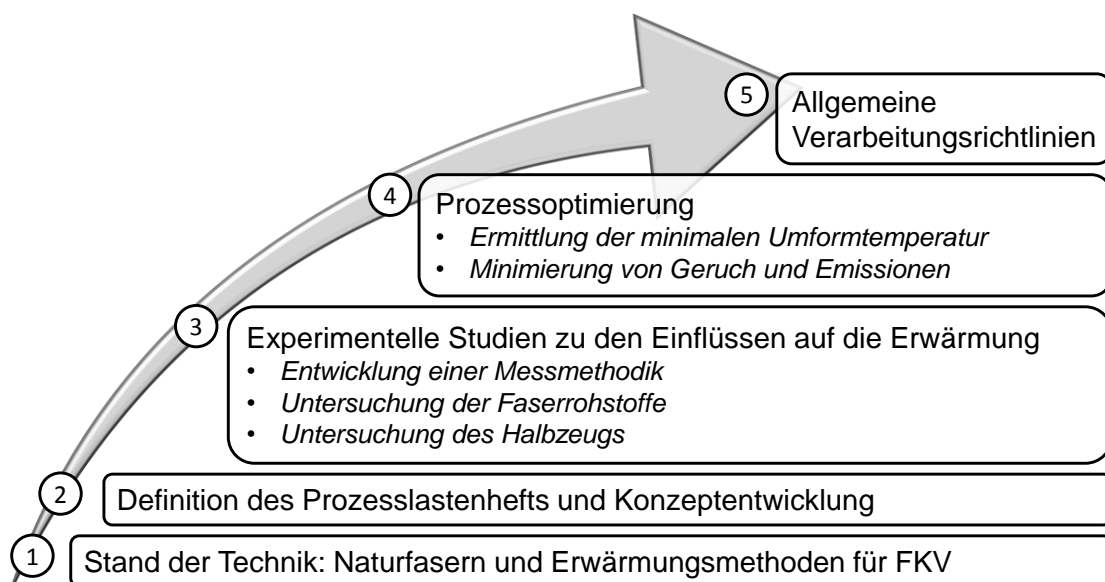


Abbildung 1.3: Aufbau und Vorgehensweise der Arbeit

1. Zu Beginn wird der Stand der Technik im Hinblick auf Naturfasern und ihre Verarbeitung bis hin zu NFK betrachtet. Weiterhin werden Erwärmungsmöglichkeiten für FKV behandelt.
2. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird ein Prozesslastenheft erstellt, welches wiederum Grundlage für die Entwicklung eines neuen Konzepts für einen großserientauglichen Aufheizprozess für NFOB ist.
3. Im experimentellen Teil wird zunächst eine Messmethodik entwickelt, mit der es möglich ist, relevante Einflussfaktoren auf die Erwärmung von NFOB zu untersuchen. Diese werden anschließend genutzt, um einerseits den Einfluss der Naturfaser-Rohstoffqualität und andererseits den Einfluss der Vorkompaktierung der NFOB auf den Prozessverlauf und das -ergebnis zu untersuchen.
4. Die Prozessoptimierung dient in erster Linie der Minimierung der Zykluszeit, indem die erforderliche Mindest-Umformtemperatur der bereits imprägnierten NFOB ermittelt wird. Darüber hinaus sollen die Maximaltemperaturen bei der Herstellung der NFOB und ihrer nochmaligen Erwärmung im Hinblick auf Emissionen und Geruchsentwicklung optimiert werden.
5. Basierend auf den Ergebnissen des experimentellen Teils und der Prozessoptimierung werden allgemeingültige Richtlinien für die Erwärmung von NFOB definiert.

2 Stand der Technik

2.1 Definition von Naturfasern

Naturfasern sind „linienförmige Gebilde, die sich textil verarbeiten lassen“ (DIN 60001-1) [30]. Darunter sind organische und insbesondere pflanzliche Fasern für technische Anwendungen von besonderem Interesse, da sie zu den nachwachsenden Rohstoffen gehören und während ihres natürlichen Wachstums in der Lage sind, der Erdatmosphäre durch Photosynthese CO_2 zu entziehen [31]. Die Historie und Beschreibung von in der Natur vorkommenden Fasermaterialien und ihrer industriellen Anwendung werden in [32-35] ausführlich beschrieben.

Als Verstärkung von Verbundwerkstoffen in industriellen Anwendungen werden insbesondere Bastfasern wie Flachs, Hanf und Kenaf verwendet, aber auch Blatt-, Samen-, Frucht- und Holzfasern [15]. Die mechanischen Eigenschaften von Naturfasern werden oft mit den Eigenschaften von Standardglasfasern (E-Glas) als Verstärkung in Verbundwerkstoffen verglichen, da sie hier ihr größtes Substitutionspotenzial haben. In Abbildung 2.1 ist erkennbar, dass einige Bastfasern wie Flachs und Hanf die Steifigkeit von E-Glas sogar übertreffen können, allerdings ist ihre Festigkeit immer geringer.

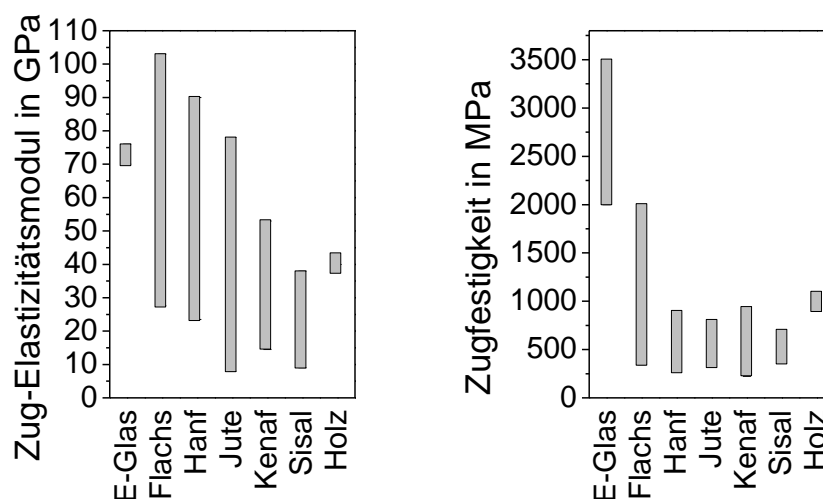


Abbildung 2.1: Zugeigenschaften ausgewählter Naturfasern im Vergleich zu E-Glasfasern nach [33, 36-39]

Aufgrund der geringen Naturfaserdichte von $1,5 \text{ g/cm}^3$ kann die spezifische Steifigkeit im Vergleich zu Glasfasern mit einer Dichte von $2,5 \text{ g/cm}^3$ in Anwendungen vorteilhaft

sein, in denen eine hohe Steifigkeit und geringes Gewicht gefordert werden, während die Endfestigkeit eine untergeordnete Rolle spielt.

Die Literaturwerte der mechanischen Eigenschaften zeigen üblicherweise große Abweichungen, da die Zusammensetzung von Naturfasern von vielen, vom Menschen kaum beeinflussbaren Faktoren wie den klimatischen Bedingungen, der Bodenbeschaffenheit, dem Anbauort sowie der Fasergewinnung abhängen. Darüber hinaus ist die Bestimmung der intrinsischen Fasereigenschaften nicht trivial und oft nicht reproduzierbar. Das ist auf Methoden zur Bestimmung der Einzelfaserfestigkeit und der statistischen Auswertung zurückzuführen, da der Durchmesser der Fasern nicht konstant ist und die Eigenschaften maßgeblich von der Einspannlänge abhängen [33].

2.1.1 Aufbau von Bastfasern

Als Bastfasern werden diejenigen Naturfasern verstanden, welche aus Stängeln von zweikeimblättrigen, krautigen Pflanzen gewonnen werden und deren technisch nutzbare Faserbündel im Bast der Pflanze zu finden sind. Ihr prinzipiell immer gleicher Aufbau ist schematisch vom Stängel bis zu den Mikrofibrillen in Abbildung 2.2 dargestellt.

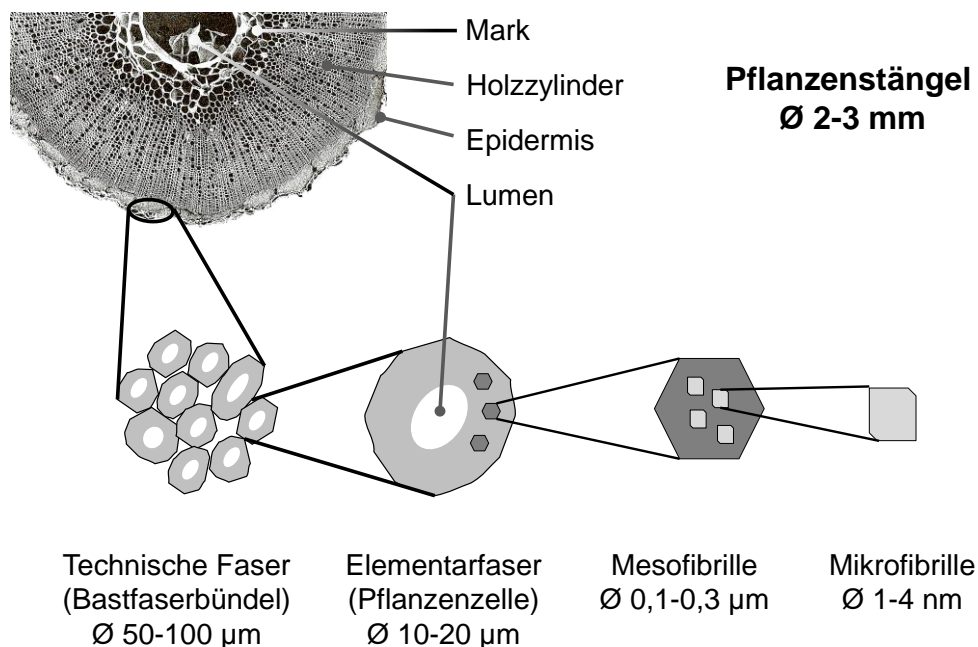


Abbildung 2.2: Aufbau von Bastfasern nach [35, 40]

Die Epidermis stellt die äußerste, von einer Wachsschicht überzogene Gewebeschicht dar, unter der die Elementarfasern in 20 bis 50 getrennten Bündeln vorliegen, welche als technische Faser bezeichnet werden. Eine technische Bastfaser besteht durchschnittlich aus 10 - 40 Elementarfasern, welche einerseits durch Lignin an die Außenstruktur der Pflanze und andererseits durch Pektin und Hemicellulose miteinander verklebt sind. Sowohl der Pflanzenstängel als auch die Elementarfaser besitzen ein Lumen, welcher als Hohlraum für die geringe Dichte der Naturfasern verantwortlich ist. Die Elementarfasern bestehen zu einem großen Teil aus Cellulose, die wiederum aus orientierten, hochkristallinen Mikrofibrillen besteht, welche durch die amorphe Hemicellulose verklebt sind [40]. Weitere Bestandteile der Elementarfasern sind Pektin, Lignin und Wachse (auf der Oberfläche der Faser). Die chemische Zusammensetzung verschiedener Naturfasern ist in Tabelle 2.1 gezeigt. Auch hier zeigen die Literaturwerte üblicherweise große Abweichungen aus denselben Gründen wie bei den mechanischen Eigenschaften. Die Qualität und Gleichmäßigkeit der Fasern steigt mit höherem Cellulosegehalt, welcher auch für die mechanischen Eigenschaften ausschlaggebend ist [41, 42].

Tabelle 2.1: Hauptbestandteile verschiedener Naturfasern [16, 36, 43]

| Faser | Cellulose in Gew.-% | Hemicellulose in Gew.-% | Lignin in Gew.-% | Pektin in Gew.-% | Wachs in Gew.-% |
|--------|------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Flachs | 56-78 | 16-20,6 | 2,2-5 | 2,3 | 1,5-1,7 |
| Hanf | 67-74,4 | 15-22,4 | 3,3-10 | 0,9 | 0,5-0,8 |
| Kenaf | 31-72 | 20,3-21,5 | 8-19 | 3-5 | - |
| Jute | 59-72,4 | 12-20,4 | 11,8-14,2 | 0,2-0,4 | 0,5 |
| Ramie | 68,6-85 | 13-16,7 | 0,5-0,7 | 1,9 | 0,3 |

Im Gegensatz zu künstlich hergestellten Fasern sind Bastfasern in der Länge durch den Pflanzenstängel begrenzt. Aus dem natürlichen Werkstoffverbund des Stängels werden sie mittels enzymatischer, chemischer oder mikrobieller Degradation von Pflanzenbestandteilen herausgelöst, was im Allgemeinen als Faserröste bezeichnet wird [33].

2.1.2 Bastfaserröste und chemische Erhöhung des Celluloseanteils

Das Wort „Rösten“ ist vom Begriff „Rotten“, bzw. „Faulen“ abgeleitet und bezeichnet im Allgemeinen die Freilegung von Fasern aus dem Pflanzenstängel [35]. In Abbildung 2.3 ist eine Unterteilung der bekanntesten Faseraufschlussverfahren gezeigt.

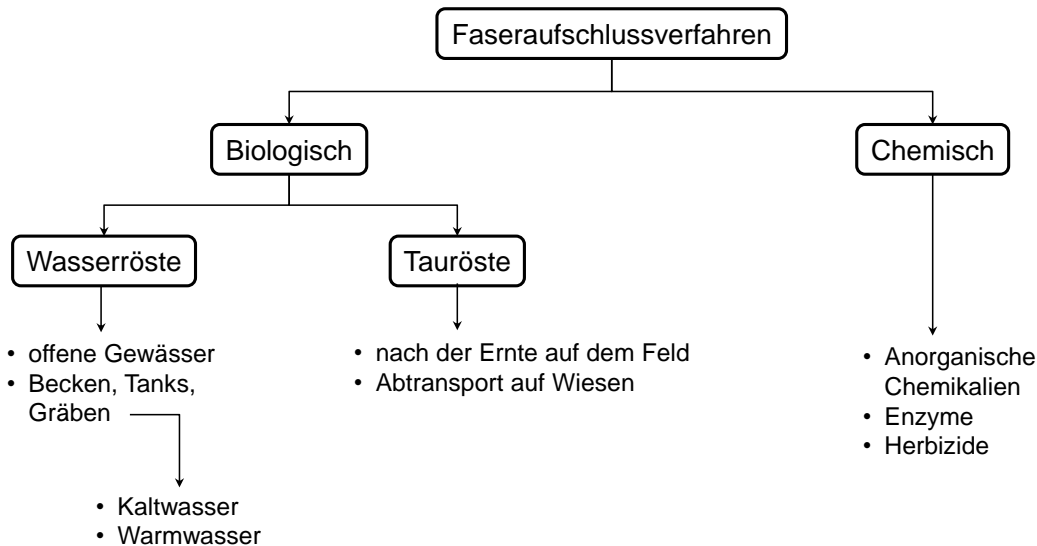


Abbildung 2.3: Bekannteste Faseraufschlussverfahren für Bastfasern nach [35]

Bei biologischen Methoden geschieht die Faserröste durch Fäulnisvorgänge, indem Bakterien und Pilze vorwiegend die pektinhaltigen, aber auch die weiteren Nebenbestandteile der Fasern zersetzen [44]. Bei rechtzeitig abgebrochenem Röstprozess werden die aus Cellulose bestehenden Faserbündel nicht oder nur marginal angegriffen. Der biologische Röstvorgang geschieht entweder durch vollständiges Eintauchen der Fasern in Wasser (Wasserröste) oder durch den Einfluss von Tau und Regen (Tauröste), indem die Fasern auf dem Feld liegen gelassen werden.

Aufgrund sehr guter Kontrollierbarkeit kann durch die Wasserröste eine hohe und reproduzierbare Faserqualität gesichert werden. Allerdings sind der Fasergeruch und die Schadstoffbelastung von Gewässern durch die Fermentationsprodukte beim Röstvorgang sehr hoch, weshalb die Wasserröste in Europa seit den 50-er Jahren eingestellt wurde [33]. Stattdessen wird für Hanf und Flachs die Feldröste angewandt, die zu einem höherem Pektingehalt führt, was den Glanz und die Griffigkeit der Faser verbessert. Allerdings ist die Tauröste stark witterungsabhängig und die einzelnen Nebenbestandteile der Fasern werden unkontrollierbar abgebaut, sodass hohe Schwankungen in der Faserqualität auftreten können [33, 45, 46].

Bestrebungen, den Faseraufschluss durch kontrollierbare Alternativen, beispielsweise durch chemische oder enzymatische Behandlung der Fasern, zu ersetzen, beschränken sich meist auf den akademischen Bereich. Oftmals reicht die Faserqualität nicht an wasser- oder taugeröstete Fasern heran oder die chemische Behandlung ist kostenintensiv und nicht im Großmaßstab anwendbar [33].

Ein definiertes Eigenschaftsprofil in NFK ist durch die Erhöhung des Cellulosegehalts von bereits gerösteten Naturfasern mithilfe chemischer Auswaschung der einzelnen Nebenbestandteile erreichbar [41, 43, 47]. Abbildung 2.4 zeigt einen Überblick über diese Behandlungsmöglichkeit, bei der jeder einzelne Nebenbestandteil von Bastfasern unabhängig voneinander ausgewaschen werden kann, sodass ein definiertes Eigenschaftsprofil der Faser, beziehungsweise eine cellulosereiche Faser hergestellt wird.

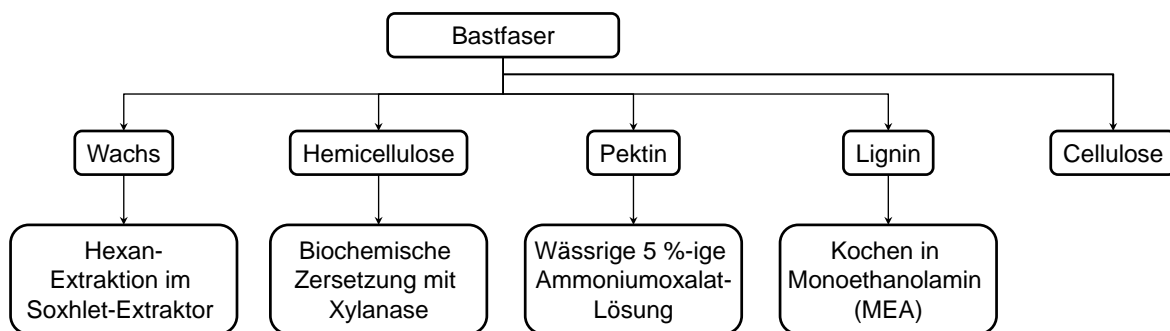


Abbildung 2.4: Möglichkeiten zur selektiven Faserwaschung nach [43]

Die Auswahl von Naturfasern einer bestimmten chemischen Zusammensetzung oder eines bestimmten Röstgrades durch den Verarbeiter erfolgt im Allgemeinen empirisch, wobei bislang meist die mechanischen Eigenschaften und die Geruchsentwicklung im Vordergrund stehen. Für eine gezielte Auswahl von Rohmaterialien für diverse Anwendungen ist daher die genaue Kenntnis des Naturfaser-Röstgrades von entscheidender Bedeutung.

2.1.3 Bestimmung des Röstgrades von Naturfasern

Der Röstgrad von Naturfasern, der im Allgemeinen die Qualität einer Faser bestimmt, lässt sich quantitativ schwer bestimmen, da der Pektingehalt mit dem Ausgangs-Pektingehalt einer ungerösteten Faser verglichen werden müsste [48]. Im Allgemeinen

werden heute drei Methoden zur Bestimmung des Röstgrades verwendet, die einen Vergleich untereinander zulassen und nachfolgend erklärt werden.

Eine Möglichkeit, den Röstgrad noch vor dem Faseraufschluss, d. h. am Hanfstroh zu ermitteln, bietet die Boniturskala nach Schurig-Kocurek [49]. Dabei werden die Färbung der Epidermis (von grün bis nicht sichtbar), der Anteil und die Färbung der Pilzkolonien am Stängel (von 0 % bis 100 %), die Färbung des Holzteils (von hellgrün-hellbeige bis nicht sichtbar), der Anteil und die Färbung der Pilzkolonien an der Holzoberfläche (von nicht sichtbar bis 100 % schwarz) sowie die Verbindung zwischen Rinde und Holz (von manuell sehr schwer ablösbar bis selbstablösend) in 7 Boniturnoten eingeteilt [49]. Die Boniturskala ist im Anhang in Abbildung 9.1 zu sehen.

Für die Bestimmung des Röstgrades an der aufgeschlossenen Faser für technische Anwendungen werden meist genormte Farbskalen wie in Abbildung 2.5 herangezogen, in denen die Farbe von Naturfasern in 10 verschiedene Klassen unterteilt wird [50]. Röstklasse 1 sind schwach geröstete, bzw. grüne Fasern, wobei die Röstklasse 10 maximal geröstete Fasern repräsentiert.



Abbildung 2.5: Farbklassennormierung des Österreichischen Instituts für Bautechnik für Hanffasern [51, 52]

Nachteilig bei visuellen Bestimmungen der Röstklasse sind der subjektive Einfluss und die Erfahrung des Fachpersonals bei der Beurteilung. Somit ist eine Vergleichbarkeit zwischen den von verschiedenen Personen bestimmten Röstklassen nicht immer gewährleistet [53].

Aus diesem Grund kann die subjektive, visuelle Prüfung durch eine objektive Bestimmung des Röstgrades mittels Nahinfrarot- (NIR-) Spektroskopie und dem sogenannten

A1000-Quotienten ergänzt oder ersetzt werden. Hierbei werden vergleichbare Ergebnisse wie bei der Röstklassenbestimmung durch Fachleute nach Boniturschema ermittelt [54]. Abbildung 2.6 zeigt beispielhaft ein NIR-Spektrum und den daraus bestimmten A1000-Quotienten einer Hanffaser mittleren Röstgrades.

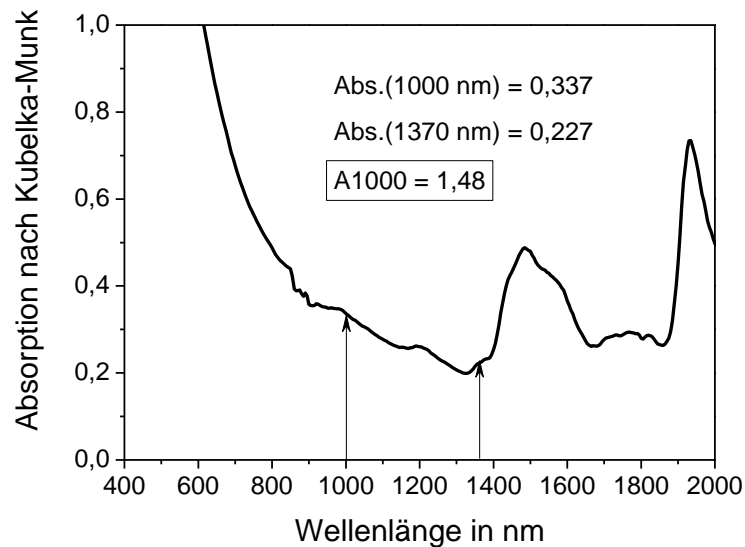


Abbildung 2.6: NIR-Spektrum einer Hanffaser mittleren Röstgrades

Die Absorption des NIR-Spektrums wird nach der Kubelka-Munk-Methode berechnet, die einen linearen Zusammenhang zwischen der Absorption und der diffusen Reflexion herstellt. Dabei ist $F(R)$ die Absorption als Funktion der diffusen Reflexion R und wird nach Gleichung 2.1 ermittelt [55, 56]. Der Quotient A1000 für die Bestimmung des Röstgrades wird nach Gleichung 2.2 ermittelt:

$$F(R) = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad 2.1$$

$$A1000 = \frac{Abs.(1000 \text{ nm})}{Abs.(1370 \text{ nm})} \quad 2.2$$

Dabei ist $Abs.(1000 \text{ nm})$ der Wert der Absorption bei einer Wellenlänge von 1000 nm (10.000 1/cm) und ist durch die Verfärbung der Naturfaser beim Röstvorgang ausschlaggebend. $Abs.(1370 \text{ nm})$ ist der Wert der Absorption bei einer Wellenlänge von 1370 nm (7.300 1/cm) und ist unabhängig von der Morphologie der Naturfaser. Die Röstgradskala reicht von 0,5 für grüne, schwach geröstete Fasern bis 2,5 für schwarze, maximal geröstete Fasern [57, 58].

Abbildung 2.7 zeigt eine Möglichkeit, die Methoden untereinander zu vergleichen. Dafür wurden von jeder Methode der geringste sowie der maximale Röstgrad gleichgesetzt.

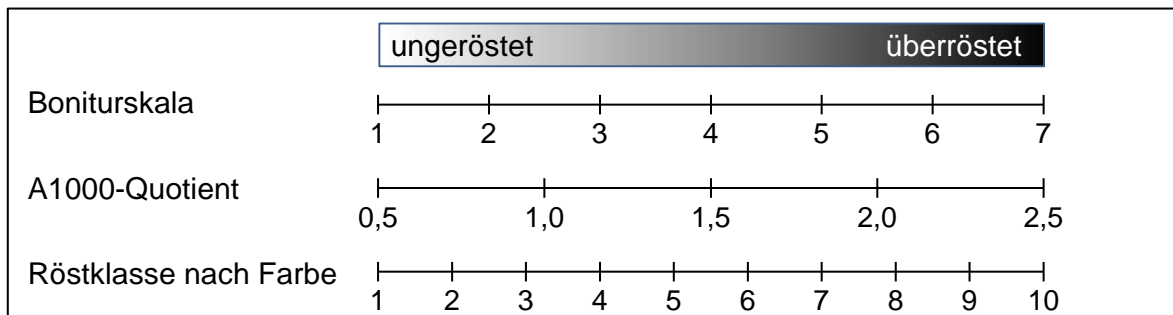


Abbildung 2.7: Vergleich der verschiedenen Skalen für die Ermittlung des Röstgrades von Naturfasern nach [49, 51, 52, 54, 57, 58]

Für die Entwicklung eines Aufheizprozesses für NFOB ist die Kenntnis über den Einfluss des Naturfaserröstgrades auf die Wärmeübertragung im Material von entscheidender Bedeutung, da somit eine gezielte Vorauswahl von Rohstoffen vor der Herstellung von NFOB getroffen werden kann. Bisher ist nicht geklärt, ob die Farbe der Naturfasern oder ihre chemische Zusammensetzung überhaupt einen Einfluss auf Wärmeübertragungsmechanismen aufweisen und vor allem, wie dieser Einfluss sich äußert. Um jegliche subjektive Wahrnehmung bei der Untersuchung der Röstgradeinflüsse zu vermeiden, wird im weiteren Verlauf der Arbeit die Bestimmung nach dem A1000-Quotienten angewandt.

2.2 Verarbeitung naturfaserverstärkter Thermoplaste

Die Verarbeitung von NFK geschieht meist mit traditionellen Verfahren, welche für konventionelle Verbundwerkstoffe mit Glas- oder Kohlenstofffaserverstärkung entwickelt wurden [59]. In der industriellen Verwendung von NFK hat sich allerdings nur das Pressverfahren für Großserien durchgesetzt [15], weshalb sich diese Ausarbeitung nur auf die entsprechenden wissenschaftlichen Erkenntnisse beschränkt.

2.2.1 Herstellung von Bauteilen aus Hybridvliesen

Für die Pressverarbeitung thermoplastischer NFK werden textile Halbzeuge benötigt, die im Fall von Naturfasern vorzugsweise aus Vliesen bestehen. Zwar können die me-

chanischen Eigenschaften der Verstärkungsfasern bei regelloser Verteilung im Verbund nicht vollständig ausgeschöpft werden, allerdings sind Vliese kostengünstig und können auch aus sehr unterschiedlichen Faserrohstoffen hergestellt werden, die sich beispielsweise aus spinntechnischen oder Qualitätsgründen nicht für die klassische Garnerzeugung eignen [60, 61]. Für die Herstellung werden die in Ballen gelieferten Naturfasern in einem Ballenöffner aufgelöst, gewogen und mit thermoplastischen Schmelzfasern meist im Verhältnis 50 Gew.-% NF und 50 Gew.-% Thermoplast gemischt. Die Fasermischung wird anschließend mithilfe von mit Zähnen bestückten Walzen im Krempelprinzip zu sogenannten dünnen Floren verarbeitet. Wie in Abbildung 2.8 erkennbar ist, wird die Fasermischung über eine Tambour-Walze zum Walzenpaar bestehend aus Arbeiter und Wende transportiert, wo die Naturfasern aufgrund der Reibkräfte an den Beschlägen bis zur Einzelfaser aufgelöst werden. Nach Umlaufen des Walzenpaares wird ein dünner Faserflor vom Tambour auf ein Förderband transportiert, mehrfach kreuzweise übereinandergelegt, bis ein gewünschtes Flächengewicht erreicht ist, sodass der Florstapel zum Schluss für eine verbesserte Handhabbarkeit durch Vernadelung mechanisch verfestigt werden kann. [62]

Abbildung 2.9 zeigt die Vernadelungskanäle im Querschnitt eines Hybridvlieses, wobei die Vliesdicke vom Flächengewicht und der Vernadelungsdichte abhängig ist und meist zwischen 6 mm - 10 mm beträgt.

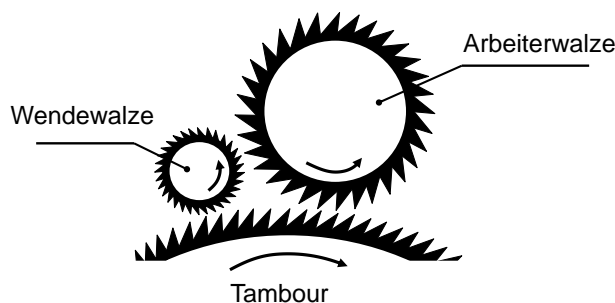


Abbildung 2.8: Schematisch dargestelltes Krempelprinzip mit Tambour, Wende- und Arbeiterwalze

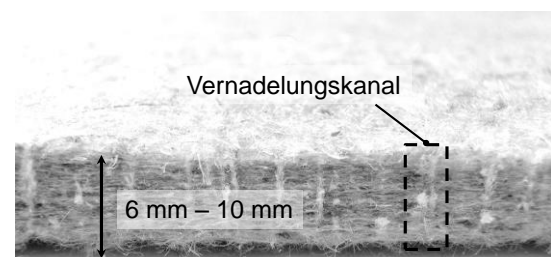


Abbildung 2.9: Querschnitt eines vernadelten Hybridvlieses aus Naturfasern und PP-Schmelzfasern

Aufgrund der Kreuzlegung der dünnen Flore, werden die von der Krempel in Produktionsrichtung gekämmten Fasern wieder regellos im Vlies verteilt, allerdings entstehen oft Vorzugsrichtungen quer zur Produktionsrichtung. Die konventionelle Verarbeitung der Hybridvliese zu Bauteilen erfolgt in einem mehrstufigen Pressprozess und ist schematisch in Abbildung 2.10 dargestellt.

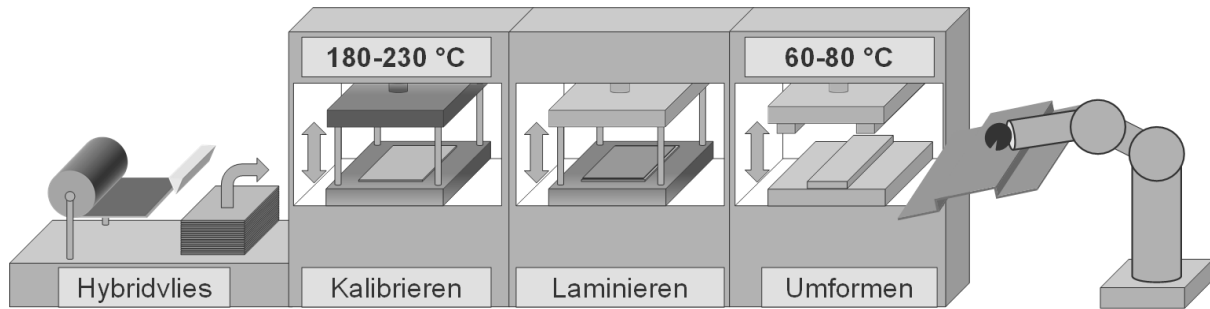


Abbildung 2.10: Konventionelle Pressverarbeitung von NF/Thermoplasten

In einer Kalibrierpresse werden die zuvor konfektionierten Vliese mittels einer Kontaktheizung 45 s - 60 s bei bis zu 230 °C und 3 bar - 6 bar über die Schmelztemperatur des Thermoplasten erwärmt, welcher unter Druck im schmelzflüssigen Zustand die Naturfasern imprägniert. Die Matten werden dabei auf eine Dichte von 0,8 g/cm³ - 0,9 g/cm³ vorkompaktiert, allerdings noch nicht auf die Enddicke des Bauteils, um Faserschädigungen zu vermeiden. Im Automobilbereich wird oftmals in einem Zwischenschritt vor dem Umformen ein Lederdekor klebstofffrei in einer weiteren Presse aufgebracht, bevor die imprägnierte Matte im letzten Schritt in einem Niedertemperaturwerkzeug bei 60 °C - 80 °C und 0,5 bar - 5 bar auf die gewünschte Geometrie umgeformt wird [63]. Die Enddicke der Bauteile beträgt meist 0,85 g/cm³ - 0,95 g/cm³, wobei der Presszyklus insgesamt mit Kalibrieren und Umformen ungefähr eine Minute dauert [64].

Im Gegensatz zu konventionellen Verbundwerkstoffen, in denen sich die Porosität negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt und bei der Verarbeitung möglichst minimiert wird, fungiert die Porosität in NFK neben den Fasern und der Matrix als dritte Komponente mit zusätzlichen Funktionen [65]. Eine vollständige Konsolidierung von NFK ist einerseits aufgrund der Hohlstruktur der Fasern nicht möglich und andererseits auch nicht erwünscht. In Abhängigkeit des Porositätsgehalts können akustische und mechanische Eigenschaften an jeden Anwendungsfall angepasst werden. Abbildung 2.11 zeigt beispielhaft den Biege-Elastizitätsmodul von NF/PP in Abhängigkeit der Dichte, bzw. Kompaktierung. Es ist zu erkennen, dass die Steifigkeit mit höherer Dichte auch höher ist [66]. Allerdings ist die Versagensart in NFK höherer Dichte meist Faserbruch, während Bauteile geringer Dichte aufgrund von Grenzflächenversagen zwischen Faser und Matrix brechen [65]. Mit einer höheren Dichte steigen die Steifigkeit

und Festigkeit somit auf Kosten der Schlagzähigkeit und den akustischen Eigenschaften von NF/PP. In der Automobilindustrie wird aus diesem Grund die Kompromissdichte von $0,85 \text{ g/cm}^3$ - $0,95 \text{ g/cm}^3$ gewählt, die in Steifigkeiten von 2000 MPa - 3000 MPa und Festigkeiten zwischen 40 MPa und 55 MPa resultiert [67, 68].

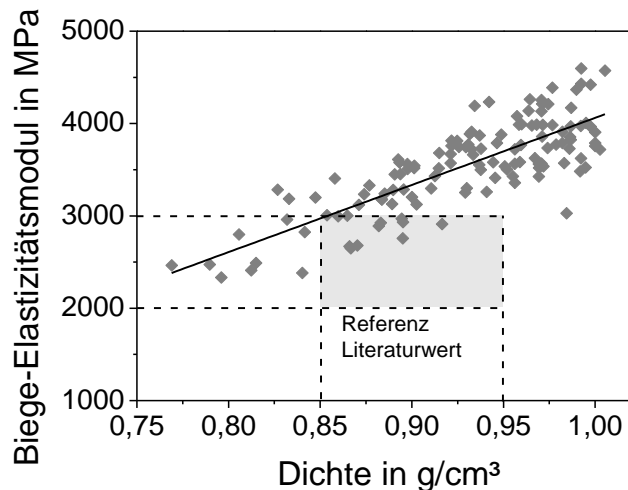


Abbildung 2.11: Biegesteifigkeit eines NF/PP in Abhängigkeit der resultierenden Verbunddichte und im Vergleich zu den Literaturwerten [66]

Bei ähnlicher Dichte ist die Steifigkeit Duroplast-basierter NFK mit 3000 MPa - 5500 MPa signifikant höher als bei NF/PP [69]. Allerdings ist der Vorteil der Verwendung thermoplastischer gegenüber duroplastischen Systemen die Möglichkeit einer Hybridisierung von Prozessen, wie beispielsweise eine Umformung mit gleichzeitigem Hinterspritzen von Rippenverstärkungen. Damit kann das Gewicht des Endbauteils nochmals gesenkt werden. Während die Flächengewichte der für NFK-Bauteile verwendeten Vliese je nach Anwendungsfall im Jahr 1998 noch bis zu 2000 g/m^2 betragen haben, sieht der neue Entwicklungstrend mit der hybriden Fertigung ein maximales Vliesgewicht von 1000 g/m^2 bis zum Jahr 2018 für die gleichen Anwendungen vor [20]. Eine umgeformte, hinterspritzte Türverkleidung aus NF/PP findet bereits bei der Daimler C-Klasse Anwendung. Abbildung 2.12 zeigt allerdings, dass der ohnehin schon aufwändige, mehrstufige Pressprozess hierfür nochmals um einige Arbeitsschritte ergänzt werden muss. Grund dafür ist, dass sich Naturfaser-Hybridvliese nicht für klassische Thermoformprozesse eignen, da die Matrix in den Vliesen noch als Schmelzfaser vorliegt und eine Imprägnierung nur unter Druck- und Temperatureinwirkung erfolgen kann. Die Verwendung bereits verfügbaren Equipments der Automobilzulieferer

für hybride Thermoformverfahren ist daher ökonomischer als der Umbau der mehrstufigen Pressanlage.

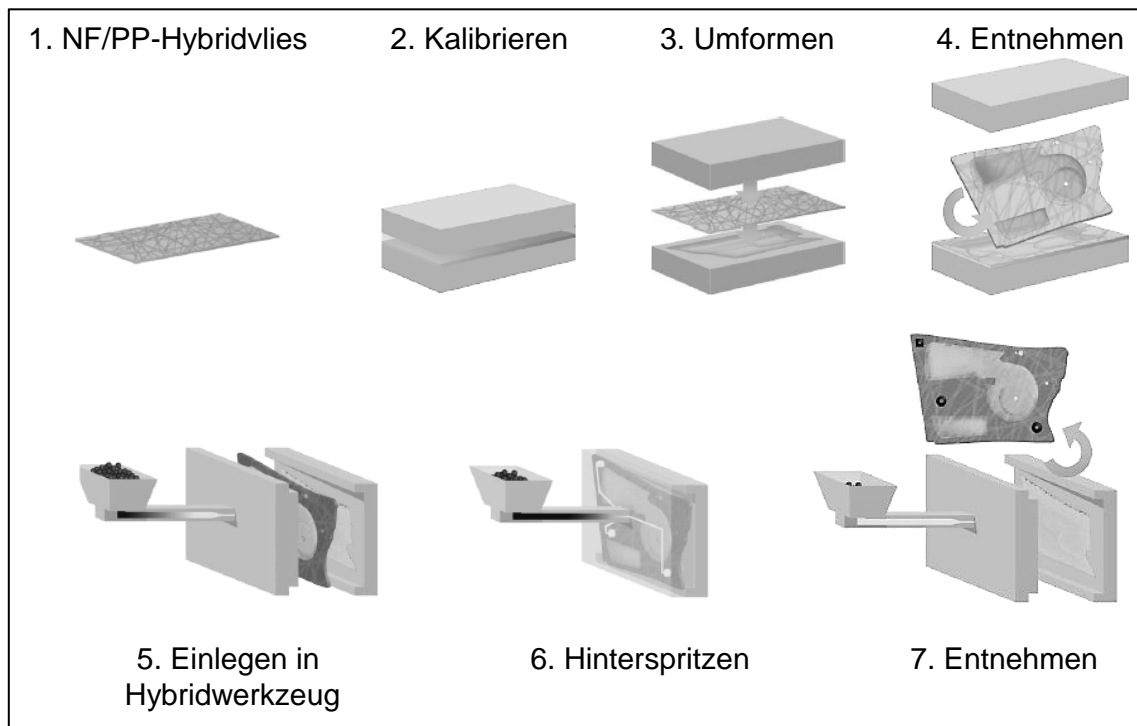


Abbildung 2.12: Hybride Fertigung mit Umformen und Hinterspritzen einer Daimler C-Klasse Türverkleidung aus NF/PP [20]

So erfolgt die Umformung der Türverkleidung bisher separat von der Umspritzung. Eine Möglichkeit, den kostenintensiven Umbau der mehrstufigen Pressanlage zu umgehen, besteht in der dezentralen Fertigung von NFOB, die eine Verarbeitung mit klassischen Thermoformverfahren zulassen. Die Prozesstechnik für die Erwärmung dieser NFOB ist allerdings noch nicht hinreichend untersucht. Mangelnde Erfahrung und die Unkenntnis der Verarbeiter über die Anforderungen an die Naturfasern und den Erwärmungsprozess für Thermoformverfahren sowie die nicht definierten und unbekanntenen Qualitätsanforderungen der Fasern führen zu einer nur zögerlichen Erschließung neuer Absatzmärkte für NF/PP [46]. Aus diesem Grund ist die Kenntnis der thermischen Restriktionen ausschlaggebend für die Entwicklung eines neuen Aufheizverfahrens für NFOB.

2.2.2 Thermische Restriktionen bei der Verarbeitung von NFK

Aufgrund der thermischen Eigenschaften, bzw. der beschränkten thermischen Stabilität der Naturfasern eignen sich nur wenige thermoplastische Matrixpolymere für die

Verarbeitung von NFK, die eine geringe Verarbeitungstemperatur aufweisen [70]. Durchgesetzt hat sich vor allem die Kombination aus Naturfasern und Polypropylen, da der Thermoplast neben monetären Vorteilen eine sehr geringe Dichte von nur $0,9 \text{ g/cm}^3$ bei guten Verarbeitungseigenschaften und hoher Schlagzähigkeit aufweist [71].

Die thermische Stabilität der Naturfasern wird durch ihre Bestandteile Cellulose, Hemicellulose, Pektin und Lignin begrenzt. Cellulose ist der thermisch beständigste Bestandteil, was auf seine hochkristalline Struktur zurückzuführen ist [72]. Die Molekularstruktur von Cellulose wird zwischen 250 °C - 350 °C vollständig zerstört. Der Hauptmasseverlust erfolgt allerdings erst bei 320 °C [73]. Die Degradierung von Hemicellulose erreicht ihr Maximum bei ungefähr 200 °C , wobei Hemicellulose in mehreren Stufen zwischen 180 °C - 500 °C zersetzt wird [73]. Da Hemicellulose der hauptverantwortliche Nebenbestandteil für das hydrophile Verhalten von Naturfasern darstellt, ist der Verlust der Feuchtigkeit hier am höchsten. Die Degradation von Pektin wird von der Degradation der Hemicellulose überlagert. Sie geschieht zwischen 250 °C - 320 °C [74, 75]. Lignin degradiert über einen sehr breiten Temperaturbereich. Während der Erwärmung reagieren die chemischen Bestandteile von Lignin miteinander zu Guaiacyl und Syringyl, welche erst bei höheren Temperaturen degradiert werden [76]. Es kann keine Haupt-Degradationstemperatur für Lignin genannt werden, die thermische Zersetzung verläuft allerdings zwischen 200 °C und 500 °C [72]. Abbildung 2.13 zeigt beispielhaft die Massenabnahme von Hanffasern mittleren Röstgrades und ihren Bestandteilen über der Temperatur von 25 °C - 550 °C sowie die Ableitung der Masse nach der Zeit, welche mittels thermogravimetrischer Analyse ermittelt wurden.

Die erste Stufe des Masseverlustes zwischen 50 °C - 150 °C ist auf die Freisetzung von Wasser zurückzuführen, welches als Feuchtigkeit in den Naturfasern gespeichert ist [34]. Die zweite Stufe zwischen 250 °C - 370 °C korrespondiert mit der Degradierung von Hemicellulose. Die Hauptstufe der Degradierung zwischen 340 °C - 370 °C entspricht der Zersetzung von Alpha-Cellulose durch Depolymerisation. Die letzte Stufe bis 500 °C ist die Degradierung von Lignin [73]. Grundsätzlich gilt, dass Naturfasern mit geringem Röstgrad bei etwas geringeren Temperaturen anfangen zu degradieren als Naturfasern mit höherem Röstgrad, da letztere einen höheren Anteil an temperaturbeständiger Cellulose aufweisen [77].

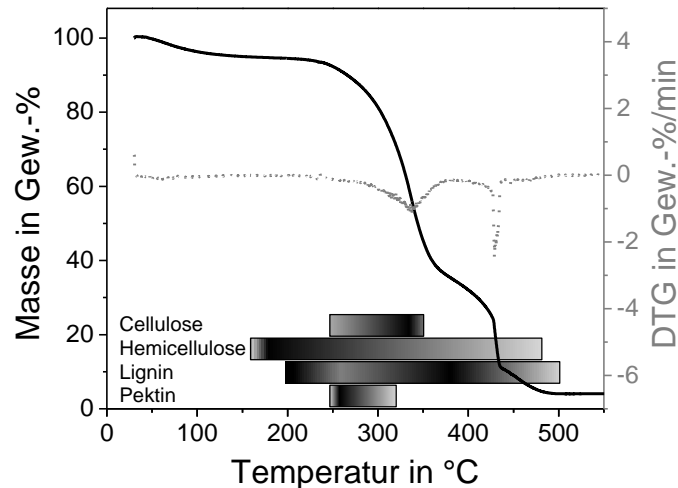


Abbildung 2.13: Thermogravimetrische Analyse von Hanffasern mit Ableitung der Massenabnahme nach der Zeit

Obwohl die thermische Zersetzung verschiedener NF-Bestandteile bereits unterhalb 200 °C beginnt, ist die Degradierung der Naturfasern bei der Verarbeitung von NFK eine Funktion der komplizierten Wechselwirkung zwischen Verarbeitungstemperatur und –zeit [78]. Kurzzeitig können NFK sogar bis über 220 °C ohne thermische Schädigung erwärmt werden, dennoch muss jede Änderung des Verarbeitungsprozesses die thermischen Restriktionen der Naturfasern berücksichtigen, um unerwünschte Effekte wie die Minderung der mechanischen Eigenschaften zu minimieren. Besonders eine doppelte thermische Belastung von NFK und ihr Einfluss auf Geruch und Emissionen ist bisher noch nicht hinreichend untersucht worden.

2.2.3 Geruch und Emissionen von NFK

NFK besitzen zwei potenzielle Emittenten von Geruch und Emissionen: die Kunststoffmatrix sowie die Naturfaser selbst. Die Eigenschaften der Kunststoffe lassen sich im Allgemeinen sehr gut überprüfen und anpassen, während die Naturfasern durch ihre unkontrollierbare chemische Zusammensetzung das größere Problem darstellen. Insbesondere der Geruch behindert den Einsatz von Naturfasern im technischen Bereich erheblich. Seine Prüfung erfolgt durch geschultes Personal, welches den Materialien Noten von 1 - 6 vergibt [79]:

- 1: Nicht wahrnehmbar
- 2: Wahrnehmbar, nicht störend
- 3: Deutlich wahrnehmbar, aber noch nicht störend
- 4: Störend

- 5: Stark störend
- 6: Unerträglich

Bei Emissionen wird zwischen Fogging und leichtflüchtigen Stoffen sowie Formaldehyd unterschieden. Im Automobilbereich wird unter Fogging die Kondensation von verdampften, semi-flüchtigen Bestandteilen eines Materials an kühleren Stellen verstanden. Besonders an der Windschutzscheibe führen die Kondensate zu Lichtbrechungs- und Lichtstreuungseffekten, welche die Fahrsicherheit beeinträchtigen können [80]. Austretende Stoffe, die nicht mehr kondensieren und somit gasförmig bleiben, werden (leicht-) flüchtige organische Verbindungen (VOC) genannt. Es existiert eine immense Anzahl VOCs, die aus Materialien austreten können. Es wird angenommen, dass sie wesentlich zum Geruch in Automobilen beitragen [80-82]. Zu den flüchtigen Verbindungen zählen auch Formaldehydemissionen, welche karzinogen sein können und/oder Atemwegs- und Hautreizungen verursachen. Einige Grenzwerte für Geruch und Emissionen für NFK im automobilen Innenraum sowie eine gängige Norm für ihre Prüfung sind in Tabelle 2.2 gezeigt.

Tabelle 2.2: Grenzwerte von Geruch und Emissionen für naturfaserverstärkte Kunststoffe in Innenraum-Automobilenanwendungen [85]

| Bezeichnung | Geruch | Fogging | VOC | Formaldehyd |
|-------------|---------------|-------------|-----------------------------|-----------------|
| Norm | VDA 270 | DIN 75201 | VDA 277 | VDA 275 |
| Grenzwert | Note ≤ 3 | ≤ 2 mg | ≤ 50 $\mu\text{g C/g}$ | ≤ 10 mg/kg |

Der Eigengeruch und die Emissionen von Naturfasern werden einerseits durch Mikroben- sowie Schimmelbefall und andererseits durch den Pektingehalt beeinflusst [83, 84]. Tendenziell ist die Geruchsnote von Fasern mit ansteigendem Röstgrad schlechter und überröstete Fasern weisen selten ausreichende Noten auf [85]. Der Eigengeruch kann durch diverse Additive neutralisiert werden, indem diese mit den geruchsbildenden Substanzen zu schwer flüchtigen oder geruchsneutralen Stoffen reagieren [81-83]. Auch eine chemische oder enzymatische Vorbehandlung der Fasern ist oftmals eine hilfreiche Maßnahme bei der Geruchs- und Emissionsbeseitigung [86, 87].

Bei der Verarbeitung der Naturfasern zu NFK-Komponenten ist die thermische Belastung ausschlaggebend für Geruch, Emissionen und sogar mechanische Eigenschaften [85]. Bei thermisch belasteten Fasern entsteht ein komplexes Gemisch aus teiloxidierten Verschwefelungsprodukten, die sich schwer durch Vorbehandlung der Fasern oder

Additive kontrollieren lassen [83]. Bei der Herstellung von NF/PP-Bauteilen im Pressverfahren übersteigt die Geruchsnote die zulässige Note 3 bereits ab einer Verarbeitungstemperatur von 180 °C [85]. Auch die VOC übersteigen den Grenzwert ab Verarbeitungstemperaturen von 195 °C [85]. Im Vergleich zu anderen Materialien tritt Fogging bei NF/PP meist in geringen Mengen auf und bleibt auch bei Verarbeitungstemperaturen bis 210 °C unter dem Grenzwert von 2 mg [85]. Geringe Verarbeitungstemperaturen unterhalb von 180 °C sind in der industriellen Verarbeitung allerdings nicht realisierbar. Aus ökonomischen Gründen wird die Kontaktheizpresse zum Erwärmen der NF/PP-Halbzeuge meist auf 210 °C - 230 °C erwärmt, vereinzelt auch bis zu 250 °C [20, 68]. Die Faserrückstände auf den mehrfach verwendeten Trennfolien aus Polytetrafluorethylen (PTFE) werden zudem einer mehrmaligen thermischen Belastung ausgesetzt. Ihr Geruch wird auch bei korrekter Prozessführung auf die NFK-Bauteile übertragen. Die einzige Möglichkeit sowohl Emissionen als auch Geruch bei der industriellen Verarbeitung einzudämmen, ist die Entfernung der Pektine in den Naturfasern [83]. Auch die Lagerzeit kann dazu führen, dass Emissionen und Gerüche verflüchtigen, bevor das Bauteil im Automobil verbaut wird [83].

Die Forschungsergebnisse zu Emissionen und Geruchsentwicklung bei der Verarbeitung von NFK beschränken sich bisher auf Herstellungsprozesse, in denen die Naturfaservliese lediglich einer einfachen thermischen Belastung ausgesetzt sind, bevor sie umgeformt werden. Bei der Verarbeitung von NFOB kommt es allerdings zu einer doppelten thermischen Belastung der Naturfasern, einerseits durch die Herstellung der OB, andererseits bei der Umformung. Es ist bisher unklar, ob dies zu einer negativen Geruchsentwicklung und zu höheren Konzentrationen von Emissionen führt oder ob eine mehrmalige Erwärmung keinen oder sogar einen positiven Einfluss auf diese Eigenschaften aufweist, falls sich die leichtflüchtigen Bestandteile bereits nach der ersten Erwärmung verflüchtigen.

2.3 Grundlagen der Erwärmung von Organoblechen

Einer der größten Vorteile thermoplastischer, imprägnierter und flächiger FKV-Halbzeuge ist die Möglichkeit einer schnellen Verarbeitung zu Bauteilen im Thermoformverfahren, da eine chemische Reaktion wie bei äquivalenten duroplastischen FKV

nicht stattfinden muss [88]. Der Begriff Thermoformen umfasst dabei ein breites Spektrum an Verarbeitungsmethoden, die allerdings auf die essenziellen Prozessschritte ‚Erwärmung über die Schmelztemperatur des Thermoplasten‘ und ‚Umformung‘, ‚Konsolidierung‘ und ‚Abkühlung‘ reduziert werden können [89]. Das Thermoformen ist ein großserientaugliches Verfahren für die Herstellung schalenförmiger Strukturen, bei denen die Bauteilformgebung ausschließlich durch Drapierung der Verstärkungsstruktur erfolgt [22]. Geometrisch komplexere Bauteile können durch eine Verfahrenskombination mit thermoplastischem Spritzguss hergestellt werden, welches eine gleichzeitige Umformung und Fügung mit Versteifungsstrukturen wie Verstärkungsrippen oder Krafteinleitungspunkten aus kompatibelem, kurzfaserverstärktem Thermoplast für den Großserienmaßstab zulässt [22].

Im Allgemeinen ist die Zeitspanne des Umform- inklusive Abkühlvorgangs während des Thermoformens mit bis zu 20 s sehr kurz [90]. Die Gesamtzykluszeit wird im Wesentlichen von der Erwärmungszeit des Halbzeugs und der Schmelztemperatur des Thermoplasten bestimmt [22], weshalb diesem Prozessschritt eine große Bedeutung für die Großserientauglichkeit zukommt [90].

2.3.1 Erwärmungsmethoden für Organobleche

Die Erwärmung oder Abkühlung von Materialien kann mithilfe verschiedener physikalischer Energieübertragungsmechanismen erfolgen, die nach ihrem Energieträger charakterisiert werden. Diese Energieträger können je nach Medium Atome, Moleküle, Elektronen oder Photonen sein. Ein Austausch von thermischer Energie, die an einen materiellen Träger gebunden ist, beispielsweise Atome, wird auch Wärmeleitung genannt. In ruhenden Stoffen nennt man diese Art des Energieaustauschs Konduktion, bei bewegten Fluiden wird sie Konvektion genannt [91]. Eine Wärmeübertragung, die nicht an einen materiellen Träger gebunden ist, d. h. Photonen, und demnach auch im Vakuum stattfinden kann, wird Wärmestrahlung genannt [91].

Bei allen für die Erwärmung von Materialien angewandten Erwärmungsmethoden handelt es sich immer um eine Kombination aus mindestens zwei dieser Prinzipien, die sich allerdings grob auf jeweils ein Prinzip reduzieren lassen. Abbildung 2.14 zeigt eine

Auswahl von Erwärmungsmethoden für FKV, die in die Energieübertragungsmechanismen Wärmeleitung und Strahlung unterteilt sind, wobei die Wärmeleitung nochmals in Konduktion und Konvektion unterteilt wird.

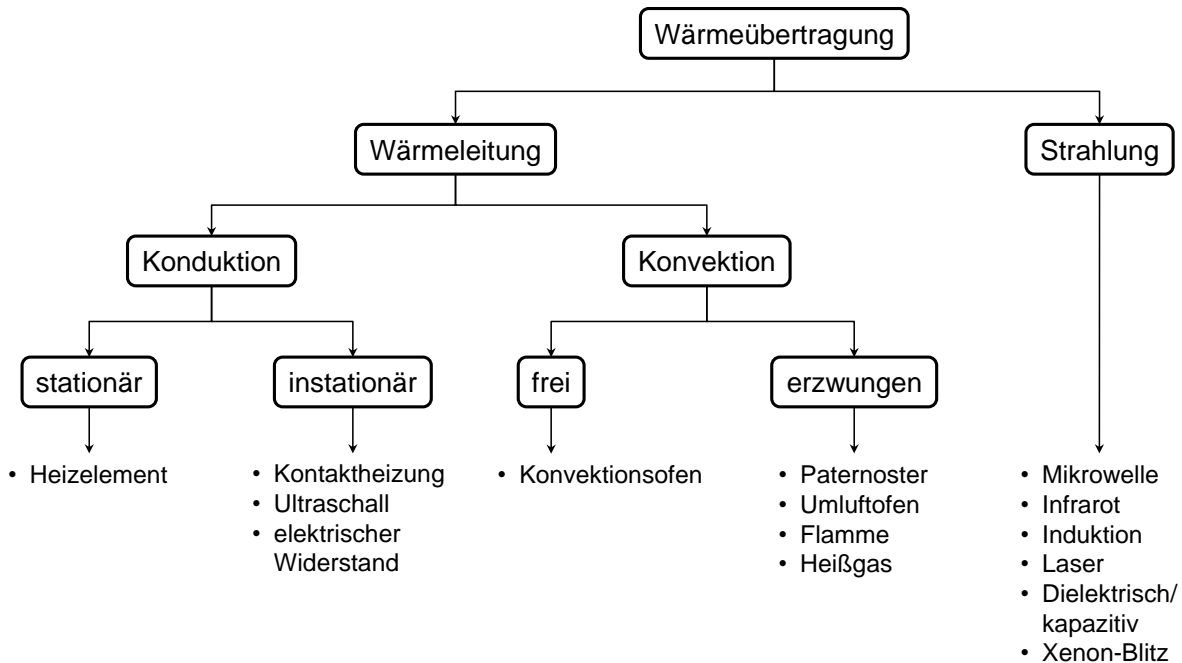


Abbildung 2.14: Wärmeübertragungsmechanismen nach ihrem Energieträger und danach eingeteilte Erwärmungsmechanismen für FKV [91-95]

Für die Erwärmung von Organoblechen sind die meisten Erwärmungsmethoden nicht einsetzbar, insbesondere wenn ein Wärmeeintrag nur lokal möglich ist wie beispielsweise bei der Lasererwärmung. Eine entsprechende Parallelisierung der Laserstrahlen für die Erwärmung großflächiger Bauteile wäre unwirtschaftlich. Auch eine auf der elektrischen Leitfähigkeit von Materialien beruhende Erwärmung, wie beispielsweise Widerstands- oder Induktionserwärmung, ist nur für wenige Materialien funktional, die auf einer elektrisch leitfähigen Faserverstärkung beruhen.

Im Allgemeinen kommen für die Erwärmung von Organoblechen Konvektions-, Paternoster- und Infrarotöfen zum Einsatz, seltener auch Kontaktheizungen [21, 23, 89]. Nachfolgend werden die einzelnen Methoden anhand ihrer Wärmeaustauschmechanismen beschrieben.

2.3.2 Konduktive Erwärmung

Eine Energieübertragung mittels Konduktion ist oberhalb des absoluten Nullpunktes von 0 K (= -273,15 °C) in ruhenden Stoffen möglich. Hierbei wird die thermische Energie durch Wechselwirkungen zwischen Atomen und Molekülen transportiert, die jedoch selbst an ihrem Ort verbleiben. Die ständige Aufrechterhaltung eines konstanten Wärmestroms wird stationäre Wärmeleitung genannt. Beispielhaft kann hierfür das Heizelementschweißen genannt werden, welches allerdings für thermoplastische NFK aufgrund der thermischen Instabilität von Naturfasern nicht für den lasttragenden Bereich geeignet ist [96, 97]. Instationäre Wärmeleitung tritt hingegen auf, wenn ein Körper sich abkühlt oder erwärmt und sich daher sein Wärmestrom zeitlich ändert. [91]

Konduktive Erwärmung von Organoblechen ist immer instationär und erfolgt mittels Kontaktheizung, wobei der Wärmetransport vom Werkzeug auf das Halbzeug über Wärmeleitung erfolgt. Für einen besseren Kontakt ist es vorteilhaft, das Halbzeug an die Heizfläche anzudrücken und im Fall von NF/PP-Vliesen das Material zu kompaktieren, wodurch sich der Übergangswiderstand reduziert und der Wärmetransport verbessert, da die isolierende Luft aus dem Material herausgepresst wird [98]. Im Vergleich zu anderen Wärmeübertragungsmechanismen hat die Kontaktheizung Vorteile hinsichtlich Regelbarkeit und Wärmeübertragung [22], allerdings kommt es nahe der Schmelztemperatur von Thermoplasten zu Anhaftungsproblemen auf der Werkzeugoberfläche, die aufgrund der Anpresskräfte zusätzlich verstärkt werden [99]. Die Erwärmung mittels Kontaktheizung hat sich für konventionelle GFK-/CFK-Organobleche hauptsächlich im Labormaßstab als effiziente Methode der Erwärmung etabliert, wobei die auftretenden Anhaftungsprobleme den industriellen Großeinsatz behindern [22, 99].

Bei der industriellen Verarbeitung von NF/PP-Vliesen fungiert die Kalibrierpresse als Kontaktheizpresse, wobei als Trennmittel PTFE-Folien zwischen Vliesen und Werkzeug verwendet werden. Diese erhöhen allerdings den Übergangswiderstand zur Wärmeübertragung wodurch die Imprägnierung verlangsamt wird, sodass in der Produktion oftmals die Kontaktheizpresse weit oberhalb der Zersetzungstemperatur der Naturfasern, d. h. bis zu 250 °C, betrieben wird. Die mehrmalige Nutzung der PTFE-Folien führt zu einer Ablagerung thermisch beschädigter Faserrückstände, die Gerüche und Emissionen auf nachfolgende Bauteile übertragen können.

Schematisch kann die Wärmeübertragung in Organoblechen vereinfacht als stationäre Wärmeleitung wie in Abbildung 2.15 visualisiert werden.

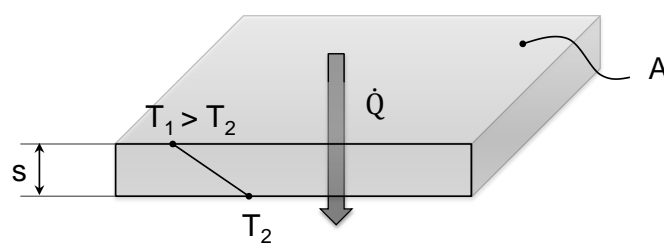


Abbildung 2.15: Eindimensionale, stationäre Wärmeleitung einer Platte, welche an den Seiten thermisch isoliert ist

Dabei wird die Oberseite des OB in Kontakt mit einer Werkzeugoberfläche der Temperatur T_1 gebracht, während die untere Seite die Temperatur T_2 aufweist, wobei $T_1 > T_2$ ist. Die Änderung der Temperatur ΔT pro Längeneinheit Δx des OB heißt Temperaturgradient. Es handelt sich um einen Vektor, der in Richtung der größten Temperaturänderung zeigt. Die übertragbare Wärmeenergie pro Zeiteinheit wird Wärmestrom \dot{Q} genannt. Dieser verläuft in Richtung des Temperaturgradienten, d. h. von hoher zu niedriger Temperatur. In Körpern mit einfachen Geometrien und der Querschnittsfläche A kann der Wärmestrom nach Gleichung 2.3 berechnet werden.

$$\dot{Q} = \int \dot{q} \, dA \quad 2.3$$

$$\dot{q} = -\lambda_w \frac{dT}{dx} \quad 2.4$$

Dabei ist \dot{q} die senkrecht zur Fläche A auftreffende Wärmestromdichte, welche proportional zur Wärmeleitfähigkeit λ_w ist. Diese gibt an, welcher Wärmestrom pro Längeneinheit dx eines Materials in Richtung des Wärmestroms und pro Kelvin Temperaturdifferenz übertragen wird. Die Wärmeleitfähigkeit eines Materials ist temperatur- und druckabhängig, allerdings ist diese Abhängigkeit in festen und flüssigen Stoffen, bei denen während der Erwärmung kein Phasenübergang eintritt, klein im Vergleich zu Gasen. Deshalb darf mit einer mittleren Wärmeleitfähigkeit gerechnet werden [91]. Bei konstanter Wärmeleitfähigkeit kann der Wärmestrom für den oben genannten Fall mithilfe von Gleichung 2.5 berechnet werden, wobei s die Plattendicke darstellt.

$$\dot{Q} = -\lambda_w A \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda_w}{s} A (T_1 - T_2) \quad 2.5$$

2.3.3 Konvektive Erwärmung

Als Konvektion wird die mit einem Stofftransport zusammenhängende Wärmeübertragung bezeichnet. Strömt ein Fluid an einem Festkörper entlang und besitzen beide unterschiedliche Temperaturen T_F (Fluid) und T_S (Festkörper), so tritt dort Konvektion auf. Freie Konvektion tritt bei ruhenden Fluiden auf, die in Kontakt mit einer Oberfläche kommen, welche eine andere Temperatur aufweist. Beispielhaft hierfür kann die Erwärmung von OB im Konvektionsofen genannt werden. Dabei verursachen Temperaturdifferenzen im Fluid Dichteunterschiede und Fluidschichten mit kleinerer Dichte steigen auf. Im Gegensatz dazu tritt die erzwungene Konvektion auf, wenn eine Fluidströmung durch eine äußere Druckdifferenz aufrechterhalten wird. Diese Art der konvektiven Erwärmung kommt im industriellen Bereich am häufigsten vor [91], beispielsweise bei der Erwärmung von Organoblechen mittels Umluft- oder Paternosteröfen [21].

Grundsätzlich ist eine konvektive Erwärmung von Organoblechen mittels Heißgas oder Luft ineffizient und die Energieverluste sind sehr hoch, was unter anderem an der geringen Wärmekapazität sowie Wärmeleitfähigkeit der Luft liegt [99-101]. Darüber hinaus neigen konvektiv erwärmte KfV dazu, sich in ihre Ausgangslage vor der Kompaktierung zu entspannen, was in einem Aufbauschen und einer starken Dickenzunahme resultiert [102, 103], welche auch als Lofting bezeichnet wird. Das Lofting kann Vorteilhaft für die Herstellung poröser Materialien und Sandwichstrukturen sein [102]. Bei der Erwärmung von Organoblechen wird es allerdings als Nachteil betrachtet, da die Dickenzunahme mit einer Selbstisolation durch die im Material eingeschlossene Luft einhergeht und die von der Materialdicke abhängige Wärmeleitung in den Materialkern behindert wird. Die Durchwärmung von Halbzeugen wird somit verlangsamt, was den industriellen Großeinsatz erschwert.

Darüber hinaus führt die unterschiedliche freie Konvektion auf der Ober- und Unterseite von Organoblechen zu einer ungleichmäßigen Erwärmung, die schematisch in Abbildung 2.16 dargestellt ist.

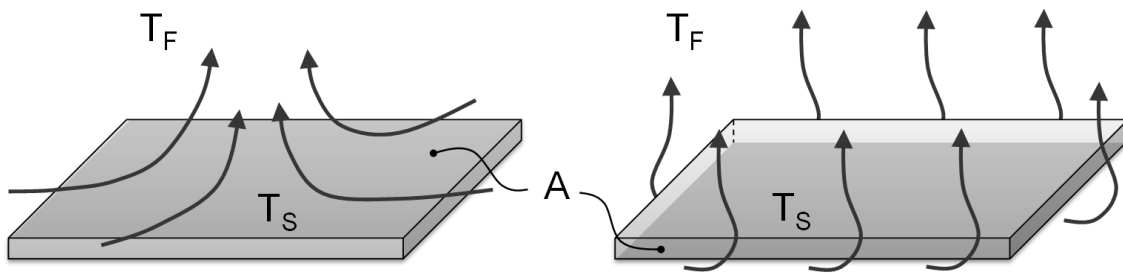


Abbildung 2.16: Freie Konvektion auf der Oberseite (links) und Unterseite (rechts) einer horizontalen, ebenen Fläche

Die von einem Körper durch Konvektion aufgenommene oder abgegebene Wärme ist proportional zu seiner Oberfläche A sowie zur Temperaturdifferenz zwischen ihm und seiner Umgebung. Der Wärmestrom wird durch Gleichung 2.6 beschrieben [104].

$$\dot{Q} = \alpha A (T_S - T_F) \quad 2.6$$

Die konvektive Wärmeübergangszahl α ist ein Maß für den zwischen dem Fluid und dem Festkörper ausgetauschten Wärmestrom pro Fläche und pro Kelvin. Sie ist keine Stoffeigenschaft, sondern hängt von vielen dimensionslosen Faktoren ab, wie der Reynoldszahl, den Stoffeigenschaften, der Geometrie und der Richtung des Wärmetransports. Für stark vereinfachte Fälle kann die Wärmeübergangszahl durch die Ermittlung der für das jeweilige Problem passenden Nußeltzahl Nu analytisch bestimmt werden. Für horizontale, ebene und quadratische Organobleche der Kantenlänge $z = 100$ mm existieren für die Ober- und Unterseite unterschiedliche Ansätze der Berechnung der Wärmeübergangszahl mithilfe der Nußeltzahl. Diese wird wie in Gleichung 2.7 als Funktion der Grashofzahl Gr , Prandtlzahl Pr und Geometrie angegeben, wobei L die charakteristische Länge darstellt und mithilfe von Gleichung 2.8 für oben genannten Fall berechnet werden kann [105].

$$Nu = \alpha \cdot \frac{L}{\lambda_w} = f(Gr, Pr, Geometrie) \quad 2.7$$

$$L = \frac{z^2}{4z} \quad 2.8$$

Die Grashofzahl gibt das Verhältnis der Auftriebskräfte zu den Reibungskräften, beispielsweise des Fluids am Festkörper, wieder und wird als Funktion der Temperaturdifferenz wie in Gleichung 2.9 angegeben. Die Rayleighzahl ist, wie in Gleichung 2.10 gezeigt, das Produkt aus Grashof- und Prandtlzahl.

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot (T_S - T_F)}{\nu} \quad 2.9$$

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad 2.10$$

Die zur Berechnung der Faktoren benötigten thermophysikalischen Stoffgrößen sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst.

Tabelle 2.3: Erdbeschleunigung und thermophysikalische Stoffgrößen von Luft [104]

| Stoffgröße | Zahlenwert | Einheit |
|---|----------------------|-------------------|
| Erdbeschleunigung g | 9,807 | m/s ² |
| Thermischer Ausdehnungskoeffizient für ideales Gas $\beta = 1/T_{Luft}$ | 0,00129341 | 1/K |
| Kinematische Viskosität ν der Luft bei 500 °C | $81,4 \cdot 10^{-6}$ | m ² /s |
| Prandtlzahl Pr der Luft bei 500 °C | 0,719 | - |

Analog zu Gleichung 2.11 und 2.12 können die Prandtl-Funktionen für die Erwärmung der Oberseite der Platte $f_{oben}(Pr)$ sowie der Unterseite der Platte $f_{unten}(Pr)$ berechnet werden.

$$f_{oben}(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{16}{9}} \approx 0,3490 \quad 2.11$$

$$f_{unten}(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,322}{Pr} \right)^{\frac{11}{20}} \right]^{\frac{20}{11}} \approx 0,4055 \quad 2.12$$

Da $Ra \cdot f_{oben}(Pr) \approx 3466$ und $Ra \cdot f_{unten}(Pr) \approx 4032$ ist die konvektive Strömung sowohl auf der Oberseite als auch der Unterseite der Platte laminar [104] und die Nußeltzahlen können analog zu Gleichung 2.13 und 2.14 berechnet werden.

$$Nu_{oben} = 0,6 [Ra \cdot f_{oben}(Pr)]^{1/5} \approx 3,06 \quad 2.13$$

$$Nu_{unten} = 0,766 [Ra \cdot f_{unten}(Pr)]^{1/5} \approx 4,03 \quad 2.14$$

Aufgrund der Proportionalität der Nußeltzahl und der konvektiven Wärmeübergangszahl ist davon auszugehen, dass der Wärmestrom auf der Unterseite höher ist als auf

der Oberseite und sich demnach die Unterseite eines konvektiv erwärmten Organoblechs schneller erwärmt als die Oberseite.

Materialien, die aufgrund der geringen Differenz zwischen Schmelztemperatur des Thermoplasten und Zersetzungstemperatur der Faserverstärkung eine enge thermische Prozessführung bei der Erwärmung benötigen, kann dieses Verhalten entweder zu unzureichender Erwärmung oder thermischer Schädigung des Organoblechs führen.

2.3.4 Erwärmung durch Strahlung

Elektromagnetische (EM) Strahlung entsteht durch schwingende elektrische Ladung. Ihre Wechselwirkung mit Materie hängt von ihrer Frequenz, bzw. Wellenlänge ab. Zu EM Strahlung gehören Infrarot- und Röntgenstrahlung, aber auch Radiowellen und sichtbares Licht. Im Gegensatz zu Wärmeleitung und Konvektion ist die Erwärmung durch Strahlung an keinen materiellen Träger gebunden. So können bei der Erwärmung konventioneller Organobleche durch die Wärmeübertragung ohne Medium sämtliche Anhaftungsprobleme vermieden werden [106], die bei konduktiven und konvektiven Verfahren ein großes Problem darstellen, welches die Großserientauglichkeit erschwert.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von EM Strahlung entspricht im Vakuum der Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 299.792.458 \text{ m/s}$. Abbildung 2.17 zeigt das elektromagnetische Spektrum über der Wellenlänge und der Art ihrer Entstehung. In dieser Arbeit wird lediglich auf die Wärmestrahlung als Möglichkeit der Erwärmung von FKV eingegangen.

Als Wärmestrahlung wird überwiegend Infrarot- (IR-) Strahlung und ein Teil des sichtbaren Lichts verstanden, die zusammen das elektromagnetische Spektrum zwischen $0,4 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$ umfassen [104, 107]. Der für die Wärmeübertragung im industriellen Maßstab relevante Wellenlängenbereich liegt im mittelwelligen IR-Bereich zwischen $1 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$ [100]. Beim Auftreffen von IR-Strahlung auf ein Material können drei Effekte auftreten: Absorption A , Reflexion R und Transmission T . Der Zusammenhang dieser drei Größen ist in Gleichung 2.15 dargestellt [91].

$$A + R + T = 1$$

2.15

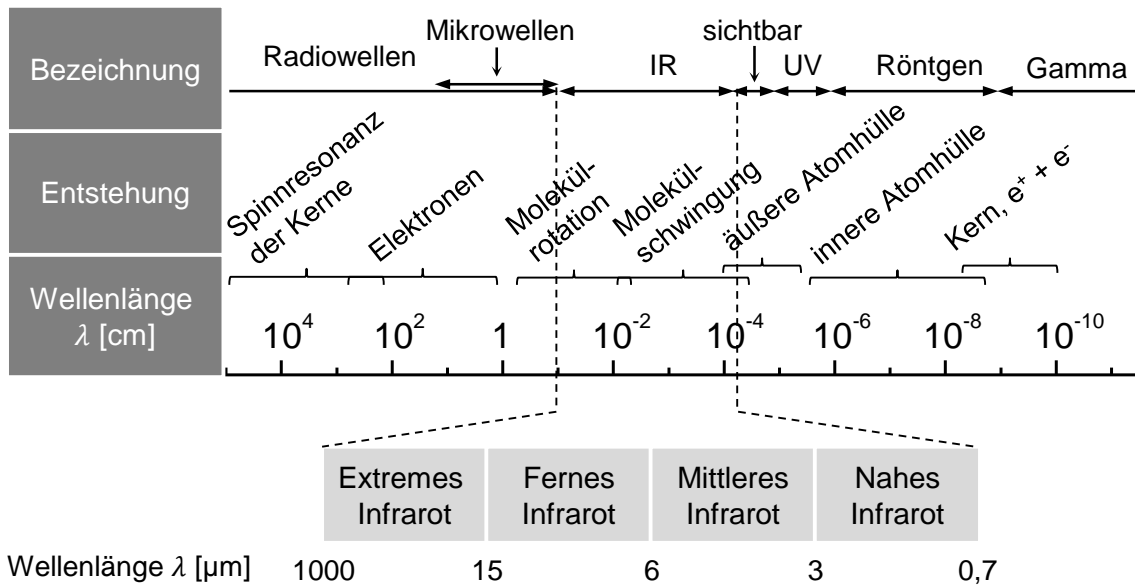


Abbildung 2.17: Elektromagnetisches Spektrum nach [93]

Grundlage für die Erwärmung mittels IR-Strahlung ist die Absorption, bzw. das für jeden Werkstoff charakteristische Absorptionsspektrum. Das Vermögen, IR-Strahlung zu absorbieren, beruht auf der Anregung schwingungsfähiger Atome oder Moleküle im Werkstoff. Die Energie der elektromagnetischen Strahlung wird absorbiert, wenn sich im Verlauf der angeregten Molekülschwingung das Dipolmoment ändert. Dabei führt die absorbierte Energie durch die Erhöhung der Schwingungsenergie zu einer Temperaturerhöhung im Material [108].

Nur ein idealisierter schwarzer Körper ist in der Lage, alle auf ihm auftreffende IR-Strahlung vollständig zu absorbieren. Nach dem Kirchhoffschen Gesetz, welches besagt, dass das Emissionsverhältnis eines Körpers bei stationären Verhältnissen gleich seinem Absorptionsverhältnis ist, emittieren schwarze Körper bei einer bestimmten Temperatur Strahlung mit maximaler Intensität. Diese Intensität lässt sich durch das Plancksche Strahlungsgesetz in Abhängigkeit der Wellenlänge λ und der Temperatur des Strahlers T in Gleichung 2.16 beschreiben.

$$S_{\lambda}(T, \lambda) = 2\pi \frac{hc_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc_0}{\lambda kT}} - 1} \quad 2.16$$

Dabei sind das Plancksche Wirkungsquantum mit $h = 6,626755 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ und die Boltzmannkonstante mit $k = 1,380641 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ gegeben. [109]

Für die Erwärmung von Organoblechen können diverse IR-Strahler zum Einsatz kommen, deren Strahlung von Filamenten aus hochschmelzenden Materialien wie Wolfram oder Kohlenstoff emittiert wird und die nach ihrer maximalen Temperatur in Halogen/NIR-, Kurzwellen-, schnelle Mittelwelle-, Carbon- und Mittelwelle-Strahler unterteilt werden [100, 110, 111]. Abbildung 2.18 zeigt die Verteilung der Strahlungsintensität verschiedener IR-Strahler über der Wellenlänge unter der Annahme dass es sich um schwarze Strahler handelt.

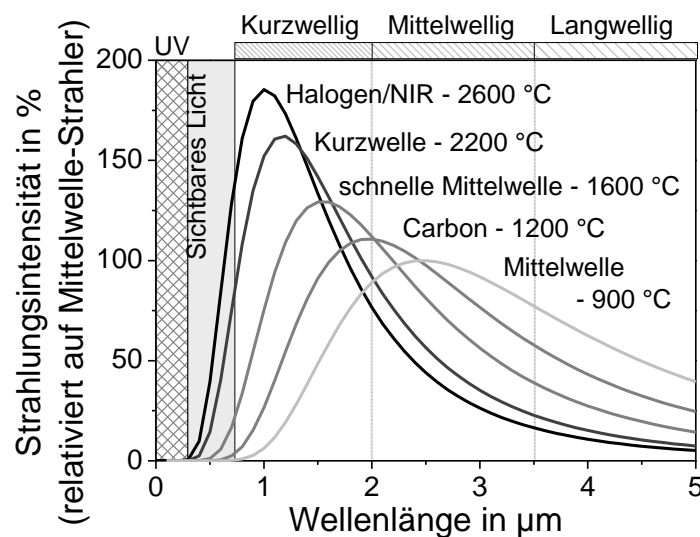


Abbildung 2.18: Auf gleiche elektrische Leistung eines Mittelwelle-IR-Strahlers relativierte Strahlungsintensität verschiedener IR-Strahler über der Wellenlänge nach [111]

Die Flächen unterhalb der dargestellten Kurven repräsentieren nach Gleichung 2.17 den von einem Strahler der Temperatur $T_{Strahler}$ in den Halbraum emittierten Wärmestrom \dot{E} .

$$\dot{E} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} S_{\lambda} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T_{Strahler}^4 \quad 2.17$$

Dabei ist $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ die Stefan-Boltzmann-Konstante.

Es ist zu erkennen, dass Strahlung über ein breites Band von Wellenlängen emittiert wird, allerdings verschiebt sich das Maximum der Intensität mit steigender Strahlertemperatur T zu kürzeren Wellenlängen. Dieser Zusammenhang wird mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz in Gleichung 2.18 beschrieben, wobei die Wiensche Konstante mit $b = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ gegeben ist.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad 2.18$$

Verglichen mit Kurzwelle-Strahlern weisen Mittelwelle- und Carbonstrahler bei gleicher elektrischer Leistung bei Wellenlängen oberhalb 2 μm eine deutlich höhere Strahlungsleistung auf. Dieser Bereich wird besonders gut von den meisten Thermoplasten absorbiert, da die C-H-Bindungen der Kunststoffe Strahlung zwischen 3,2 μm und 3,5 μm absorbieren [111]. Sind die Heizwendel allerdings von einem Quarzglasrohr umgeben, werden genau die benötigten Wellenlängenbereiche vom Quarzglas absorbiert, da dieses ein Maximum der Absorption bei 3,4 μm aufweist, wie in Abbildung 2.19 zu sehen ist. Bei der Erwärmung von Organoblechen, die auf Standardkunststoffen wie Polyolefinen, Polyamid, Polycarbonat, ABS oder sonstigen basieren, kann die Abschirmung der bedeutenden Wellenlängenbanden zu einer verlangsamten Erwärmung des Halbzeugs führen [112].

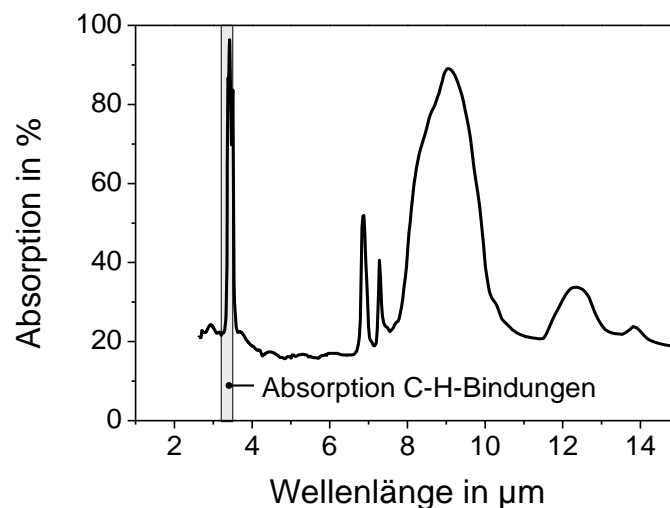


Abbildung 2.19: Absorption Quarzglas [113]

Im Allgemeinen kann durch die Wahl eines an das Material angepassten Strahlers ein hoher Anteil an Energie bei der Erwärmung von Organoblechen gespart werden, da das Produkt sich schneller erwärmt, ohne die Umgebung oder Maschine zusätzlich zu erwärmen [110]. Daher kommen für die Erwärmung von Organoblechen meist mittelwellige Strahler zum Einsatz und bei denen die Strahlung nicht nennenswert ins Material eindringt, sondern wie bei Kontaktheizverfahren durch Wärmeleitung in das restliche Volumen übertragen wird. Darüber hinaus hat die Einfärbung des zu erwärmenden

den Materials bei mittelwelliger IR-Strahlung eine nur geringe Auswirkung auf die Heizzeit [106]. Kurzwellige Strahler werden hingegen aufgrund ihrer größeren Eindringtiefe und Farbabhängigkeit eher in der Kunststoffschweißtechnik verwendet [100, 114].

Die Erwärmung mittels IR-Strahlung kann von einer Seite oder von zwei Seiten des Organoblechs erfolgen, wobei die Erwärmung von zwei Seiten schneller und über die Dicke gesehen gleichmäßiger verläuft und häufiger vorkommt. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 2.20 gezeigt, wobei „Abstand Heizstrahler“ der Abstand H zwischen dem Heizstrahler und der Oberfläche des Organoblechs ist und neben der Strahlungsintensität in erheblichem Maße die Strahlstärke auf das Organoblech beeinflusst.

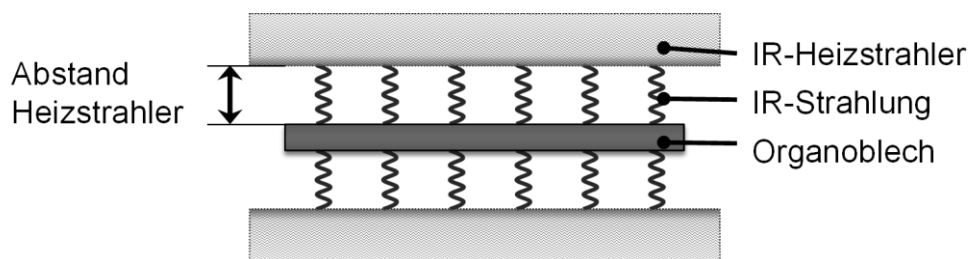


Abbildung 2.20: Schematische Darstellung der beidseitigen IR-Erwärmung von Organoblechen

Der geometrische Faktor der Einstrahlung kann mithilfe des Sichtfaktors $F_{1 \rightarrow 2}$ bestimmt werden, der die räumliche Anordnung des Strahlers der Fläche A_1 zum Organoblech der Oberfläche A_2 wie in Gleichung 2.19 beschreibt, wobei β_1 und β_2 die Raumwinkel sind, unter denen die Flächen gegenseitig erscheinen.

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\pi A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{H^2} dA_1 dA_2 \quad 2.19$$

Damit nimmt der Wärmestrom mit dem Quadrat des Abstands H zwischen Strahlungsquelle und Strahlungsempfänger ab. Für eine maximale Einstrahlung bieten sich einerseits ein geringer Abstand und andererseits eine orthogonale Anordnung von Organoblech und Strahler an. Allerdings steht ein zu geringer Abstand einer gleichmäßigen Erwärmung entgegen, da für großflächige Erwärmungen meist mehrere IR-Strahler zu Heizfeldern arrangiert werden, die in ihrem Übergang eine geringere Wärmeabstrahlung aufweisen [98].

Zwei Möglichkeiten der Materialerwärmung mittels IR-Strahlung sind die Leistungsregelung sowie die Leistungseinstellung. Bei der Leistungsregelung wird die Leistung des Heizstrahlers über die voreingestellte Oberflächentemperatur des zu erwärmenden Materials geregelt, die während des Erwärmungsvorgangs mittels Pyrometer gemessen wird. Dabei wird der Heizstrahler so lange mit der vollen Nennleistung betrieben, bis die geforderte Oberflächentemperatur des Organoblechs erreicht wird. Vorteil bei diesem Verfahren ist, dass die eingestellte Oberflächentemperatur niemals überschritten wird. Nachteilig ist allerdings die Anfälligkeit der optischen Temperaturmessung. Einerseits ist die einzustellende Emissionszahl für die präzise Messung der Oberflächentemperatur temperaturabhängig, andererseits muss für die Anbringung der Pyrometer eine Bohrung im IR-Strahler vorgesehen werden. Durch die Luftkühlung der Pyrometer kann auch die Oberfläche des Organoblechs an der Messstelle gekühlt werden¹. [106]

Bei der Leistungseinstellung ergibt sich die Temperatur des Strahlers aus der eingestellten Heizleistung als Prozentwert der Nennleistung. Vorteil ist, dass so eine auf das Material angepasste Leistung, bzw. Strahlertemperatur, eingestellt werden kann. Nachteil ist, dass die Leistungseinstellung empfindlich auf äußere Umgebungseinflüsse durch Temperaturschwankungen und konvektive Kühlung durch Luftzug reagiert. [106]

Der Wärmestrom $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2}$ bei der IR-Erwärmung vom IR-Strahler zur Organoblech-Oberfläche kann wie in Gleichung 2.20 unter der Annahme beschrieben werden, dass sowohl der IR-Strahler als auch das zu erwärmende Material schwarze Körper sind.

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = F_{1 \rightarrow 2} \cdot \sigma \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad 2.20$$

Dabei ist A_1 die Fläche des IR-Strahlers, T_1 die Temperatur des IR-Strahlers und T_2 die Temperatur der FKV-Platte.

2.4 Schlussfolgerung

Basierend auf den Betrachtungen des Standes der Technik ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

¹ Vorversuche an NFOB mit 2,5 mm Dicke und 15 cm Strahlerabstand zeigen, dass die Temperaturdifferenz bis zu 50 K zwischen gekühlter und ungekühlter NFOB-Oberfläche betragen kann.

- Die Verarbeitung thermoplastischer NFK ist nach heutigem Stand der Technik aufwändig und erschwert die Anwendung neuer, hybrider Verarbeitungsverfahren mit gleichzeitigem Umformen und Hinterspritzen
- Als Erwärmungsmethode für thermoplastische NFK kommt bisher nur Konduktion zum Einsatz, da als Halbzeug lediglich Hybridvliese eingesetzt werden und die Imprägnierung der Fasern im Umformwerkzeug aufgrund prozessverlängernder Maßnahmen vermieden wird
- Die Erwärmung thermoplastischer NFK mittels Konduktion in der Kalibrierpresse geht mit erheblichen prozesstechnischen Problemen einher wie beispielsweise
 - Hohe Investitionskosten und hoher Platzbedarf für mindestens zwei Pressen
 - Keine Flexibilität, da Imprägnierung und Umformung zeitlich wie räumlich nicht getrennt werden können
 - Anhaftung des Materials an den Heizflächen und damit Bedarf an teuren PTFE-Trennfolien
 - Einschluss von Emissionen und Geruch aufgrund der Rückstände auf den Trennfolien
 - Logistische Probleme, da der Transport von Vliesen aufgrund der nicht imprägnierten Naturfasern zu mikrobiellen Befall oder Pilzbildung führen kann (weiterer Röstvorgang)

Durch die Verwendung vorimprägnierter und vorkompakter Naturfaser-Organobleche können effizientere Prozessketten zur Herstellung von NFK-Bauteilen genutzt werden. Während die Umformung von NFK hinreichend untersucht ist, kann eine an die Verarbeitung konventioneller GFK- und CFK-Organobleche angelehnte Erwärmungsmethode zu enormen Prozessvorteilen führen und neue Märkte für thermoplastische NFK erschließen. Allerdings ist noch keine Erwärmungsmöglichkeit für NFOB hinreichend untersucht.

Die Vor- und Nachteile der Erwärmung von Organoblechen mittels der drei Wärmeübertragungsmechanismen Konduktion, Konvektion und Strahlung können in Tabelle 2.4 zusammengefasst werden und dienen als Grundlage für die Entwicklung einer neuen Erwärmungsmethode für NFOB.

Tabelle 2.4: Vor- und Nachteile der Wärmeübertragungsmechanismen bei der Erwärmung von Organoblechen

| | Konduktion | Konvektion | Strahlung |
|--|---|--|--|
| Gleichmäßigkeit der Erwärmung | Sehr gut über Dicke und Fläche | Unterseite wird schneller erwärmt | Abhängig vom Strahlerabstand und Leistungsregelung/ -einstellung |
| Anhaftung | Vorhanden, wird mittels Trennfolien minimiert | Vorhanden, wenn das Organoblech aufliegt | Keine |
| Heizzeit | Gering | Hoch | Gering |
| Möglichkeit für materialangepasste Erwärmung | Nein | Nein | Durch die Auswahl eines geeigneten Strahlers |
| Wirkungsgrad | Mittel | Gering | Hoch |
| Platzbedarf | Hoch | Gering | Gering |
| Großserientauglichkeit | Kaum | Kaum | Gegeben |

3 Entwicklung eines großserientauglichen Aufheizprozesses für naturfaserverstärkte Organobleche

Für die Entwicklung eines großserientauglichen Aufheizprozesses für NFOB werden zunächst die Anforderungen an den Prozess erarbeitet, anhand derer eine Erwärmungsmethode ausgewählt werden kann. Im Anschluss wird für die ausgewählte Methode ein Konzept entwickelt, mit dessen Hilfe die Anforderungen erfüllt werden können.

3.1 Auswahl einer geeigneten Erwärmungsmethode

Aus den theoretischen Vorbetrachtungen und dem Stand der Technik geht hervor, dass für die schonende und schnelle Erwärmung naturfaserverstärkter Organobleche eine genaue Prozessführung erforderlich ist. Für eine ökonomische Erwärmung, die die thermischen Restriktionen bei der Verarbeitung von NFOB erfüllt, ergeben sich Anforderungen an die Erwärmung, das Rohmaterial, das NFOB-Halbzeug sowie den Prozesseinfluss auf mechanische Eigenschaften sowie Geruch und Emissionen.

Erwärmung

Die Erwärmung der NFOB muss primär großserientauglich sein, um mit dem aktuellen, mehrstufigen Pressverfahren und einer Erwärmung in der Kontaktheizpresse mithalten zu können. Die einzelnen Anforderungen ergeben sich wie folgt:

- Die Heizzeit des NFOB darf die Imprägnierzeit in der Kalibrierpresse nicht überschreiten und darf demnach maximal 60 s betragen
- Nach der Heizzeit muss die Umformbarkeit des NFOB gewährleistet sein, d. h. Kerntemperatur $T_{Kern} > 158 \text{ }^\circ\text{C}$ (Kristallit-Schmelzbereiches von PP) [1]
- Eine thermische Schädigung der Naturfasern muss vermieden werden, d. h. Oberflächentemperatur $T_{Oberfläche} < 220 \text{ }^\circ\text{C}$
- Der Erwärmungsprozess muss reproduzierbar sein, sodass maximal $\pm 10 \text{ s}$ Heizzeitdifferenz zugelassen sind
- Die Erwärmung muss möglichst gleichmäßig sein, um lokale thermische Schädigungen zu vermeiden, d. h. die Temperaturdifferenz auf der Oberfläche muss $\Delta T_{Oberfläche} < 10 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen

Eine Zusammenfassung der Anforderungen und die Gültigkeit der einzelnen Heizvarianten ist in Tabelle 3.1 gegeben.

Tabelle 3.1: Auswahl einer Erwärmungsmethode anhand der Anforderungen an die Erwärmung

| Anforderung | Heizvarianten | | |
|--|---------------|------------|-----------|
| | Konduktion | Konvektion | Strahlung |
| Heizzeit max. 60 s | + | - | + |
| $T_{\text{Kern}} > 158 \text{ °C}$ | + | - | + |
| $T_{\text{Oberfläche}} < 220 \text{ °C}$ | o | + | + |
| Reproduzierbarkeit der Heizzeit $t_H \pm 10 \text{ s}$ | + | o | + |
| Keine Anhaftungsprobleme | - | o | + |

Kurzwellige IR-Strahlung

Mittelwellige IR-Strahlung

+: gültig; -: ungültig; o: eventuell gültig

Die Großserientauglichkeit ergibt sich aus der Begrenzung der Heizzeit auf 60 s, da diese bereits bei den NF/PP-Vliesen die maximale Imprägnierzeit in der Kalibrierpresse beträgt. Aufgrund der im vorigen Kapitel beschriebenen Zusammenhänge, ist eine Wärmeübertragung über Konduktion, wie sie derzeit für NF/PP-Vliese stattfindet, aufwändig und träge und die Rückstände der geschmolzenen Matrix haften auf der Werkzeugoberfläche, sodass für die Trennung teure PFTE-Folien verwendet werden müssen. Eine konvektive Erwärmung der NFOB als Alternative für die Kontaktheizung eignet sich aufgrund des geringen Wirkungsgrades nicht, da sie die Heizzeit erheblich steigern würde. Aus der Anforderung der Heizzeit kann daher nur eine Erwärmung der NFOB mittels Strahlung ausgewählt werden. Für die gleichmäßige Erwärmung der Ober- und Unterseite bietet sich ein beidseitiger Strahleraufbau an. Für eine reproduzierbare Erwärmung und die Gewährleistung der Umformbarkeit der NFOB bei gleichzeitiger Vermeidung der thermischen Schädigung von Naturfasern, muss allerdings ein Erwärmungskonzept entwickelt werden, mit welchem die Anforderungen erfüllt werden können.

Rohmaterial

Eine Erwärmung muss für folgende Materialien gewährleistet werden:

- die am häufigsten angewandten Naturfasern Hanf, Flachs und Kenaf in verschiedenen Röstgraden und verschiedenen chemischen Zusammensetzungen
- Polypropylen als Matrixmaterial

Die Anforderungen an das Rohmaterial machen deutlich, dass die Auswahl des IR-Strahlers entscheidend für die Reproduzierbarkeit der Erwärmung ist. Sowohl für eine farbumabhängige Erwärmungsqualität als auch für die schnelle Absorption der Strahlung durch das Polymer ist ein mittelwelliger IR-Strahler ohne Quarzglasrohr geeignet. Besonders bei der Änderung der Rohstoffe, d. h. bei Wahl von Naturfasern unterschiedlicher Röstgrade, ist die mittelwellige Strahlung der kurzwelligeren vorzuziehen, um gleichbleibende Erwärmungsergebnisse zu erzielen.

Halbzeug

Die Vorkompaktierung von NF/PP-Vliesen zu Organoblechen im Pressverfahren ist umso schwieriger und kostenintensiver, je höher der Kompaktierungsgrad² sein soll und je mehr eine Halbzeugdichte im Bereich der endgültigen Bauteildichte von 0,85 g/cm³ - 0,95 g/cm³ angestrebt wird. Für eine schnelle und effiziente Herstellung von NFOB mit Dichten oberhalb 0,75 g/cm³ ist besonders bei hohen Flächengewichten über 1500 g/m² entweder eine hohe Temperatur (> 200 °C) oder ein hoher Druck oder beides notwendig. Prozessbedingt kann die Naturfaserstruktur dadurch geschädigt werden, sodass eine Herstellung von NFOB mit möglichst geringer Dichte unterhalb 0,75 g/cm³ eine Faserschädigung und Geruchsentwicklung der Halbzeuge minimiert. Allerdings wird erwartet, dass ein geringer Kompaktierungsgrad, d. h. eine geringe Dichte und hohe NFOB-Dicke, mit einer schlechteren IR-Erwärmung einhergeht, da der Porengehalt im Material bei geringer Vorkompaktierung höher ist und die Wärmeleitung behindert. Je nach Anforderung an die Umformtemperatur sollen daher NFOB mit minimaler Dichte und maximaler Dicke ausgewählt werden können. Die Erwärmungsmethode muss für folgende Halbzeugeigenschaften ihre Gültigkeit haben:

² Höherer Kompaktierungsgrad = Höhere Materialdichte, geringere Dicke und weniger Porosität bei gleichbleibendem Flächengewicht

- Halbzeuge mit einer Dicke zwischen 2 mm und 4 mm müssen auf eine geeignete Umformtemperatur erwärmbar sein, ohne dass die Oberfläche thermisch geschädigt wird
- Halbzeuge mit einem Flächengewicht von 1000 g/m² und 1700 g/m² sollen ohne thermische Schädigung erwärmbar sein

Da mittelwellige IR-Strahlung im Allgemeinen auf der Oberfläche von Organoblechen absorbiert wird und der Materialkern durch Wärmeleitung erwärmt wird, ist der Temperaturgradient zwischen Oberfläche und Kern mit steigender Dicke auch steigend. Um zu gewährleisten, dass die Oberfläche bis zum Erreichen der Umformtemperatur im Kern nicht thermisch geschädigt wird, ist die Wahl einer materialselektiven Strahlertemperatur erforderlich, die auf der Oberfläche der NFOB primär vom Polymer absorbiert wird und nicht von den temperaturempfindlichen Fasern.

Prozesseinfluss

Für die Herstellung von NFK-Bauteilen aus NFOB, wird das Material zwei thermischen Belastungen ausgesetzt. Einmal bei der Herstellung der NFOB und einmal bei der Erwärmung für die nachfolgende Umformung. Das kann in zweierlei Hinsicht eine schädigende Wirkung auf die Fasern aufweisen. Einerseits ist bei zu hoher Temperatur bei der IR-Erwärmung eine thermische Belastung und Degradation der Fasern möglich. Andererseits kann die temperaturabhängige Schmelzviskosität der Matrix bei der Wahl einer zu geringen Umformtemperatur die Struktur der Fasern schädigen, indem eine unzureichende Fließfähigkeit des Materials zum Bruch der nicht plastisch verformbaren Fasern führt. Um mit der derzeit angewandten, mehrstufigen Verarbeitung von Vliesen konkurrieren zu können, muss der Prozessergebnis beim Thermoformen folgende Anforderungen erfüllen:

- Die mechanischen Eigenschaften (Biegeeigenschaften) des Bauteils dürfen nicht geringer sein als die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen, die mit herkömmlichem Prozess hergestellt wurden
- Die Geruchsnote der Bauteile nach dem Thermoformen darf nicht höher sein
- Die Summe der Emissionen der Bauteile nach dem Thermoformen darf nicht höher sein

Neben der Entwicklung des eigentlichen Aufheizprozesses ist demnach auch die Untersuchung des Prozesseinflusses für eine ganzheitliche Betrachtung notwendig.

3.2 Konzeptentwicklung für die Erwärmung von NFOB

Bisher galt der Einsatz von IR-Strahlung zur Erwärmung naturfaserverstärkter Polymere als ungeeignet, da aufgrund der nicht planen Oberfläche und dem Herausragen einzelner Fasern aus den Vliesen ein erhebliches Risiko einer Übertemperierung der Materialoberfläche besteht [108]. Die Vorkompaktierung der NF-Vliese zu NFOB mindert das Risiko einer Übertemperierung, dennoch zeigen Vorversuche mit einem mittelwelligen IR-Strahler und NFOB, dass eine Erwärmung anhand von Leistungsregelung durch Pyrometer zu unzureichenden Ergebnissen führen kann. Einerseits kann die Pyrometersmessstelle durch die Luftkühlung der Pyrometer auch gekühlt werden, was zu Temperaturdifferenzen von 50 K führen kann. Andererseits kann der Betrieb der Strahler auf voller Nennleistung zu Anfang des Erwärmungsprozesses in Strahlertemperaturen resultieren, deren emittierte Strahlung überwiegend von den Naturfasern absorbiert wird, statt vom Polymer. Auch wenn die Leistungsregelung zu einer schnelleren Erwärmung des Materials führt, ist sie für NFOB nicht ideal. Eine NFOB-Platte, die mittels leistungsgeregelter IR-Strahlung erwärmt wurde ist in Abbildung 3.1 zu sehen. Die Pyrometersmessstelle ist hierbei der einzige nicht thermisch geschädigte Bereich der Probe.

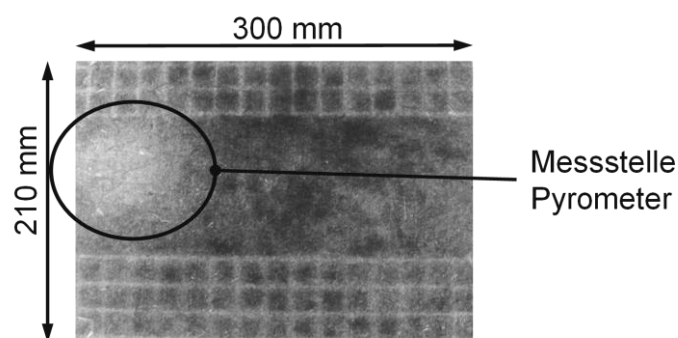


Abbildung 3.1: Verbrannte Platte bei IR-Erwärmung mit Leistungsregelung

Zwar ist die Strahlertemperatur bei einer Leistungseinstellung durch äußere Einflüsse wie Luftzug und Raumtemperatur beeinflussbar, allerdings können diese Einflüsse durch eine gute Abschirmung, beispielsweise mit Aluminiumfolie, minimiert werden,

sodass die Leistungseinstellung für die Erwärmung von NFOB die bessere Erwärmungsmethode darstellt. Bisher fehlen allerdings noch experimentelle Untersuchungen zur Eignung einer Nennleistung, bzw. Strahlertemperatur für eine optimale Erwärmung von NFOB. Die ideale Strahlertemperatur ist von entscheidender Bedeutung einerseits aufgrund der Geruchsentwicklung bei thermischer Belastung der Fasern und andererseits aus Effizienzgründen. Das Ziel ist demnach die Entwicklung eines schnellen, aber dennoch schonenden Aufheizverfahrens für NFOB. Im Idealfall müsste eine Infrarot-Strahlertemperatur so gewählt werden, dass gleichzeitig Folgendes erreicht wird:

- Maximale Absorption (minimale Transmission) der vom Strahler emittierten Strahlung durch das Polymer
- Maximale Transmission (minimale Absorption) der vom Strahler emittierten Strahlung durch die Naturfasern

Um herauszufinden, ob das Konzept funktionieren kann, wurden die Absorptionsspektren von sowohl PP (Abs. PP) als auch einer Hanffaser (Abs. NF) mittleren Röstgrades (laut Zulieferer) untersucht. Das Ergebnis ist über einen Wellenlängenbereich von 2,5 μm bis 15 μm in Abbildung 3.2 gezeigt, wobei auf einer zusätzlichen Abszisse die Temperatur aufgetragen ist, die nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz ihr Maximum der Strahlungsintensität bei der jeweiligen Wellenlänge erreicht.

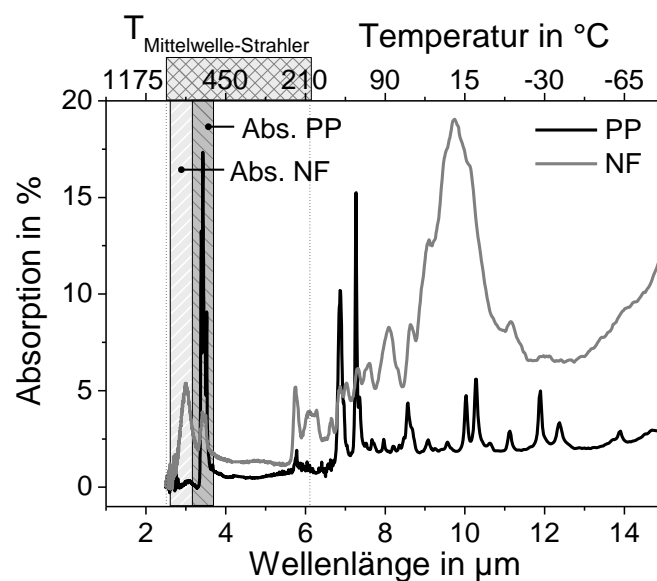


Abbildung 3.2: Absorptionsspektren von PP und Naturfasern sowie Temperaturbereich eines mittelwelligen IR-Strahlers über der Wellenlänge

Es ist zu erkennen, dass eine vollständig selektive Erwärmung des Polymers nicht möglich ist, da sich die Absorptionsspektren im Temperaturbereich eines Mittelwelle-IR-Strahlers von 200 °C - 800 °C, bzw. zwischen 6,1 μm - 2,7 μm teilweise überlagern und die Strahlungsintensität über einen breiten Wellenlängenbereich verteilt ist. Wenn der Wärmestrom \dot{E} eines Strahlers bei einer bestimmten Temperatur über die Wellenlänge aufgetragen wird (Integral der Strahlungsintensität), kann der Anteil am Wärmestrom in einem bestimmten Wellenlängenband wie in Abbildung 3.3 ermittelt werden.

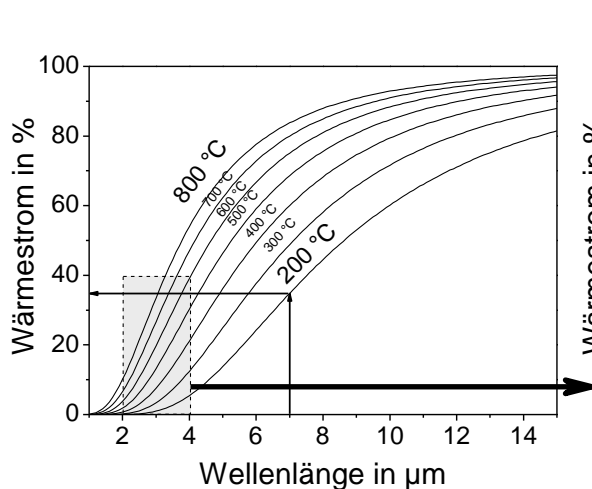


Abbildung 3.3: Anteiliger Wärmestrom verschiedener Strahlertemperaturen über der Wellenlänge

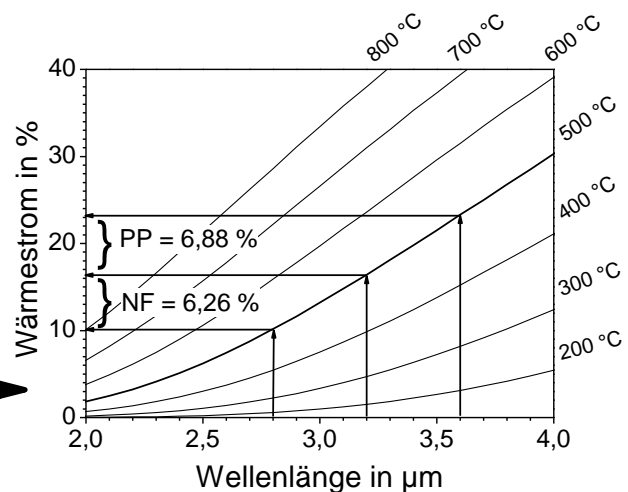


Abbildung 3.4: Anteiliger Wärmestrom für Naturfasern und PP bei einer Strahlertemperatur von 500 °C

Beispielsweise weisen 35 % der emittierten Strahlung eines 200 °C warmen IR-Strahlers eine kürzere Wellenlänge als 7 μm auf. Mit der Annahme aus den Absorptionsspektren in Abbildung 3.2, dass Naturfasern Strahlung überwiegend im Bereich 2,8 μm - 3,2 μm und PP im Bereich 3,2 μm - 3,6 μm absorbieren, können die prozentualen Anteile der Strahlung bei verschiedenen Strahlertemperaturen genau in diesen Wellenlängenbanden ermittelt werden. Abbildung 3.4 ist eine Detaildarstellung der Abbildung 3.3 im Bereich 2 μm - 4 μm und zeigt, dass 6,26 % des Wärmestroms eines 500 °C warmen, idealen IR-Strahlers in dem Wellenlängenband emittiert wird, welches von Naturfasern absorbiert wird. Der Anteil der von PP absorbiert wird liegt bei 6,88 %. Werden die Anteile am Gesamt-Wärmestrom für Naturfasern und PP über der Strahlertemperatur wie in Abbildung 3.5 aufgetragen, ist zu erkennen, dass bei Strahlertemperaturen unterhalb 625 °C Naturfasern prozentual gesehen weniger Strahlung absorbieren als PP.

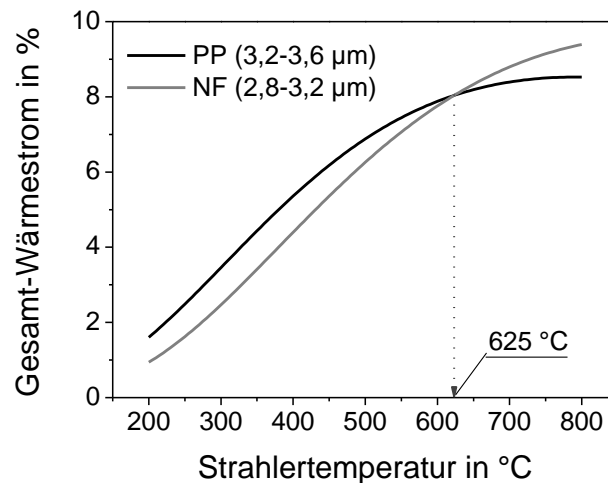


Abbildung 3.5: Gesamt-Wärmestrom, der besonders gut von Naturfasern oder PP absorbiert werden kann in Abhängigkeit der Strahlertemperatur

Erst bei Temperaturen oberhalb 625 °C emittiert der Strahler Wellenlängen, die überwiegend von Naturfasern absorbiert werden. Um eine möglichst schonende Erwärmung für NFOB zu gewährleisten, sind Strahlertemperaturen unterhalb 625 °C demnach geeigneter. Allerdings muss hier ein Kompromiss zwischen schneller und schonender Erwärmung gefunden werden, da Strahlertemperaturen weit unterhalb 625 °C gemäß Gleichung 2.17 einen geringeren Wärmestrom emittieren.

Diese Voruntersuchungen zeigen, dass das grundsätzliche Konzept einer materialelektiven Infrarot Erwärmung funktional ist. Allerdings wird auch deutlich, dass die Maximierung der PP-Absorption bei gleichzeitiger Minimierung der NF-Absorption eine genaue Kenntnis verschiedener Einflussparameter erfordert, deren Untersuchung noch aussteht. Dazu gehören:

- **Prozesstechnik:** Ziel ist, den Gegensatz zwischen schneller, aber dennoch thermisch schonender Erwärmung durch eine materialelektive IR-Strahlung zu realisieren. Die Wahl einer geeigneten IR-Strahlertemperatur ist demnach von entscheidender Bedeutung, um die Absorption der vom Strahler emittierten Strahlung in das Polymer zu maximieren und in die Naturfasern zu minimieren
- **Rohstoffeinflüsse:** Das Absorptionsspektrum einer NF hängt von ihrer chemischen Zusammensetzung und daher in hohem Maß auch ihrem Röstgrad ab. Eine genaue Kenntnis dieser Einflüsse ist notwendig, um zu evaluieren, welche

Rohstoffeigenschaften der Funktionalität der materialelektiven IR-Erwärmung besonders zuträglich sind

- Halbzeuge: Mittelwellige Strahlung wird auf der Oberfläche des Materials absorbiert, während der Halbzeugkern durch Wärmeleitung erwärmt wird. Aufgrund der inhärenten hohlen Naturfaserstruktur und des Porositätsgehalts in den NFOB, wird die Wärmeleitung ins Materialinnere erheblich erschwert. Eine genaue Kenntnis der Einflüsse zwischen Flächengewicht und Vorkompaktierung soll garantieren, dass das gesamte Material die Umformtemperatur erreicht, bevor die Oberfläche thermisch degradiert

Um diese Einflüsse zu untersuchen, wurden umfangreiche experimentelle Studien durchgeführt, die im nachfolgenden Kapitel zusammengefasst sind.

4 Experimentelle Studien zu den Einflüssen auf die IR-Erwärmung naturfaserverstärkter Thermoplaste

4.1 Versuchsmaterialien

Die in der deutschen Automobilindustrie am häufigsten verwendeten **Naturfasern**, Hanf, Flachs und Kenaf, werden in dieser Arbeit auf ihre Eignung für den materialselektiven IR-Aufheizprozess untersucht. Die jeweiligen Naturfasern liegen bereits geröstet vor, wobei bei den Hanffasern drei verschiedene Röstgrade untersucht werden, die an ihrer Farbe erkennbar sind. Darüber hinaus wird eine gebleichte Hanffaser untersucht, um den Einfluss der Farbe auf die IR-Absorption zu bestimmen. Flachs und Kenaf liegen in einem mittleren Röstgrad, allerdings von zwei verschiedenen Herstellern vor. Die vorliegenden Fasern sind weder chemisch noch physikalisch vorbehandelt und die chemische Zusammensetzung sowie die Anteile der einzelnen Nebenbestandteile sind nicht beeinflusst und nicht bekannt.

Als **Polymer** werden Standard-Polypropylen-Schmelzfasern der Firma Beaulieu International Group untersucht. Sie haben eine Faserfeinheit von 6,7 dtex/60 mm, eine Dichte von 0,91 g/cm³ und eine Schmelztemperatur von 160 °C. Dem Polymer ist kein Additiv beigemischt. Das Datenblatt befindet sich im Anhang (Abbildung 9.2).

Darüber hinaus wird ein **Naturfaservlies** der Firma Ziegler, HACOloft 6106, mit unterschiedlichen Flächengewichten 1.000 g/m², 1.200 g/m², 1.500 g/m² sowie 1.700 g/m² untersucht. Es besteht aus 30 Gew.-% Hanffasern, 20 Gew.-% Kenaffasern und 50 Gew.-% PP-Schmelzfasern. Dabei steht die NFOB-Halbzeugentwicklung nicht im Fokus dieser Arbeit. Im Großserienmaßstab stehen für die Herstellung von NFOB aus Hybridvliesen kontinuierliche Doppelband- oder Intervallheißpressen zur Verfügung, welche eine schnelle und ökonomische Imprägnierung und Kompaktierung der Vliese ermöglichen. Um jedoch ein möglichst großes Spektrum verschiedener NFOB-Halbzeugvarianten auf ihre Eignung für die IR-Erwärmung zu untersuchen, werden in dieser Arbeit NFOB in einem statischen Labor-Pressverfahren hergestellt. Wie in Abbildung 4.1 dargestellt, werden die NF/PP-Vliese für die Versuche in einer Laborheißpresse zu NFOB 10 Minuten bei 195 °C und 20 bar imprägniert und vorkompaktiert.

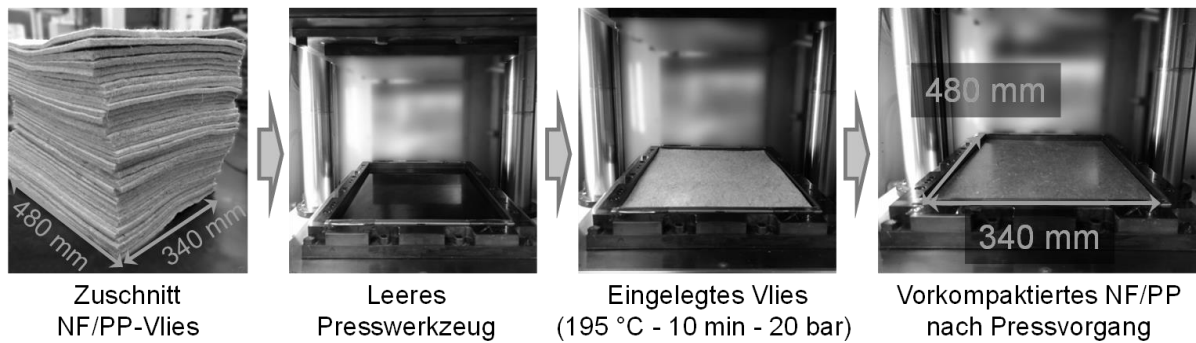


Abbildung 4.1: Herstellung von NFOB im Labormaßstab

Danach wird das Material mit einer Abkühlrate von 4,5 K/min unter Druck bis 60 °C gekühlt und dem Werkzeug entnommen. Die Prozessparameter zur Herstellung der NFOB im Labormaßstab sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Um eine möglichst hohe Variation hinsichtlich der Dichten zu generieren, werden die Platten isochor mithilfe von im Werkzeug eingelegten Distanzleisten verarbeitet.

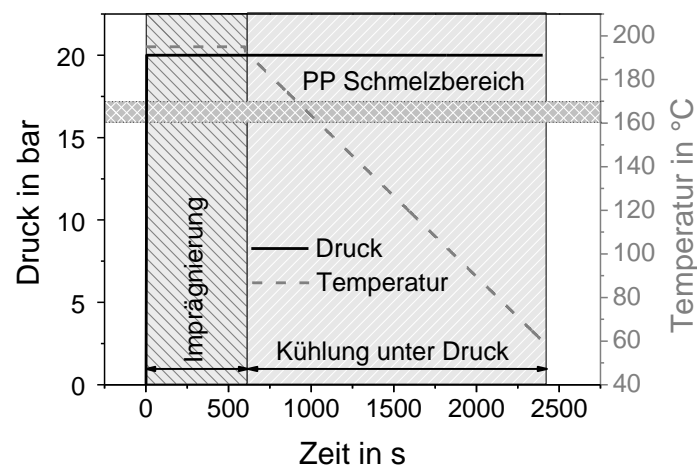


Abbildung 4.2: Prozessparameter für die Herstellung von NFOB im Labormaßstab

4.2 Entwicklung einer Messmethodik für die Untersuchung des IR-Erwärmungsverhaltens von NFOB

Basierend auf den Vorbetrachtungen wird zunächst die grundlegende Umgebung für eine ganzheitliche Untersuchung des IR-Erwärmungsverhaltens von NFOB entwickelt. Da das emittierte Wellenlängenband der IR-Heizstrahler eine große Bedeutung für die Absorption der Wärmestrahlung aufweist, sind einerseits die Ermittlung der Heizstrahlertemperatur und andererseits ihr Einfluss auf den zeitlichen Verlauf NFOB-Temperatur bedeutsam.

4.2.1 Ermittlung der Heizwendeltemperatur des IR-Strahlers

Die Versuchsmaterialien werden mithilfe eines mittelwelligen IR-Flächenstrahlers der Firma Krelus vom Typ G14-25-2.5 MINI 7.5 von beiden Seiten gleichmäßig erwärmt. Eine Strahlerseite besteht jeweils aus 4 Modulen mit den Abmessungen 248 x 248 x 65 mm³ und hat eine Gesamt-Nennleistung von 10 kW. Der Strahler ist durch eine Leistungseinstellung zwischen 0 % und 100 % stufenlos einstellbar, wobei 100 % Leistung laut Hersteller einer Strahlertemperatur von 815 °C entspricht. Da die Heizwendel des Strahlers nicht durch Quarzglas verdeckt sind und damit die ausschlaggebenden Wellenlängenbanden nicht vom Glas absorbiert werden, emittiert der Krelus IR-Strahler über seinen gesamten Leistungsbereich homogen ca. 92 % seiner Strahlung [112].

Für eine materialelektive Erwärmung ist eine genaue Kenntnis des Wellenlängenbandes in Abhängigkeit der eingestellten Leistung des IR-Strahlers notwendig. Die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen eingestellter Leistung und Temperatur kann zu fehlerhaften Messergebnissen führen, da für 0 % Leistungseinstellung eine gleichbleibende Umgebungstemperatur Voraussetzung ist. Daher wird die Temperatur des IR-Strahlers in Abhängigkeit der Leistung gemessen.

Die Heizwendeln dürfen aus Sicherheitsgründen nicht berührt werden, daher ist die Ermittlung der Strahlertemperatur durch Thermoelemente nicht möglich. Stattdessen wird eine Probeplatte der Größe 100 x 100 mm² aus Werkzeugstahl zwischen die beiden Strahler gelegt und ihre Temperatur gemessen. Der Abstand des oberen Strahlers zur Platte beträgt 65 mm, der Abstand des unteren Strahlers 55 mm, was dem Mindestabstand mit eingelegtem Gitter zur Aufnahme des Materials entspricht. Die Platte wird mit Hochofenfarbe schwarz lackiert, um die Absorption der Strahlung zu maximieren und die Zeitdauer der Erwärmung zu verkürzen. Auf dem Metallstück ist ein Thermoelement fixiert, welches die Temperatur des Materials misst. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.3 zu sehen.

Die Strahlerleistung wird sowohl für das untere als auch das obere Heizfeld vom ausgeschalteten Strahler, d. h. 0 % Leistung, auf denselben Wert eingestellt, beispielsweise 20 %, wobei die Temperatur der Platte minütlich aufgezeichnet wird, bis die Temperaturdifferenz ΔT über zwei Minuten weniger als 1 °C beträgt. Zur Kontrolle dieser Temperatur wird von einer höheren Strahlerleistung, beispielsweise 40 %, auf 20 % abgekühlt und auch hier die Plattentemperatur im Zeitabstand von einer Minute

aufgezeichnet bis $\Delta T < 1 \text{ }^\circ\text{C}$ über zwei Minuten beträgt. Die Aufheiz- und Abkühlkurve sind beispielhaft in Abbildung 4.4 für eine Leistung von 20 % dargestellt.

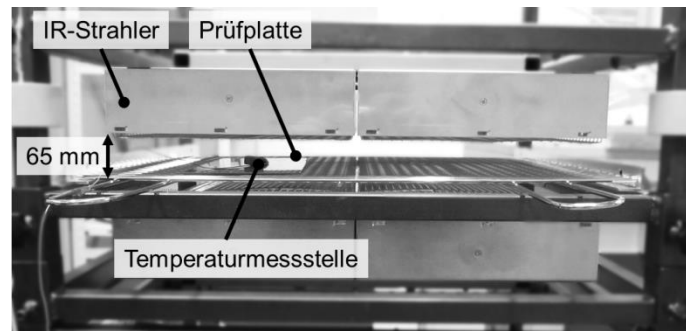


Abbildung 4.3: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Strahlertemperatur

Unter der Annahme einer logarithmischen Annäherung der Plattentemperatur an die Strahlertemperatur, können logarithmische Regressionskurven durch die Messwerte gelegt werden. Der Schnittpunkt dieser Kurven wird als Strahlertemperatur definiert und beträgt für 20 % Leistung $T_{strahler} = 299,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

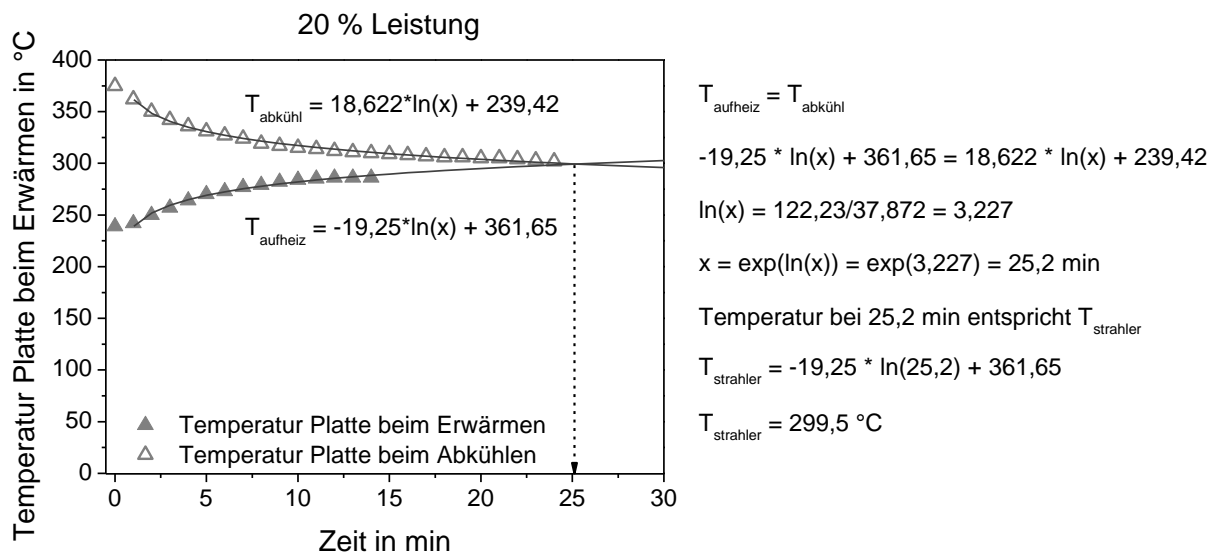


Abbildung 4.4: Ermittlung der Heizstrahlertemperatur bei 20 % Leistung

Für alle weiteren Leistungseinstellungen zwischen 10 % und 90 % wird in 10 %-Schritten nur eine Abkühlkurve, für 100 % nur eine Aufheizkurve aufgezeichnet. Für die Berechnung der Strahlertemperatur mittels logarithmischen Regressionskurven werden auf nach Erreichen von $\Delta T < 1 \text{ }^\circ\text{C}$ weitere 10 Minuten für den Zeitfaktor als Sicherheitswert addiert. Beispielsweise beträgt der Fehler bei der Ermittlung der Strahlertemperatur bei 20 % Leistung mit dieser Methode maximal $6 \text{ }^\circ\text{C}$, was einer Abweichung

des Wellenlängen-Strahlungsmaximums von $0,025 \mu\text{m}$ entspricht. Damit ist die Messung der Strahlertemperatur durch diese Näherung hinreichend genau. Die Temperaturen zwischen den einzelnen Leistungseinstellungen werden linear interpoliert. Die Strahlertemperaturen über der Leistung sind in Abbildung 4.5 zusammengefasst, wobei sich der Temperaturfehler aus dem Fehler des Messgerätes (0,5 % des Messwertes + $1 \text{ }^\circ\text{C}$), dem Fehler des Sensors ($\pm 0,75 \%$ des Messwertes), der Abweichung des Temperaturmesswertes und des berechneten Wertes nach Erreichen von $\Delta T < 1 \text{ }^\circ\text{C}$ zusammensetzt. Bei 0 % Leistung wird die aktuell gemessene Umgebungstemperatur von $23 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen. Die genauen Messwerte sind im Anhang in Tabelle 9.1 zusammengefasst.

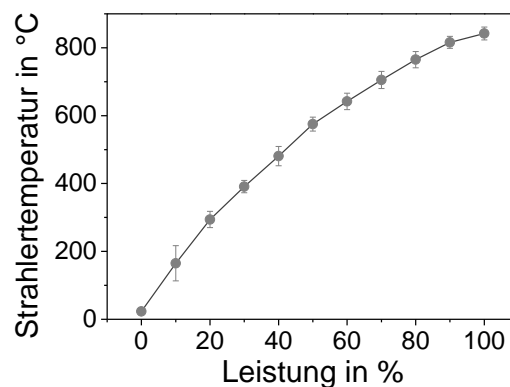


Abbildung 4.5: Strahlertemperatur in Abhängigkeit der Leistung des IR-Feldes

Damit kann nun eine genaue Einstellung der Strahlertemperatur erfolgen, wodurch eine materialelektive IR-Erwärmung ermöglicht wird.

4.2.2 Ermittlung eines Heizstrahler-Temperaturprozessfensters

Die Kenntnis über die IR-Strahlertemperatur dient im nächsten Schritt der Ermittlung eines optimalen Strahler-Temperaturprozessfensters, welcher eine materialelektive Erwärmung der NFOB zulässt. Zur reinen Untersuchung des Einflusses der Strahlertemperatur auf die IR-Erwärmung von NFOB müssen folgende Randbedingungen vor der Versuchsdurchführung erfüllt werden:

- Die Vermeidung lokaler thermischer Degradation muss durch eine **gleichmäßige Erwärmung der Materialoberfläche** gewährleistet werden

- Der Temperaturgradient von der Oberfläche in den Kern auf beiden Seiten des NFOB muss gleich sein, um einen über die Dicke **symmetrischen Wärmestrom** zu gewährleisten
 - Da die Einstrahlung mit dem Quadrat des Abstandes zwischen Material und Strahler zu- und abnimmt, kann ein symmetrischer Wärmestrom nur durch eine gleichbleibende Dicke der Probekörper über ihrer Temperatur erreicht werden, weshalb eine **Lofting** der NFOB in Abhängigkeit ihrer Temperatur ausgeschlossen werden muss
 - Bei horizontaler Lage des NFOB müssen **konvektive Einflüsse** auf die Oberflächentemperatur ausgeschlossen werden

Untersuchung der Gleichmäßigkeit der Oberflächentemperatur bei IR-Erwärmung

Die Gleichmäßigkeit der Erwärmung auf der Oberfläche von NFOB wird anhand von Wärmebildaufnahmen festgestellt. Abbildung 4.6 zeigt die Temperaturverteilung des IR-Strahlers der Größe 500 mm x 500 mm sowie die Temperaturverteilung von Probeplatten derselben Größe.

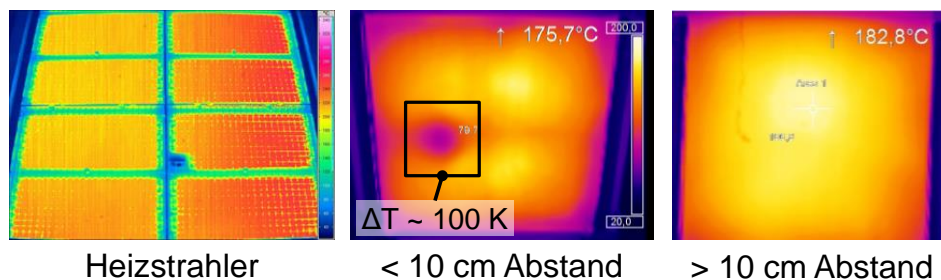


Abbildung 4.6: Wärmebildaufnahmen zur Ermittlung der Gleichmäßigkeit von Heizstrahlertemperatur und Oberflächentemperatur von NFOB

Das Wärmebild des Heizstrahlers zeigt, dass seine Temperatur nicht gleichmäßig verteilt ist und dass, unabhängig von der eingestellten Temperatur, die Bohrstelle zur Aufnahme der eingebauten Pyrometer deutlich kühler ist. Diese Stelle wirkt sich auch auf die Temperatur der Probekörper aus, wenn der Abstand zwischen Heizstrahler und Probe weniger als 10 cm beträgt. Bei einem Abstand von 1 cm (ohne Gitter zur Aufnahme) kann der Unterschied zwischen höchster und geringster Temperatur des Probekörpers bis zu 100 K betragen. Bei größeren Abständen als 10 cm zwischen Heizstrahler und Probekörper ist zwar kein Einfluss der Pyrometer-Bohrung auf die Ober-

flächentemperatur erkennbar, aber dennoch nur im Zentrum der Platten eine gleichmäßige Erwärmung gewährleistet. Die Randbereiche werden aufgrund von konvektiver Kühlung durch die Umgebungsluft sowie Strahlungsverluste zur Seite weniger stark erwärmt. Demnach ist es vorteilhaft, die Probekörper während der Erwärmung in der Mitte ober- und unterhalb der Heizstrahler zu positionieren. In den Randbereichen um den Strahler wird für alle weiteren Versuche Aluminiumfolie zur Reflexion der Strahlung angebracht.

Symmetrie des Wärmestroms über der Dicke: Messung des NFOB-Loftings

Um jegliche Einflüsse der Ausgangsdichte auf die Veränderung der Probekörperdicke bei Temperaturänderungen auszuschließen, werden NFOB mit einem Flächengewicht von 1700 g/m^2 und einer Vlies-Ausgangsdicke von 8 mm auf Dicken von 2 mm und 7 mm zu NFOB kompaktiert. Die Probekörper der Größe 50 mm x 50 mm werden in einem Ofen 60 s konvektiv bei Ofentemperaturen von $100 \text{ }^\circ\text{C}$, $150 \text{ }^\circ\text{C}$ sowie $200 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmt. Die Probekörperdicken werden vor Einlegen in den Ofen und innerhalb von 5 s nach der Erwärmung am noch erwärmten Probekörper gemessen. Die Änderung der Dicke nach 60 s im Ofen bei verschiedenen Temperaturen im Vergleich zur Raumtemperatur (RT) ist in Abbildung 4.7 zu sehen.

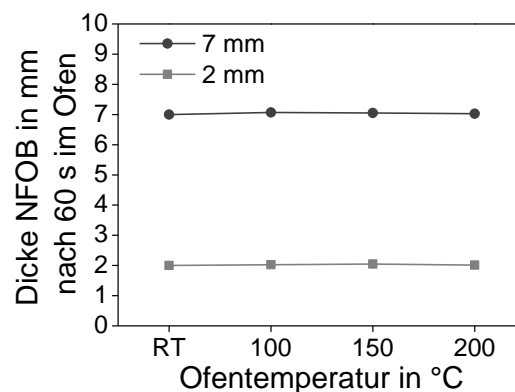


Abbildung 4.7: Einfluss der Ofentemperatur auf die Dickenänderung von NFOB

Es ist zu erkennen, dass weder die 2 mm noch die 7 mm dicken NFOB zum Lofting bei hohen Temperaturen neigen und ihre Dicke auch bei $200 \text{ }^\circ\text{C}$ konstant bleibt. Die Standardabweichungen der Dickenmessung sind so gering (Variationskoeffizient $< 1 \%$), dass sie im Diagramm nicht erkennbar sind. Da auch bei der IR-Erwärmung von NFOB keine Dickenänderung des Materials erwartet wird, ist auch der beidseitige

Abstand zwischen Strahler und Material konstant, was sich positiv auf die Symmetrie des Wärmestroms von der Oberfläche in den Kern auswirkt.

Versuchsaufbau für die Untersuchung der IR-Erwärmung

Für die Untersuchung der IR-Erwärmung von NFOB werden beide Probekörperoberflächen mit symmetrischem Abstand zwischen den IR-Feldern mithilfe des in Kapitel 4.2.1 beschriebenen IR-Strahlers erwärmt. Der Versuchsaufbau ist horizontal und in Abbildung 4.8 dargestellt.

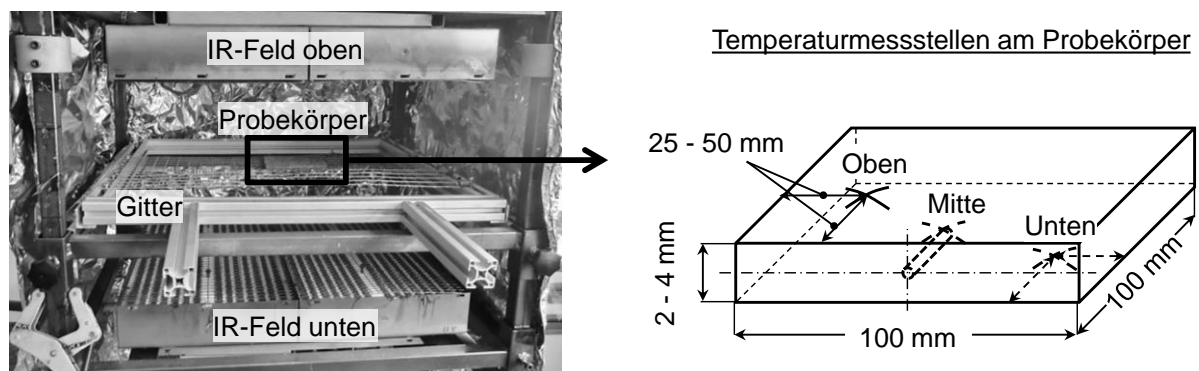


Abbildung 4.8: Versuchsaufbau für die Untersuchung der IR-Erwärmung

Die Probekörper liegen mittig im IR-Feld auf einem Metallgitter. Die Gitterdrähte haben eine Dicke von 1,4 mm und einen Gitterabstand von 17,5 mm. Sie schirmen damit etwa 6,6 % der unteren Probekörperoberfläche von der Strahlung ab. Alle Probekörper sind mit einem Bohrloch für die Messung der Kerntemperatur versehen. Die Messstellen an der Ober- und Unterseite sind etwa 25 mm – 50 mm von der Probekante entfernt. Die Bohrtiefe für die Messung der Kerntemperatur liegt zwischen 25 mm – 50 mm und ist damit viel größer als die Probekörperdicke. Damit wird der Einfluss der Randtemperatur bei der Messung der Kerntemperatur minimiert. Der IR-Ofen ist von drei Seiten mit Aluminiumfolie geschlossen, welche einerseits die Luftzirkulation minimiert und andererseits die Strahlung reflektiert. Das Gitter kann zur nicht geschlossenen Seite herausgezogen werden und wird zwischen den einzelnen Versuchen nicht im IR-Feld gelagert, damit es sich nicht erwärmt und die Messungen durch Wärmeabgabe an die Probekörper verfälscht.

Symmetrie des Wärmestroms über der Dicke: Untersuchung konvektiver Einflüsse

Bei horizontaler Lage der NFOB-Proben zwischen den Heizstrahlern ist ein konvektiver Einfluss durch Luft in nicht evakuierter Versuchsumgebung unumgänglich. Anders als in einem Konvektionsofen, in welchem das Material durch die Luft erwärmt wird, tritt hier der gegensätzliche Fall ein. Die Materialoberfläche wird konvektiv gekühlt, da sich die Luft nicht so schnell erwärmt wie die Materialoberfläche. Damit kehren sich die Nußeltzahlen in den Gleichungen 2.13 und 2.14 um und die Oberseite der Platte wird somit schneller erwärmt als die Unterseite. Zusätzlich wird ein Teil der Strahlung auf der Unterseite der Probekörper vom Aufnahmegitter reflektiert.

Für die Untersuchung der konvektiven Einflüsse auf die IR-Erwärmung von NFOB werden Probekörper mit einem Flächengewicht von 1700 g/m^2 und einer Dicke von 3 mm bei 572 °C (50 % Leistung) im IR-Heizfeld auf eine für NFOB-Halbzeuge empfohlene Mindestkerntemperatur von 185 °C erwärmt [1]. Wie in Abbildung 4.9 zu erkennen ist, wird die Temperatur im Kern und auf der Oberfläche der Probekörper oben und unten über Thermoelemente (TE) vom Typ K gemessen und über ein Zeitintervall von 0,5 s aufgezeichnet. Eine solche Messung ist beispielhaft in Abbildung 4.10 für einen Strahlerabstand von 20 cm dargestellt. Die TE werden mithilfe eines hochtemperaturbeständigen Polyimid-Klebebands auf den Oberflächen der Proben fixiert. Da die Imidgruppen des Polymers keine typischen C-H-Gruppen aufweisen, wird die Strahlung im relevanten Wellenlängenbereich nicht durch das Klebeband abgeschirmt [2].

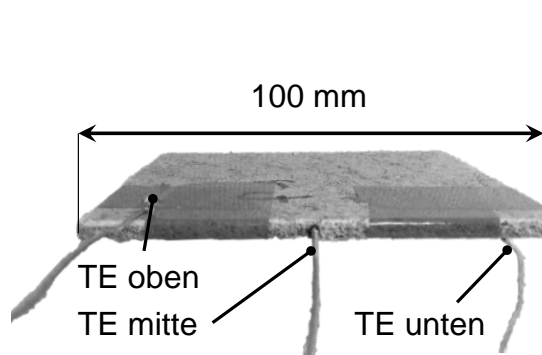


Abbildung 4.9: Messung der Oberflächen- und Kerntemperatur an einem NFOB-Probekörper

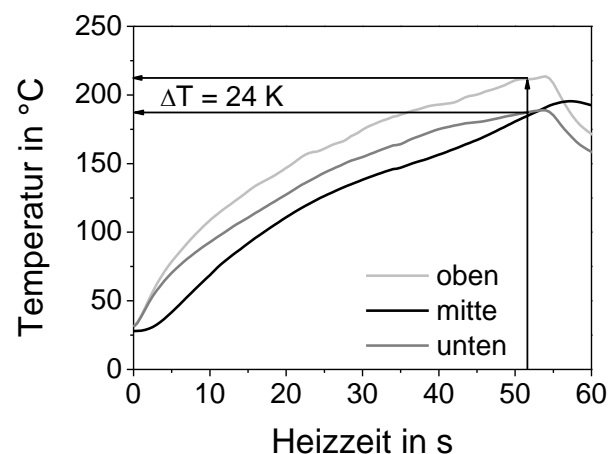


Abbildung 4.10: Ungleichmäßige Erwärmung der Ober- und Unterseite eines NFOB-Probekörpers bei gleicher Leistungseinstellung des oberen und unteren IR-Strahlers

Versuche bei verschiedenen Strahlerabständen zum NFOB zwischen 15 cm - 25 cm zeigen, dass unabhängig vom Strahlerabstand die Oberseite des Organoblechs immer schneller erwärmt wird als die Unterseite, obwohl die Strahlerabstände zwischen den Probekörperoberflächen die gleichen Distanzen und beide Strahlerseiten die gleiche Leistungseinstellung aufweisen. Unabhängig vom Strahlerabstand beträgt dieser Temperaturunterschied zwischen 20 K - 30 K, was für temperatursensible Materialien wie NF nicht hinnehmbar ist. Daher wird bei allen nachfolgenden Versuchen die Leistung der Strahler oben und unten symmetrisch um die benötigte Leistung und versuchsabhängig in einem Bereich von 5 % - 10 % Unterschied eingestellt, bis beide Oberflächentemperaturverläufe etwa gleich sind.

Ermittlung des Heizstrahler-Temperaturprozessfensters

Für die Ermittlung eines Heizstrahler-Temperaturprozessfensters für NFOB werden Probekörper mit einem Flächengewicht von 1700 g/m² und einer Dicke von 3 mm zunächst bei 572 °C (50 % mittlere Leistung) im IR-Heizfeld bei den Strahlerabständen 15 cm und 20 cm auf eine Kerntemperatur von 185 °C erwärmt. Die maximale Oberflächentemperatur der NFOB soll auf 225 °C begrenzt werden, um eine Rauchentwicklung bei den Versuchen zu vermeiden. Abbildung 4.11 zeigt, dass die Wahl eines größeren Strahlerabstandes das Risiko einer Übertemperaturierung der Materialoberfläche minimiert, da beim Erreichen der definierten Kerntemperatur die Oberflächentemperatur unterhalb von 225 °C liegt. Für die Ermittlung des Temperaturprozessfensters wird daher ein Heizstrahlerabstand von 20 cm gewählt.

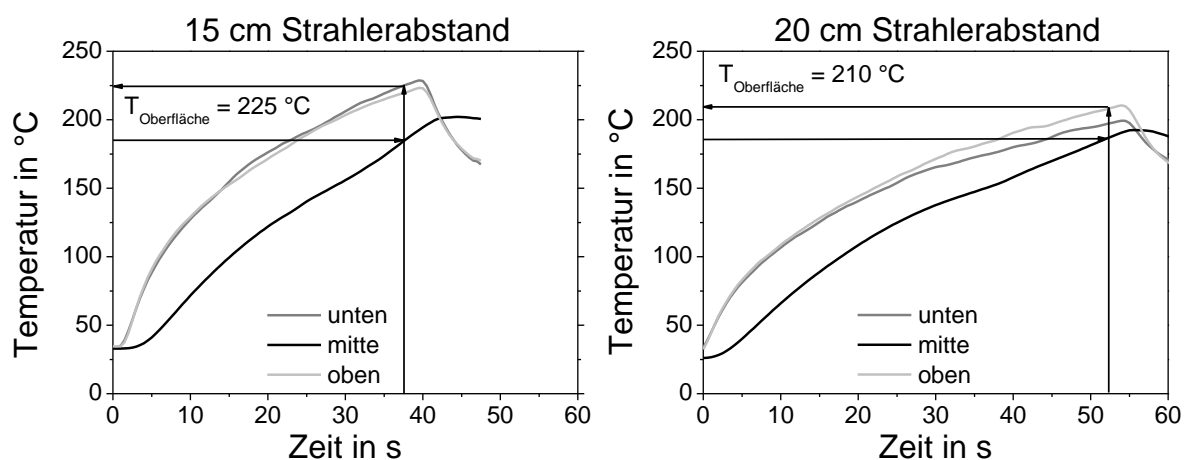


Abbildung 4.11: IR-Vorversuche zur Ermittlung des optimalen Strahlerabstandes

Im Anschluss werden 5 verschiedene Leistungen am IR-Feld gewählt, aus denen die Heizstrahlertemperaturen 459 °C, 493 °C, 546 °C, 592 °C, und 626 °C generiert werden. Bei allen Temperaturen außer 626 °C ist die emittierte Strahlung in dem Wellenlängenbereich, welcher von PP stärker absorbiert wird als von Naturfasern. Abbildung 4.12 zeigt die Zeit bis die Kerntemperatur $T_{Kern} = 185\text{ °C}$ erreicht ist mit der dazugehörigen höheren von beiden Oberflächentemperaturen über verschiedene IR-Strahlertemperaturen.

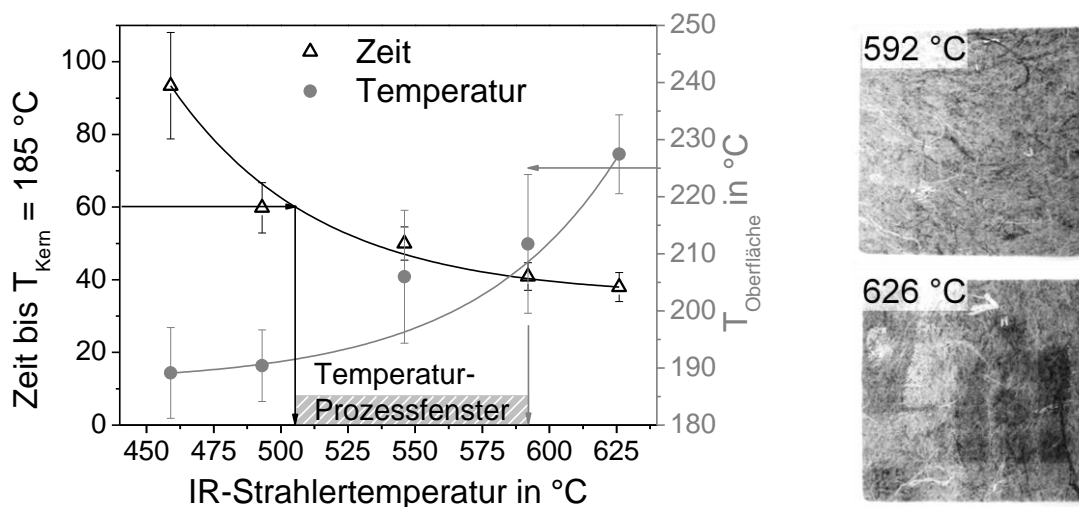


Abbildung 4.12: (links) Temperaturprozessfenster bei der IR-Erwärmung von NFOB und jeweils 20 cm Abstand zwischen Probe und IR-Strahler, (rechts) Proben

Es ist zu erkennen, dass mit steigender IR-Strahlertemperatur die Zeit bis $T_{Kern} = 185\text{ °C}$ erreicht ist verkürzt wird, die Oberflächentemperatur steigt jedoch gleichzeitig an. Aufgrund der Großserientauglichkeit wird die Zeit bis zum Erreichen der Kerntemperatur auf 60 s begrenzt, sodass die Mindestheizstrahlertemperatur etwa 505 °C beträgt. Bei gleichzeitiger Begrenzung der Oberflächentemperatur lässt sich die Heizstrahlertemperatur im Hinblick auf hohe Temperaturen auf ungefähr 590 °C begrenzen. Alle mit 626 °C Strahlertemperatur erwärmten Probekörper weisen Oberflächentemperaturen oberhalb 220 °C auf und degradieren thermisch, was an ihrer Dunkel- und Verfärbung in Abbildung 4.12 (rechts) zu erkennen ist. Die minimale und maximale Temperatur bilden das Heizstrahler-Temperaturprozessfenster, von 500 °C - 590 °C, welches mit der theoretischen Betrachtung in Kapitel 3.2 korreliert.

Zusammenfassung

Die Vorversuche zur Bestimmung eines Heizstrahler-Temperaturprozessfensters haben gezeigt, dass eine gleichmäßige Erwärmung der Probekörperoberfläche ab Strahlerabständen von 10 cm gewährleistet werden kann. Weiterhin ist die Symmetrie der Erwärmung über die Materialdicke ausschließlich von konvektiven Einflüssen abhängig, da die Erwärmung von NFOB nicht zum Lofting führt. Diese Symmetrie kann gewährleistet werden, indem die Leistung des oberen Strahlers versuchsabhängig 5 % - 10 % geringer eingestellt wird als die des unteren.

Bei 20 cm Strahlerabstand ergibt sich ein Heizstrahler-Temperaturprozessfenster zwischen 500 °C - 590 °C, welches mit den theoretischen Betrachtungen zur Absorption von PP und NF korreliert. Höhere Strahlertemperaturen emittieren Strahlung in einem Wellenlängenbereich, der von NF stärker absorbiert wird als von PP, weshalb sich nur Temperaturen unterhalb von 590 °C für eine schonende Erwärmung der NFOB eignen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird eine konservative Heizstrahlertemperatur von 572 °C ausgewählt, bzw. die Leistungseinstellung unten soll 45 % und die Einstellung oben 55 % betragen. Diese Einstellung bildet einen möglichst guten Kompromiss zwischen Aufheizgeschwindigkeit und Oberflächentemperatur.

4.2.3 Einfluss der Probekörpergröße auf die IR-Erwärmung von NFOB

Die Untersuchung des Einflusses der Probekörpergröße dient primär der Ermittlung der minimalen Probekörpergröße für das verwendete IR-Strahlerfeld, die eine Skalierung auf Realbauteile erlaubt. Hintergrund ist die Bestrebung, die Versuche im Labormaßstab möglichst effizient zu gestalten und die erforderliche Materialmenge gering zu halten. Bei zu kleinen Probekörpern besteht die Gefahr, dass die Kerntemperatur nicht nur durch den Temperaturgradienten von der Oberfläche zum Kern erwärmt wird, sondern auch durch die Wärmeleitung von den Kanten der Probekörper. Das kann dazu führen, dass sich kleine Probekörper schneller erwärmen als große und dadurch die reale Erwärmungsdauer für größere Bauteile nicht richtig ermittelt werden kann. Der Versuchsaufbau für die Ermittlung des Einflusses der Probekörpergröße wird Analog zu 4.2.2 gewählt, der IR-Strahler hat eine Größe von 500 mm x 500 mm. Um eine Variation in der Dichte und dem Flächengewicht möglichst zu vermeiden, werden nicht die in Kapitel 4.1 beschriebenen Platten aus der Laborheizpresse untersucht, da die

Probekörper aus ca. 15 verschiedenen Platten entnommen werden müssten. Zwei Platten mit den Abmaßen 1200 mm x 1200 mm wurden von der Firma J. H. Ziegler zur Verfügung gestellt, die auf einer Doppelbandpresse gefertigt wurden und aus denen jeweils fünf quadratische Probekörper mit den Kantenlängen 100 mm, 150 mm, 200 mm und 250 mm herausgesägt werden konnten. Kleinere Probekörper werden nicht untersucht, da die Befestigung von Thermoelementen mittels Polyimid-Klebeband auf zu kleiner Fläche schwierig ist und sich die Thermoelemente während des Heizvorgangs von den Probekörpern lösen können, was die Messungen verfälscht. Die verwendeten Proben werden aus einem Naturfaservlies mit einem mittleren Flächengewicht von 1700 g/m² auf eine Dicke von 2,5 mm und eine Dichte von ungefähr 0,68 g/cm³ kompaktiert. Sie werden, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, bei einer mittleren Leistung von 50 % (45 % unten, 55 % oben) und 15 cm Strahlerabstand erwärmt bis $T_{Kern} = 185\text{ °C}$ erreicht ist. Abbildung 4.13 zeigt die Zeit bis zum Erreichen von $T_{Kern} = 185\text{ °C}$ in Abhängigkeit der Probekörper-Kantenlänge sowie die dazugehörige, höhere der beiden Oberflächentemperaturen.

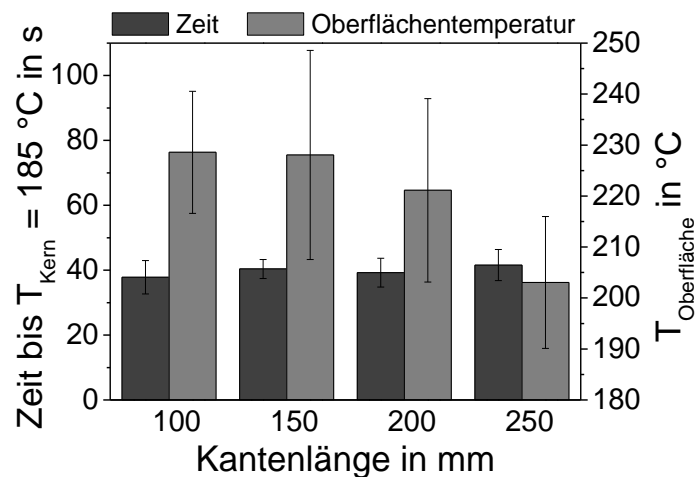


Abbildung 4.13: Einfluss der Probekörpergröße auf die IR-Erwärmung von NFOB

Es ist zu erkennen, dass sich die Heizzeit in Abhängigkeit der Kantenlänge nicht signifikant ändert. Die Oberflächentemperatur zeigt einen Trend zu geringeren Temperaturen mit steigender Kantenlänge, allerdings ist der Unterschied innerhalb der Standardabweichung aller Messwerte. Da die Probekörpergröße keine Auswirkung auf die Heizzeit hat und mit größer werdender Kantenlänge die Oberflächentemperatur und damit auch die Wahrscheinlichkeit einer thermischen Schädigung sinkt, werden im

weiteren Verlauf dieser Arbeit kleinere Probekörper der Kantenlänge 100 mm verwendet. Zwar lässt sich ihre Oberflächentemperatur nicht direkt auf ein Realbauteil hochskalieren, allerdings führt die Annahme einer zu hohen Oberflächentemperatur primär zur Vermeidung thermischer Degradation bei größeren Abmessungen.

4.3 Einfluss der Rohstoffqualität auf die Erwärmung von NFOB

Die Fähigkeit eines Materials, bestimmte IR-Wellenlängenbanden zu absorbieren, hängt maßgeblich von seiner chemischen Zusammensetzung ab. Bei pflanzlichen Naturfasern ist die chemische Zusammensetzung nicht nur bei verschiedenen Fasertypen, sondern auch innerhalb der gleichen Naturfaserfamilie sehr schwankend. Sie wird durch verschiedene Anbauarten und -orte und in hohem Maß auch durch die verschiedenen Röstgrade beeinflusst. Ob und welche Bestandteile einen positiven oder negativen Einfluss auf die IR-Erwärmung haben, wird im Folgenden untersucht. Ein positiver Einfluss auf die IR-Erwärmung bedeutet bei Naturfasern im Sinne der Zielsetzung der Arbeit, dass sie die IR-Strahlung schlechter absorbieren.

Die Untersuchungen zur Absorptionsfähigkeit werden mittels Fourier Transform Infrarot-Spektroskopie (FTIR) mithilfe eines Nicolet Spektrometers im Spektralbereich 4000 1/cm - 600 1/cm und einer abgeschwächten Totalreflexions- (ATR-) Messeinrichtung mit Zinkselenid-Messkristall durchgeführt. Mithilfe der FTIR-Messungen wird die Transmission von Materialien bei verschiedenen Wellenlängen bestimmt. Die Reflexion kann hierbei vernachlässigt werden [3]. Damit ist die Absorption A in diesen Wellenlängenbanden gemäß Gleichung 4.1 mit einem rein qualitativen Zusammenhang gegeben [3].

$$A = 1 - T \quad 4.1$$

Abbildung 4.14 zeigt die Rohdaten der Transmission und die Absorption einer Hanffaser mittleren Röstgrades im Wellenzahlbereich 3700 1/cm - 750 1/cm. Aufgrund der Streuverluste der Probe ist die Basislinie des Spektrums nicht gerade und wird für die Interpretation und Auswertung der Messdaten über lokale Minima, bzw. definierte Wellenzahlen, die als oben gezeigte Stützpunkte fungieren, korrigiert [4]. Zwischen 3520 1/cm - 2650 1/cm liegt der Wellenzahlbereich, in welchem mittelwellige IR-Strahler ihre temperaturabhängigen Strahlungsmaxima aufweisen. Damit wird der Abschnitt der Absorptionskurve als IR-Absorptionsbereich definiert.

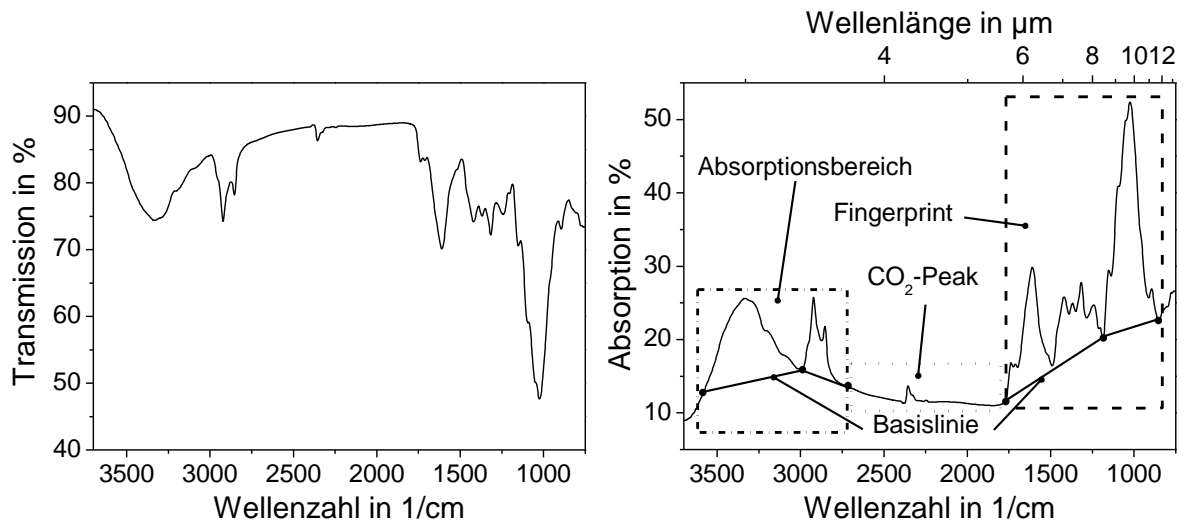


Abbildung 4.14: FTIR-Transmission (links) und Basislinienkorrektur an Absorption (rechts) einer Hanffaser mittleren Röstgrades

Der Bereich zwischen 2650 1/cm - 1750 1/cm ist für die Untersuchungen irrelevant. Hier liegt auch der Bereich, der von der CO₂-Konzentration in der Luft abhängig ist und gelöscht wird, um die Messungen nicht durch Atemluft zu verfälschen. Zwischen 1750 1/cm und 880 1/cm liegen Absorptionsmaxima, die dem Kohlenstoffgerüst der Moleküle zuzuordnen sind. Die Lage dieser Maxima ist stoffspezifisch und kann zur Identifizierung von Materialien dienen, weshalb der Bereich auch Fingerprintbereich genannt wird [4, 5]. Dieser Bereich dient als Referenz für die gesamte Messung der jeweiligen Faser. Abbildung 4.15 zeigt die grafische Ermittlung des prozentualen Absorptionsverhaltens einer Hanffaser anhand der Flächenmethode.

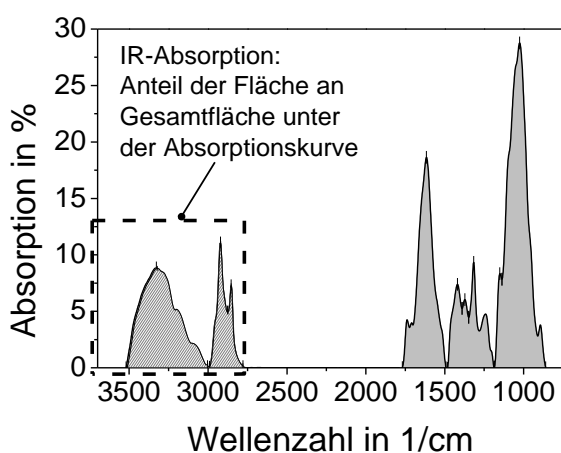


Abbildung 4.15: Ermittlung der IR-Absorption einer Hanffaser mittleren Röstgrades anhand eines FTIR-Spektrums

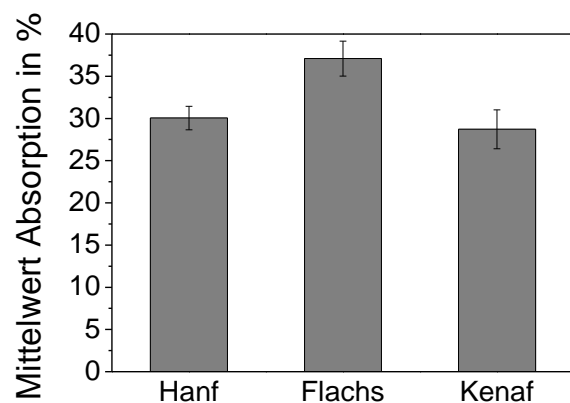


Abbildung 4.16: Anteil der IR-Absorption an der Gesamtabsorption verschiedener Naturfasern

Die Fläche unter der Absorptionskurve zwischen 3520 1/cm - 2650 1/cm wird anteilig an der Gesamtfläche, d.h. zwischen 3520 1/cm - 2650 1/cm und 1750 1/cm - 880 1/cm bestimmt und als Absorption in % definiert. Diese Absorption ist materialabhängig und beträgt für die meisten Naturfasern zwischen 30 % und 35 %. Abbildung 4.16 zeigt die so ermittelte Absorption von Hanf, Flachs und Kenaf mittleren Röstgrades. Demnach absorbiert Flachs besonders gut IR-Strahlung im mittelwelligen Bereich, während von Kenaf die geringste Absorptionsfähigkeit besitzt.

4.3.1 Einfluss des Röstgrades auf die Absorption von IR-Strahlung

Um den Einfluss des Röstgrades zu untersuchen, werden Hanffasern mit drei unterschiedlichen Röstgraden sowie gebleichte Hanffasern auf ihre Fähigkeit, IR-Strahlung in definierten Wellenlängenbanden zu absorbieren, untersucht. Dadurch soll einerseits der Einfluss der Farbe, andererseits der Einfluss der röstbedingten chemischen Veränderung von Hanffasern auf die IR-Absorption ermittelt werden. Abbildung 4.17 zeigt die Bestimmung der Röstklasse der Hanffasern nach ihrer Farbe und der dafür vorgesehenen Farbskala.

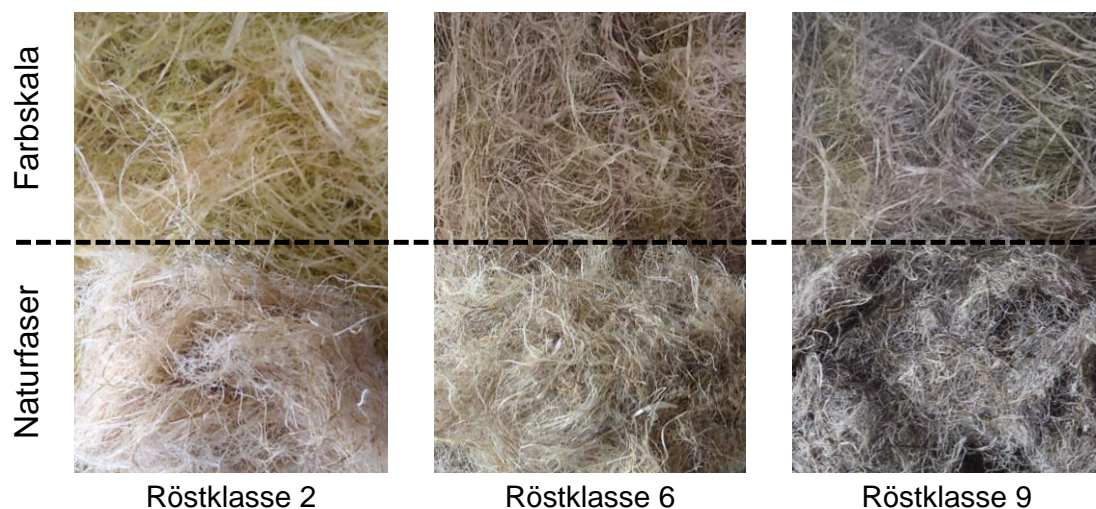


Abbildung 4.17: Optische Bestimmung der Röstklasse nach Farbskala

Zur Validierung dieser subjektiven Wahrnehmung werden zusätzlich NIR-Spektren aufgenommen und der A1000-Quotient gebildet wie in Abbildung 4.18 dargestellt. Der A1000-Quotient der drei verschiedenen gerösteten Hanffasern sowie die dazugehörige Röstklasse nach Farbe sind in Abbildung 4.19 gegenübergestellt.

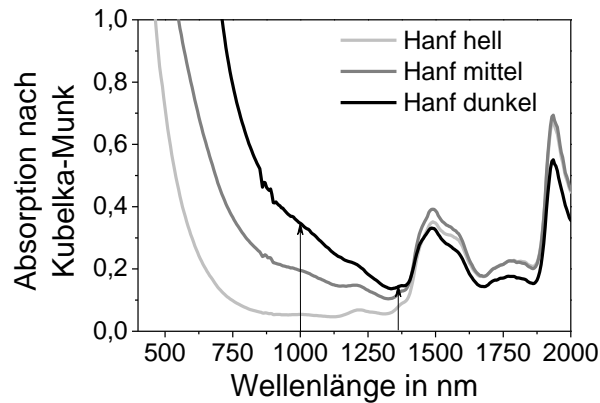


Abbildung 4.18: NIR-Spektren von hellen, mittleren und dunklen Hanffasern

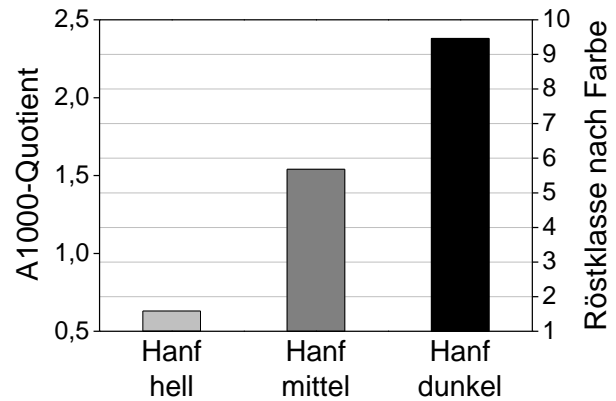


Abbildung 4.19: A1000-Quotient von Hanffasern unterschiedlichen Röstgrades sowie Vergleich mit Röstklassen

Die hellen Hanffasern haben somit die Röstklasse (RK) 2, die mittleren Fasern RK 6 und die dunklen Hanffasern RK 9. Dies entspricht auch der optischen Bestimmung der Röstklassen mit der Farbskala nach Abbildung 2.5, bzw. Abbildung 4.17. Somit ist für die Untersuchung der Auswirkung des Röstgrades auf die Absorption von IR-Strahlung fast das gesamte Spektrum von Röstklassen abgedeckt.

Um die Veränderung der Absorption durch die Variation des Röstgrades zu ermitteln, wird die mittlere geröstete Hanffaser (RK 6) als Referenz angesetzt, sodass die Absorption der anderen Fasern in Relation dazu dargestellt werden kann. Das Ergebnis des Vergleichs ist in Abbildung 4.20 dargestellt.

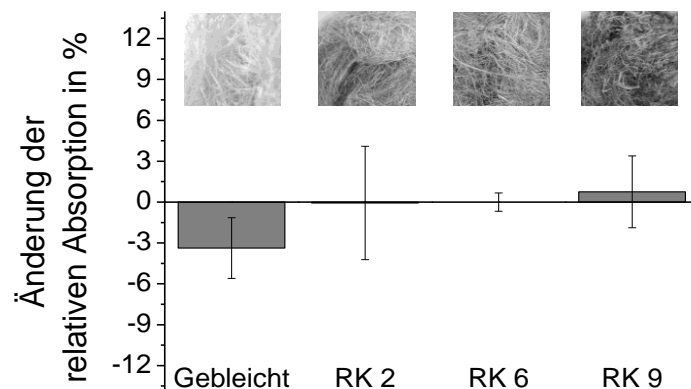


Abbildung 4.20: Änderung der relativen Absorption der IR-Strahlung von Hanffasern verschiedener Röstklassen (Farben) im Vergleich zu RK 6

Wie zu erwarten ist, absorbieren die gebleichten Hanffasern weniger IR-Strahlung, wobei die dunkleren Hanffasern stärker absorbieren und damit ein unvorteilhafteres Absorptionsverhalten zeigen. Der Unterschied in der Absorption beträgt allerdings nur

wenige Prozent und die Abweichungen innerhalb der Klassen sind vergleichsweise groß.

Um zu untersuchen, ob die festgestellten geringen Unterschiede der Absorption einen signifikanten Einfluss bei der IR-Erwärmung in Bezug auf Erwärmungszeit und Oberflächentemperatur aufweisen, werden IR-Erwärmungsversuche direkt am Material durchgeführt. Der Versuchsaufbau wird analog zum Aufbau in Kapitel 4.2.2 gewählt. Allerdings werden die einzelnen Hanffasern händisch mit PP-Schmelzfasern im Gewichtsverhältnis 50:50 gemischt und in einer Laborpresse zu 3 mm dicken Probekörpern mit einer resultierenden Dichte zwischen $0,69 \text{ g/cm}^3$ - $0,72 \text{ g/cm}^3$ gepresst. Für eine gleichmäßige händische Verteilung der Fasern und des Polymers eignen sich insbesondere runde Probekörper mit einem Durchmesser von 50 mm. Größere oder prismatische Probekörper führen zu ungleichmäßigen Faseranhäufungen, da die Fasern vorher nicht in einer Krempel aufgelöst wurden, was die Gleichmäßigkeit der IR-Erwärmung negativ beeinflussen kann. Abbildung 4.21 visualisiert die Probekörper, die bei 50 % mittlerer Leistungseinstellung im IR-Feld bis zum Erreichen von 185 °C im Kern erwärmt werden. Zur Vermeidung einer thermischen Schädigung, und infolge dessen einer Farbänderung durch Verkohlung, wird der Strahlerabstand beidseitig auf 30 cm eingestellt. Das Ergebnis der IR-Erwärmung ist in Abbildung 4.22 dargestellt.

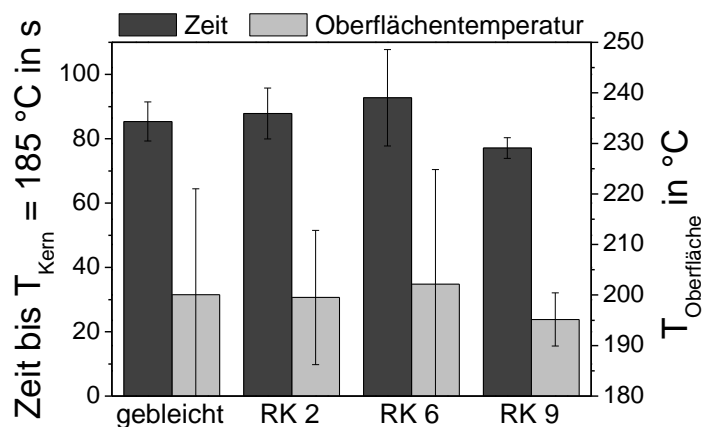
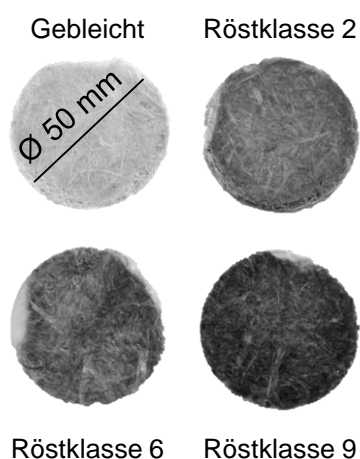


Abbildung 4.21: Probekörper für die Untersuchung des Einflusses der Röstklasse auf die IR-Erwärmung

Abbildung 4.22: Einfluss der Röstklasse von Hanffasern auf die Erwärmung von NFOB mittels IR-Strahlung

Die Oberflächentemperaturen der Probekörper sowohl mit gebleichten als auch unterschiedlich gerösteten Naturfasern betragen im Schnitt etwa 200 °C. Die großen Standardabweichungen sind durch eine ungenaue Temperaturmessung aufgrund der sehr kleinen Probekörperoberfläche und damit zu kleinen Klebefläche für die Fixierung der Thermolemente bedingt, welche sich zum Teil bereits ab Oberflächentemperaturen von 100 °C von der Probe lösen. Zwar ist die Heizzeit für Probekörper mit RK 9 die geringste, allerdings ist keine eindeutige Tendenz für die Heizzeit erkennbar. Vielmehr liegen die Unterschiede in den Heizzeiten darin begründet, dass die händische Herstellung der Probekörper eine inhomogene Verteilung der Fasern, des Polymers und der Porosität in den einzelnen Probekörpern bedingt hat. Dies erklärt zusätzlich die großen Standardabweichungen der Oberflächen- und Kerntemperaturen.

Das Ergebnis lässt darauf schließen, dass die Farbänderung der Proben durch verschiedene Naturfaser-Röstklassen eine vernachlässigbare Wirkung auf die Absorption mittelwelliger IR-Strahlung hat, zumal emittierte Strahlung bei einer Leistungseinstellung von 50 % im Wellenlängenbereich liegt, der zu einem größeren Teil vom PP absorbiert wird als von Naturfasern. Damit zeigt sich, dass die spektroskopisch ermittelten geringen Unterschiede in der Absorption von Naturfasern verschiedener Farben und Röstgrade keinen signifikanten Einfluss auf die IR-Heizzeit und Oberflächentemperatur aufweisen. Für das Aufheizkonzept bedeutet dies, dass eine Variation der Röstklassen zwar keine Chance für eine Verbesserung bietet aber auch kein Risiko für eine Einschränkung der Funktionalität birgt.

4.3.2 Einfluss der chemischen Zusammensetzung von Naturfasern auf die Absorption von IR-Strahlung

Beim Röstprozess werden unkontrolliert chemische Bestandteile der Naturfasern abgebaut und/oder umgewandelt. Jeder dieser Bestandteile zeigt in der IR-Spektroskopie unterschiedliche Reaktionen auf IR-Wellenlängen im interessierenden Bereich zwischen 3520 1/cm - 2650 1/cm. Um zu untersuchen, ob ein bestimmter Nebenbestandteil von Hanf, Flachs und/oder Kenaf eine signifikante Auswirkung auf die IR-Erwärmung hat, werden die einzelnen Nebenbestandteile der Naturfasern erst einzeln chemisch herausgewaschen, danach wird ihre Absorption mittels FTIR bestimmt.

Die Naturfasern werden wie folgt behandelt:

- Entfernung von Wachsen und Fetten nach [47]
Je 5 g der entsprechenden Faser werden 24 h bei 105 °C getrocknet und anschließend in eine Extraktionshülse gegeben und mit 500 ml n-Hexan bei 95 °C mittels einer Soxhlet-Apparatur extrahiert. Anschließend werden die Fasern erneut 24 h bei 105 °C getrocknet.
- Entfernung von Pektin nach [47]
Je 5 g der entsprechenden Faser werden 24 h bei 105 °C getrocknet und anschließend in einem Becherglas mit Magnetprüher mit destilliertem Wasser bedeckt und dreimal je eine Stunde bei Raumtemperatur gerührt. Zwischen den Rührungen wird jeweils das Wasser ausgetauscht. Dann werden die Fasern mit 5 %-iger wässriger Ammoniumoxalat-Lösung bedeckt und zweimal je eine Stunde bei Raumtemperatur gerührt. Zur Entfernung des Ammoniumoxalats werden die Fasern erneut mit destilliertem Wasser bedeckt und eine Stunde bei Raumtemperatur gerührt. Anschließend werden die Fasern erneut 24 h bei 105 °C getrocknet.
- Entfernung von Hemicellulose nach [47]
Je 5 g der entsprechenden Faser werden 24 h bei 105 °C getrocknet. In einem Becherglas mit Magnetprüher und Thermometer wird ein Puffersystem aus einer wässrigen Natriumcitratlösung und wässrigen Chlorwasserstoff-Lösung jeweils mit einer Konzentration von $c = 0,1 \text{ mol/l}$ auf den pH-Wert 6 eingestellt und auf 40 °C erwärmt. Dann werden die getrockneten Fasern sowie 5 g des Enzyms Xylanase Trichoderma Viride zugegeben. Nach 24 h wird das Gemisch auf 80 °C erhitzt und für 30 Minuten gerührt, um die Xylanase zu deaktivieren. Dann werden die Fasern abfiltriert, mit destilliertem Wasser gewaschen und 24 h bei 105 °C getrocknet.
- Entfernung von Lignin nach [47]
Je 5 g der entsprechenden Faser werden 24 h bei 105 °C getrocknet und anschließend in einen Rundkolben mit Magnetprüher und Rückflusskühler gegeben, mit 400 ml Ethanolamin versetzt und 24 h bei 95 °C refluxiert. Nach der Behandlung werden die Fasern abfiltriert und zunächst mit destilliertem Wasser gespült, bis das ablaufende Filtrat keine Gelbfärbung mehr aufweist. Danach werden die Fasern noch mal mit Methanol gewaschen und anschließend 24 h bei 105 °C getrocknet.

Abbildung 4.23 zeigt die Änderung der relativen Absorption der behandelten Naturfasern in Relation zu den unbehandelten Fasern. Die Auswaschung von Pektin, dem Nebenbestandteil, welcher hauptsächlich bei der Faserröste abgebaut wird, führt bei allen drei Fasern zu einer marginalen Erhöhung der Absorption. Dass die Erhöhung der Röstklasse tendenziell mit einer erhöhten Absorption einhergeht ist auch schon in Kapitel 4.3.1 beschrieben. Die Ergebnisse in diesem Kapitel legen nahe, dass die Ursache im Abbau des Pektins liegt. Die Auswaschung von Wachsen, Hemicellulose und Lignin führt zu keiner eindeutigen Änderung der Absorption im Vergleich zu unbehandelten Fasern. Die größte Änderung im Absorptionsverhalten wird durch die Auswaschung von Lignin bei Kenaffasern erreicht, da Kenaf von allen drei untersuchten Fasern den höchsten Ligningehalt aufweist.

Wie in Kapitel 4.3.1 werden bei den spektroskopisch ermittelten geringen Unterschieden in der Absorption keine Einflüsse auf die Heizzeit und Oberflächentemperatur bei der IR-Erwärmung erwartet. Lediglich die Auswaschung von Lignin zeigt einen deutlichen Unterschied in der Absorption und soll hier genauer untersucht werden. Wie im vorigen Kapitel werden die einzelnen Fasern händisch mit PP-Schmelzfasern gemischt und im Gewichtsverhältnis 50:50 zu Probekörpern mit 50 mm Durchmesser gepresst und im IR-Feld erwärmt. Der Versuchsaufbau wird analog zum Aufbau in Kapitel 4.2.2 gewählt. Das Ergebnis der IR-Erwärmung ist in Abbildung 4.24 zu sehen. Da auch hier die Fasern für die Probekörper von Hand gemischt wurden, ist die Dichte- und Porositätsverteilung innerhalb der Probekörper nicht konsistent, was zu Variationskoeffizienten von bis zu 18 % bei der Zeit und 11 % bei der Messung der Oberflächentemperatur führt.

Obwohl Flachs von allen drei Fasersorten die höchste Absorption laut FTIR aufweist, ist die Heizzeit geringer als bei Hanf, allerdings ist hier die Oberflächentemperatur am höchsten. Das deutet auf eine erhöhte Strahlungsabsorption hin, auch wenn die Änderung zwischen den Hanf- und Flachs-Oberflächentemperaturen innerhalb ihrer Standardabweichungen liegen.

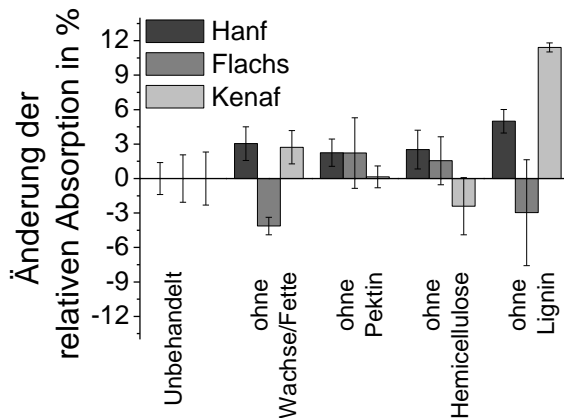


Abbildung 4.23: Änderung der relativen Absorption der IR-Strahlung von behandelten im Vergleich zu unbehandelten Naturfasern

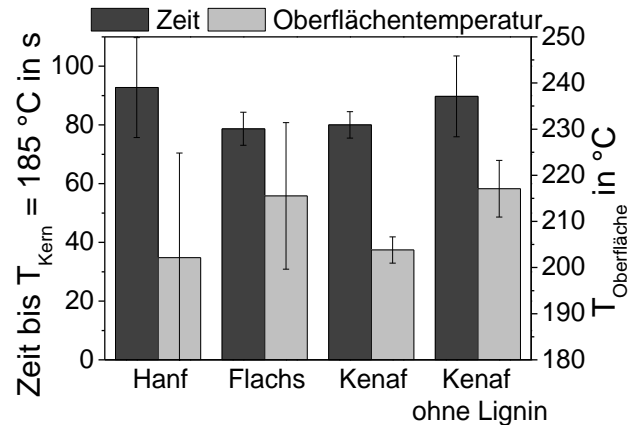


Abbildung 4.24: Einfluss verschiedener Naturfasern und ihrer chemischen Zusammensetzung auf die Erwärmung von NFOB mittels IR-Strahlung

Bei der Erwärmung der Probekörper mit Lignin-ausgewaschenen Kenaffasern kann die erhöhte Oberflächentemperatur im Vergleich zu unbehandeltem Kenaf durch die höhere Absorption der Fasern erklärt werden. Allerdings ist die mittlere Heizzeit etwas höher, was einer erhöhten Absorption der Strahlung widerspricht. Daher kann auch hier die Annahme getroffen werden, dass die Unterschiede in der Heizzeit und Oberflächentemperatur nicht durch unterschiedliche chemische Zusammensetzungen der Fasern zustande kommen.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass weder der Röstgrad noch die chemische Zusammensetzung von Naturfasern einen signifikanten Einfluss auf die IR-Erwärmung aufweisen und sich somit alle untersuchten Naturfasern unabhängig von ihrer Herkunft, ihrem Anbau und ihrem Röstgrad bei der IR-Erwärmung ähnlich verhalten. Die Unterschiede in der Heizzeit und Oberflächentemperatur sind vielmehr durch die NFOB-Beschaffenheit wie Dichte, Porositätsgehalt sowie Porositäts- und Faserverteilung zu erklären. Während die Porositäts- und Faserverteilung industriell gefertigter NFOB konsistent ist, ist ihre Vorkompaktierung ein entscheidender Faktor bei der IR-Erwärmung, der noch untersucht werden muss und im Nachfolgenden als Halbzeugbeschaffenheit definiert wird.

4.4 Einfluss der Halbzeugbeschaffenheit auf die IR-Erwärmung von NFOB

Es wird erwartet, dass ein geringer Kompaktierungsgrad mit einer schlechteren IR-Erwärmung einhergeht, da der Porengehalt im Material bei geringer Vorkompaktierung sehr hoch ist und die Wärmeleitung behindert. Aus diesem Grund muss für jeden Fall und jedes einzelne Bauteil ein Kompromiss zwischen den erforderlichen IR-Erwärmungseigenschaften und den Kosten für die Erreichung eines hohen Kompaktierungsgrades gefunden werden. Für alle nachfolgenden Untersuchungen zum Einfluss der Halbzeugbeschaffenheit auf die IR-Erwärmung wird ein Versuchsaufbau analog zu Kapitel 4.2.2 gewählt.

4.4.1 Probenherstellung

Zur Untersuchung des Einflusses der Halbzeugbeschaffenheit auf die IR-Erwärmung werden NF/PP-Vliese mit vier verschiedenen Flächengewichten 1000 g/m², 1200 g/m², 1500 g/m² und 1700 g/m² auf fünf verschiedene Dicken zwischen 2 mm und 4 mm in der in Kapitel 4.1 beschriebenen Laborheizpresse imprägniert und zu NFOB vorkompaktiert. Aus jeder Dicke-/Flächengewichts-Kombination werden 24 Probekörper für die Untersuchung der IR-Erwärmung hergestellt. Die dazugehörigen Dichten je Dicke und Flächengewichte sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Mit steigender Dicke wird die Dichte der NFOB geringer und der Porengehalt nimmt somit zu. Die schraffierten Zellen markieren Platten, die auf eine gleiche Dichte von 0,45 g/cm³ ± 0,01 g/cm³ bei unterschiedlichen Flächengewichten kompaktiert wurden. Die konstante Dichte erlaubt die Untersuchung des Einflusses der Flächengewichtsänderung auf die IR-Erwärmung von NFOB.

Tabelle 4.1: Variation der Dicken und Dichten von im Labormaßstab hergestellten NFOB-Platten

| Flächengewicht | Dichte in g/cm ³ bei einer Dicke von | | | | |
|-----------------------|---|-------------|-------------|-------------|------|
| | 2 mm | 2,5 mm | 3 mm | 3,5 mm | 4 mm |
| 1000 g/m ² | 0,45 | 0,38 | 0,31 | 0,27 | |
| 1200 g/m ² | 0,57 | 0,45 | 0,37 | 0,33 | 0,29 |
| 1500 g/m ² | 0,66 | 0,52 | 0,46 | 0,41 | 0,35 |
| 1700 g/m ² | 0,74 | 0,59 | 0,50 | 0,44 | 0,38 |

Aus den Platten werden quadratische Probekörper der Kantenlänge 100 mm geschnitten und bei den Strahlerabständen 15 cm und 20 cm bei konstanter mittlerer Strahlertemperatur von 572 °C bis zum Erreichen der Kerntemperatur von 185 °C erwärmt. Gleichzeitig werden die Kern- und die Oberflächentemperaturen unten und oben in Abhängigkeit der Zeit aufgezeichnet.

4.4.2 Allgemeiner Einfluss des Flächengewichts auf die IR-Erwärmung

Um den reinen Einfluss des Flächengewichts von NFOB auf die IR-Erwärmung zu untersuchen, werden Probekörper mit gleichem Vorkompaktierungsgrad, d. h. einer Dichte von $0,45 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, bei vier verschiedenen Flächengewichten zwischen 1000 g/m^2 und 1700 g/m^2 mit einer Variation der Dicken zwischen 2 mm und 4 mm, im IR-Feld bis zum Erreichen einer Kerntemperatur von 185 °C erwärmt. Abbildung 4.25 zeigt die Heizzeit und die dazugehörige Oberflächentemperatur bei 15 cm und 20 cm Strahlerabstand.

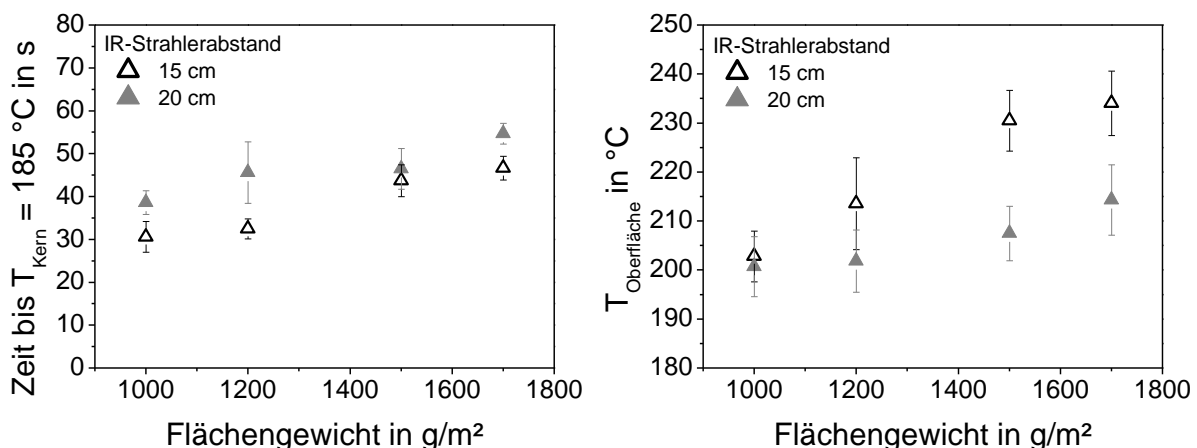


Abbildung 4.25: Einfluss des Flächengewichts auf die Heizzeit und Oberflächentemperatur bei einer NFOB-Dichte von $0,45 \text{ g/cm}^3$

Bei konstantem Strahlerabstand ist zu erkennen, dass sowohl die Heizzeit als auch die Oberflächentemperatur mit steigendem Flächengewicht, d. h. auch mit steigender Materialdicke, ansteigen. Grund dafür ist, dass die Strahlung lediglich auf der Oberfläche der Materialien absorbiert wird und der Kern durch den konduktiv bedingten Wärmestrom zwischen Oberfläche und Mitte erwärmt wird. Bei steigender Heizzeit steigt also auch die Oberflächentemperatur.

Der Unterschied in der Heizzeit zwischen 15 cm und 20 cm Strahlerabstand, ist konstant 5 s - 15 s und hängt nicht vom Flächengewicht ab. Der Unterschied in der Oberflächentemperatur bei verschiedenen Strahlerabständen ist mit steigendem Flächengewicht ebenfalls steigend und beträgt bis zu 25 K.

Das bedeutet, dass die Änderung des Wärmestroms zwischen geringem und hohem Flächengewicht signifikant höher ist als die Änderung des Wärmestroms zwischen den verschiedenen Strahlerabständen. Die Erwärmung des Materialkerns bei gleicher Dichte der NFOB hängt somit in hohem Maß von der Materialdicke und weniger von der Oberflächentemperatur ab.

Dies lässt sich mit der größeren Abhängigkeit des konduktiven Wärmestroms von der Materialdicke als von der Oberflächentemperatur bei den oben gegebenen Bedingungen beschreiben. Beispielsweise ist die Wärmeleitfähigkeit (abgesehen von der temperaturbedingten Änderung) von NFOB-Probekörpern bei gleicher Dichte konstant ($\lambda_{NFOB} = const.$) genauso wie ihre Oberflächen $A = const.$ Damit ist die Proportionalität des konduktiven Wärmestroms in das Materialinnere zwischen der Materialdicke s und der Oberflächen und Kerntemperatur mit Gleichung 4.2. gegeben.

$$\dot{Q} \sim \frac{1}{s} (T_{Oberfläche} - T_{Kern}) \quad 4.2$$

Für den stark vereinfachten, stationären Fall der Wärmeströmung, bei dem die Kerntemperatur 30 °C beträgt und sich nicht erwärmt, lassen sich folgende, in Tabelle 4.2 aufgeführte, Proportionalitätsfaktoren $\dot{Q} \sim$ für die Flächengewichte 1000 g/m² und 1700 g/m² berechnen:

Tabelle 4.2: Berechnung von Proportionalitäten des konduktiven Wärmestroms bei verschiedenen Strahlerabständen für verschiedene Dicken.

| | | 15 cm Strahlerabstand | | 20 cm Strahlerabstand | | |
|------------------|-----------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------|
| g/m ² | Dicke /mm | T _{Oberfläche} /K | $\dot{Q} \sim$ | T _{Oberfläche} /K | $\dot{Q} \sim$ | T _{Kern} /K |
| 1000 | 2 | 476,15 | 86,5 | 473,15 | 85 | 303,15 |
| 1700 | 4 | 507,15 | 51 | 487,15 | 46 | 303,15 |

Die Differenz der Proportionalitätskonstanten bei einer Verdoppelung der Dicke von 2 mm auf 4 mm ist bis zu 8-fach höher als die Differenz der Konstanten zwischen 15 cm und 20 cm Strahlerabstand. Somit hat das Flächengewicht einen signifikanten

Einfluss auf die Heizzeit bei der IR-Erwärmung von NFOB. Die höhere Oberflächentemperatur bei steigendem Flächengewicht ist auf eine steigende Heizzeit zurückzuführen. Wie genau sich die Dicke der Probekörper auf die IR-Erwärmung auswirkt, wird im nachfolgenden Kapitel untersucht.

4.4.3 Allgemeiner Einfluss der Dicke auf die IR-Erwärmung

Die Untersuchung des Einflusses der Dicke auf die IR-Erwärmung soll primär den Einfluss der Vorkompaktierung auf die Heizzeit zeigen und darüber hinaus bestätigen, dass die Oberflächentemperatur hauptsächlich von der Dicke des Materials abhängt und nicht vom Flächengewicht, während die Heizzeit vom Flächengewicht abhängt und nicht von der Dicke.

Abbildung 4.26 zeigt die Zeit bis zum Erreichen einer Kerntemperatur von 185 °C sowie die dazugehörige Oberflächentemperatur von NFOB über die Dicken der Probekörper bei 20 cm Strahlerabstand.

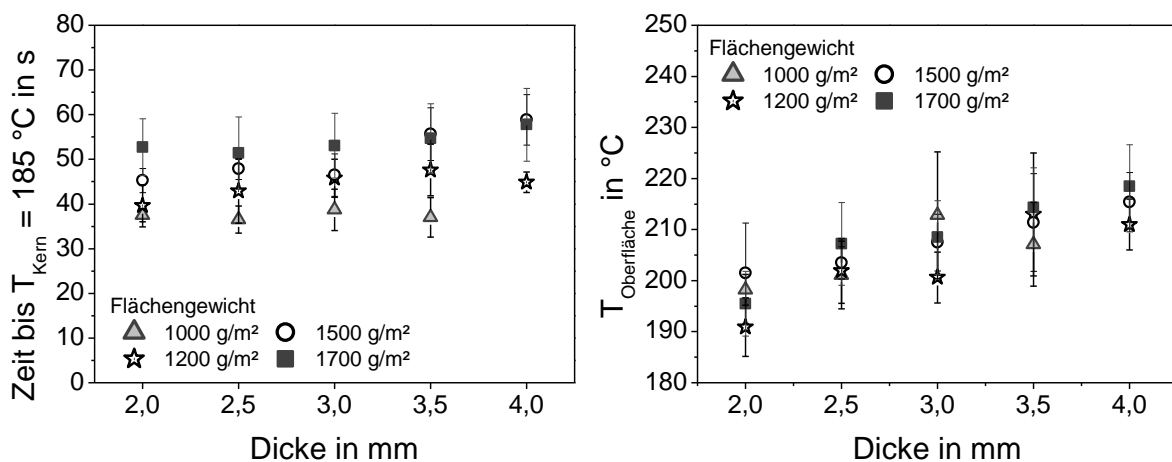


Abbildung 4.26: Einfluss der NFOB-Dicke auf die Heizzeit und Oberflächentemperatur aller Flächengewichte bei 20 cm Strahlerabstand

Es ist zu erkennen, dass die Dicke nur einen geringen Einfluss auf die Heizzeit bei gleichem Flächengewicht hat. Bei einem Flächengewicht von 1000 g/m² beträgt der Unterschied zwischen der kleinsten und höchsten Heizzeit $\Delta t = 2,2\text{ s}$, während er beim höchsten Flächengewicht von 1700 g/m² $\Delta t = 6,4\text{ s}$ beträgt. Beide Werte sind geringer als die Standardabweichungen der Heizzeit, welche also erwartungsgemäß vom Flächengewicht beeinflusst wird. Der Unterschied in der Heizzeit bei gleicher Dicke, also zwischen hohem und geringen Flächengewicht, kann $\Delta t = 15\text{ s}$ bis $18,7\text{ s}$ betragen.

Somit hängt die Heizzeit von der Probekörpermasse und damit vom Flächengewicht ab.

Für die Oberflächentemperatur ist die Dicke der Probekörper ausschlaggebend. Während kein eindeutiger Zusammenhang zwischen hohen und geringen Flächengewichten und der Oberflächentemperatur ersichtlich ist, ist ein Ansteigen der Oberflächentemperatur bei größerer Materialdicke erkennbar.

Ein ähnliches Verhalten ist in Abbildung 4.27 für einen Strahlerabstand von 15 cm zu sehen.

Bei einem geringeren Strahlerabstand verläuft die Erwärmung insgesamt etwas schneller, daher sind die Unterschiede in der Heizzeit bei verschiedenen Flächengewichten nicht so groß wie bei einem größeren Strahlerabstand von 20 cm. Die Dicke der NFOB hat nur einen sehr geringen Einfluss auf die Heizzeit, während das Flächengewicht die Zeit maßgeblich beeinflusst. Auch hier ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Flächengewicht und Oberflächentemperatur erkennbar, da die Temperaturen im Streubereich liegen. Es ist ein eindeutiger und vor allem linearer Zusammenhang zwischen Materialdicke und Oberflächentemperatur erkennbar.

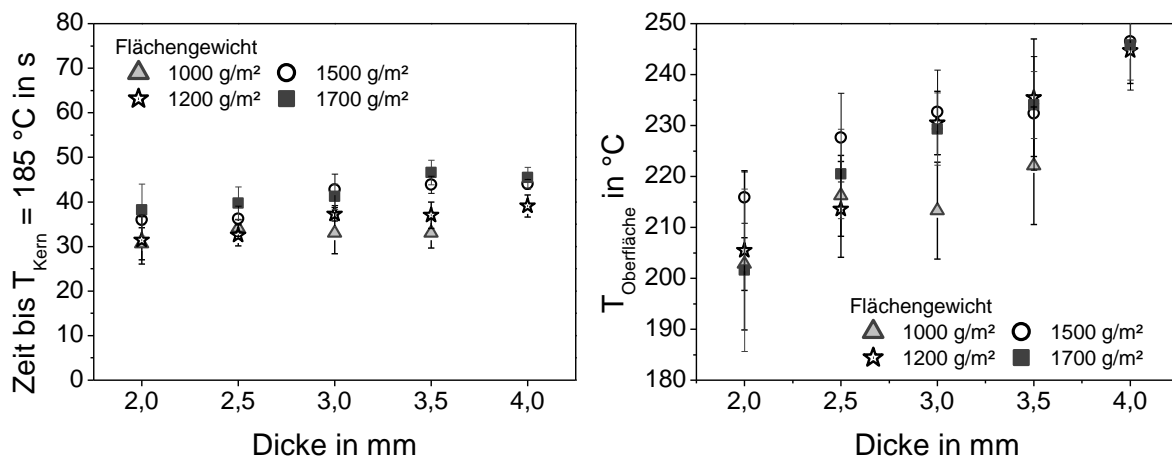


Abbildung 4.27: Einfluss der NFOB-Dicke auf die Heizzeit und Oberflächentemperatur aller Flächengewichte bei 15 cm Strahlerabstand

Die Einflüsse des NFOB-Flächengewichts und seiner Dicke lassen sich in Tabelle 4.3 zusammenfassen. Eine größere NFOB-Dicke hat demnach einen großen Einfluss auf die Oberflächentemperatur, die ebenfalls erhöht ist. Auf die Heizzeit hat die Dicke kaum einen Einfluss. Anders verhält es sich beim Flächengewicht. Mit höherem Flä-

chengewicht steigt auch die Heizzeit, während die Oberflächentemperatur kaum beeinflusst wird. Der Strahlerabstand hat sowohl auf die Oberflächentemperatur als auch die Heizzeit einen Einfluss. Beide sinken mit steigendem Strahlerabstand.

Tabelle 4.3: Tabelle zu den Einflüssen auf die Oberflächentemperatur und Heizzeit bei der IR-Erwärmung von NFOB

| | Dicke NFOB | Flächengewicht | Abstand IR-Strahler |
|-------------------------|------------|----------------|---------------------|
| T _{Oberfläche} | +++ | 0 | ++ |
| Heizzeit | 0 | ++ | + |

+++ : sehr großer Einfluss; ++ : großer Einfluss; + Einfluss; 0: kein/kaum Einfluss

Für die Entwicklung von Richtlinien für den Verarbeiter der NFOB reichen die groben Informationen zu den Einflüssen auf das Erwärmungsverhalten nicht aus. Um eine anwendungsangepasste Auswahl des Materials zu ermöglichen, ist die mathematische Beschreibung der Einflüsse der Halbzeugbeschaffenheit auf die IR-Erwärmung notwendig, welche nachfolgend vorgenommen wird.

4.5 Mathematische Beschreibung des Einflusses der Halbzeugbeschaffenheit auf die IR-Erwärmung von NFOB

Aufgrund der in Kapitel 4.4 beschriebenen Zusammenhänge werden für die mathematische Beschreibung der Einflüsse der Halbzeugbeschaffenheit auf die IR-Erwärmung die Kern- und Oberflächentemperaturen der NFOB-Probekörper zunächst unabhängig voneinander betrachtet.

Kerntemperatur in Abhängigkeit des Flächengewichts

Wie in Kapitel 4.4.2 gezeigt wird, hat das Flächengewicht der NFOB unabhängig von der Dicke einen entscheidenden Einfluss auf die Heizzeit bei der IR-Erwärmung. Um aus diesem Einfluss allgemeingültige Verarbeitungshinweise auszuarbeiten, wird der Verlauf der Kerntemperatur im Nachfolgenden für alle in Tabelle 4.1 zusammengefassten NFOB-Flächengewichte genauer untersucht. Dabei wird die in Kapitel 4.4.2 und 4.4.3 gemessene Kerntemperatur über die Heizzeit wie beispielhaft in Abbildung 4.28 für das Flächengewicht 1000 g/m² und einen Strahlerabstand von 20 cm aufgetragen. Es ist zu sehen, dass der Kerntemperaturverlauf über alle Dicken nahezu iden-

tisch ist, obwohl sich die Dichte im Material bei größerer Dicke verringert. Die Steigungen der Kurven werden bei einer Kerntemperatur von 150 °C etwas flacher, was auf die Veränderung der Wärmekapazität des Polymers nahe der Schmelztemperatur zurückzuführen ist. Zur vereinfachten Modellbildung wird dieser Phasenübergang in der Temperaturberechnung nicht berücksichtigt.

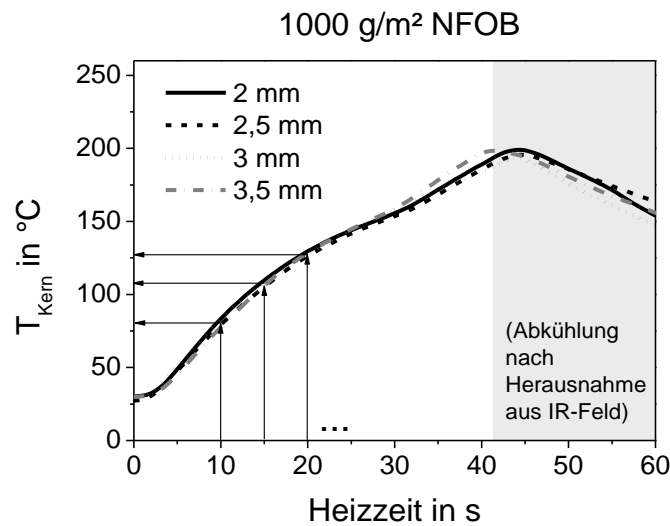


Abbildung 4.28: Aufzeichnung der Kerntemperatur über der Heizzeit eines NFOB mit 1000 g/m² für alle Dicken von 2 mm bis 3,5 mm (NFOB-Dichte variiert zwischen 0,27 g/cm³ - 0,45 g/cm³)

Die aufgezeichneten Kerntemperaturen werden für jedes NFOB-Flächengewicht über alle Dicken gemittelt und in 5-Sekunden-Schritten über der Heizzeit für die IR-Strahlerabstände 15 cm und 20 cm aufgetragen, siehe Abbildung 4.29.

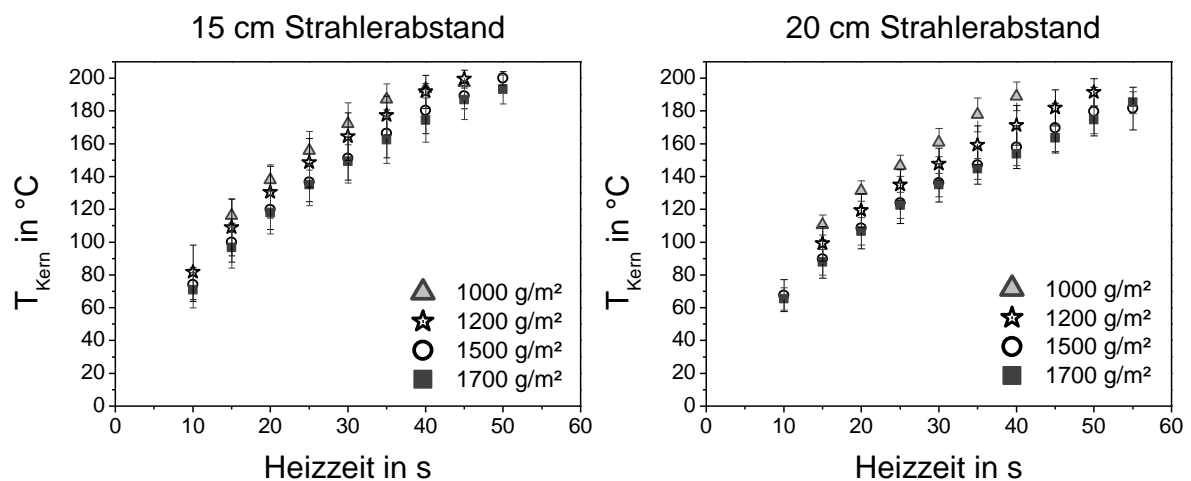


Abbildung 4.29: Einfluss des NFOB-Flächengewichts auf die Kerntemperatur über der Heizzeit bei der IR-Erwärmung

Es ist zu erkennen, dass die Kerntemperatur bei einem Strahlerabstand von 15 cm schneller ansteigt als bei einem Strahlerabstand von 20 cm, da die Einstrahlung bei geringeren Abständen größer ist. Darüber hinaus beträgt der Unterschied der Kerntemperaturen beim geringeren Strahlerabstand zwischen den einzelnen Flächengewichten bis zu 25 K, während er bei einem Strahlerabstand von 20 cm bis zu 45 K beträgt. Die Diagramme bilden die Grundlage für die Modellbildung.

Oberflächentemperatur in Abhängigkeit der Dicke

Wie in Kapitel 4.4.3 gezeigt wird, hat die Dicke von NFOB, unabhängig vom Flächengewicht, einen entscheidenden Einfluss auf die Oberflächentemperatur bei der IR-Erwärmung. Um aus diesem Einfluss allgemeingültige Verarbeitungshinweise auszuarbeiten, wird der Verlauf der Oberflächentemperatur im Nachfolgenden für alle in Tabelle 4.1 zusammengefassten NFOB-Dicken genauer untersucht. Dabei wird die in Kapitel 4.4.2 und 4.4.3 gemessene Oberflächentemperatur über die Heizzeit wie beispielhaft in Abbildung 4.30 für die NFOB-Dicke 2 mm und einen Strahlerabstand von 20 cm aufgetragen.

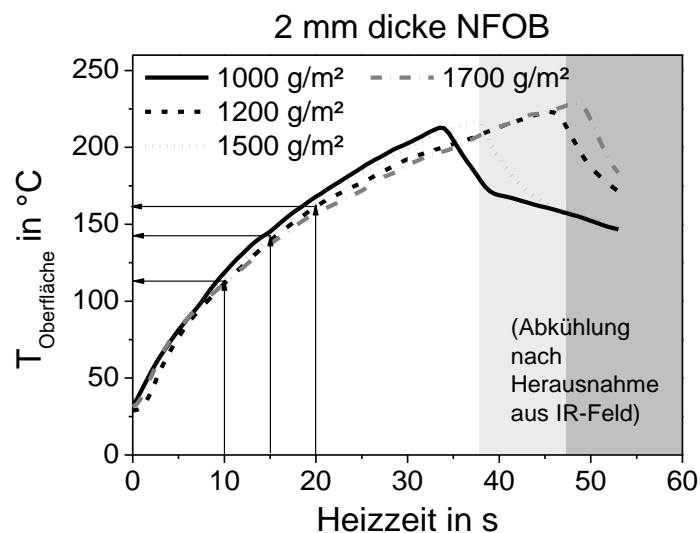


Abbildung 4.30: Aufzeichnung der Oberflächentemperatur eines 2 mm dicken NFOB nach definierten Heizzeiten für alle Flächengewichte von 1000 g/m² bis 1700 g/m² (NFOB-Dichte variiert zwischen 0,45 g/cm³ - 0,74 g/cm³)

Die gemessenen Oberflächentemperaturen werden für jede NFOB-Dicke über alle Flächengewichte gemittelt und nochmals über der Heizzeit für die IR-Strahlerabstände 15 cm und 20 cm aufgetragen, siehe Abbildung 4.31.

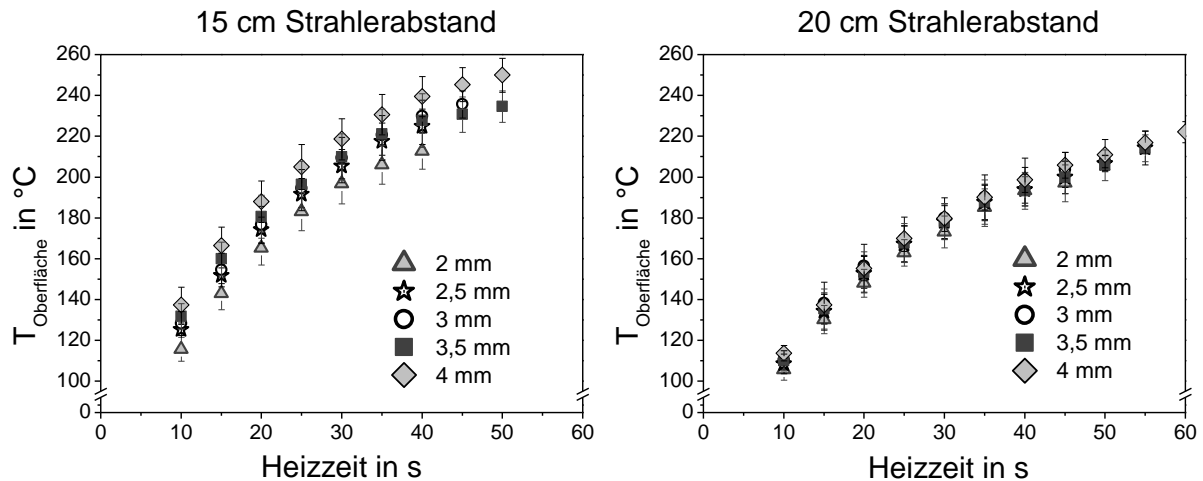


Abbildung 4.31: Einfluss der NFOB-Dicke auf die Oberflächentemperatur über der Heizzeit bei der IR-Erwärmung

Es ist zu erkennen, dass bei einem Strahlerabstand von 15 cm die Oberflächentemperatur schneller ansteigt als bei 20 cm Strahlerabstand, da die Einstrahlung bei geringeren Abständen größer ist. Darüber hinaus beträgt der Unterschied der Oberflächentemperaturen beim geringeren Strahlerabstand zwischen den einzelnen Dicken bis zu 25 K, während er bei einem Strahlerabstand von 20 cm maximal 8 K beträgt.

4.5.1 Ermittlung physikalischer Größen für die Berechnung der Wärmeströme

Die für die nach Kapitel 2.3 zur Berechnung der Wärmeströme in das NFOB benötigten physikalischen Größen sind:

| | | |
|---------------------------------------|------------------------|--|
| σ | $5,67 \cdot 10^{-8}$ | W/(m ² K ⁴) (1) |
| $A_{Strahler}$ | $0,5 \cdot 0,5 = 0,25$ | m ² (2) |
| A_{NFOB} | $0,1 \cdot 0,1 = 0,01$ | m ² (3) |
| S_{NFOB} | [0,002; 0,003; 0,004] | m |
| $T_{Strahler}$ | (572 °C =) 845,15 | K (2) |
| $T_{Oberfläche} = T_{Kern} (t = 0 s)$ | (30 °C =) 303,15 | K (4) |

¹ Vgl. Kapitel 2.3.4

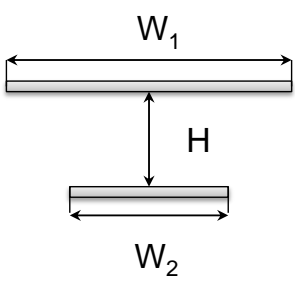
² Vgl. Kapitel 4.2.2

³ Vgl. Kapitel 4.2.3

⁴ Die Starttemperatur der NFOB-Oberflächen und des Kerns beträgt 30 °C, da sich die Umgebung um das IR-Feld erwärmt und einige Probekörper vor der Messung eine höhere Ausgangstemperatur als die Raumtemperatur von 23 °C aufweisen.

Sichtfaktor

Der Sichtfaktor $F_{Strahler \rightarrow NFOB}$ berücksichtigt den Abstand der NFOB-Probe vom IR-Strahler. Er kann für quadratische, koaxiale Platten wie in Abbildung 4.32 dargestellt näherungsweise berechnet werden [121].

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\pi w_1^2} \left(\ln \frac{p}{q} + s - t \right)$$


$$w_1 = W_1/H \quad , \quad w_2 = W_2/H$$

$$p = (w_1^2 + w_2^2 + 2)^2$$

$$x = w_2 - w_1 \quad y = w_2 + w_1$$

$$q = (x^2 + 2)(y^2 + 2)$$

$$u = \sqrt{x^2 + 4} \quad , \quad v = \sqrt{y^2 + 4}$$

$$s = u \left(x \arctan \frac{x}{u} - y \arctan \frac{y}{v} \right)$$

$$t = v \left(x \arctan \frac{x}{u} - y \arctan \frac{y}{v} \right)$$

Abbildung 4.32: Näherungsrechnung für den Sichtfaktor zwischen IR-Strahler und NFOB-Platte nach [121]

Mit einer Strahleroberfläche $A_{Strahler} = 0,25 \text{ m}^2$ und einer NFOB-Oberfläche $A_{NFOB} = 0,01 \text{ m}^2$ können für die IR-Strahlerabstände 15 cm und 20 cm folgende Sichtfaktoren berechnet werden.

| Abstand IR-Strahler NFOB | Sichtfaktor $F_{Strahler \rightarrow NFOB}$ |
|--------------------------|---|
| 15 cm | 0,03071535 |
| 20 cm | 0,02610877 |

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit der NFOB λ_{NFOB} setzt sich aus der Wärmeleitfähigkeit von Polypropylen, Naturfasern und Luft zusammen, da die NFOB nicht vollständig konsolidiert sind. Die einzelnen Wärmeleitfähigkeiten sind:

| | | | |
|---|--------|---------|-------|
| λ_{PP} | 0,22 | W/(m·K) | [94] |
| $\lambda_{NF} \approx \lambda_{Hanfmatten}$ | 0,04 | W/(m·K) | [122] |
| λ_{Luft} | 0,0262 | W/(m·K) | [94] |

Für die Ermittlung einer gemischten Wärmeleitfähigkeit wird ein dreischichtiges NFOB wie in Abbildung 4.33 angenommen, dessen gemischte Wärmeleitfähigkeit λ_{NFOB} analog zu Gleichung 4.3 berechnet werden kann, wobei s_{PP} , s_{NF} und s_{Luft} die Schichtdicken von PP, Naturfasern und der Luft im Verbund sind [94].

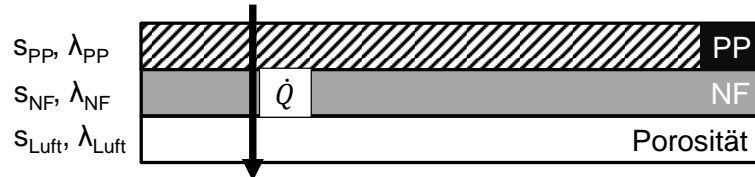


Abbildung 4.33: Dreischichtiges NFOB bestehend aus PP, NF und Porosität

$$\lambda_{NFOB} = \frac{1}{\frac{s_{PP}}{\lambda_{PP}} + \frac{s_{NF}}{\lambda_{NF}} + \frac{s_{Luft}}{\lambda_{Luft}}} \quad 4.3$$

Zur Berechnung der Schichtdicken wird zunächst der Volumengehalt der Einzelkomponenten bestimmt. Der Gewichtsanteil von Naturfasern ψ_{NF} und der Gewichtsanteil der Matrix ψ_{PP} betragen jeweils 0,5. Mit der Dichte von PP $\rho_{PP} = 0,9 \text{ g/cm}^3$ und der mittleren Dichte von Naturfasern $\rho_{NF} = 1,5 \text{ g/cm}^3$ können die Volumengehalte der Naturfasern φ_{NF} und des Polymers φ_{PP} wie in Gleichung 4.4 und 4.5 berechnet werden [123], wobei ρ_{NFOB} die Dichte der NFOB darstellt.

$$\varphi_{NF} = \frac{\rho_{NFOB}}{\rho_{NF}} \cdot \psi_{NF} \quad 4.4$$

$$\varphi_{PP} = \frac{\rho_{NFOB}}{\rho_{PP}} \cdot \psi_{PP} \quad 4.5$$

Damit kann der Porositätsgehalt $\varphi_{Porosität}$ gemäß Gleichung 4.6 bestimmt werden [123]. Die Berechnung der Luft-Schichtdicke ist beispielhaft in Gleichung 4.7 gezeigt, wobei die restlichen Schichtdicken analog bestimmt werden.

$$\varphi_{Porosität} = 1 - (\varphi_{NF} + \varphi_{PP}) \quad 4.6$$

$$s_{Luft} = s_{NFOB} \cdot \varphi_{Porosität} \quad 4.7$$

Die resultierenden Wärmeleitfähigkeiten λ_{NFOB} von NFOB mit einem Flächengewicht von 1700 m² sind beispielhaft in Tabelle 4.4 gegeben. Die Porositätsgehalte und Wärmeleitfähigkeiten aller gefertigten und in Tabelle 4.1 zusammengefassten Probeplatten sind im Anhang in Tabelle 9.2 zusammengefasst.

Tabelle 4.4: Wärmeleitfähigkeiten von NFOB mit 1700 g/m² Flächengewicht und verschiedenen Kompaktierungsgraden

| Dicke in mm | Dichte in g/cm ³ | Vol.-Anteil PP | Vol.-Anteil NF | Vol. Porosität | Wärmeleitfähigkeit in W/(mK) |
|-------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|
| 2 mm | 0,74 | 0,41 | 0,25 | 0,34 | 0,0237 |
| 3 mm | 0,50 | 0,28 | 0,17 | 0,56 | 0,0125 |
| 4 mm | 0,38 | 0,21 | 0,13 | 0,66 | 0,0085 |

Emissionszahl der NFOB

Da es sich bei den NFOB nicht um schwarze Strahler handelt, absorbieren sie nicht vollständig die vom IR-Strahler emittierte Strahlung⁵. Der Wärmestrom des IR-Strahlers muss daher durch eine Emissionszahl ε korrigiert werden. Diese stellt das Verhältnis der Strahlungsintensität eines Körpers bei einer bestimmten Temperatur verglichen mit der Intensität eines schwarzen Strahlers dar und wird nach Gleichung 4.8 berechnet, wobei $T_{schwarz}$ die Temperatur eines idealen, schwarzen Strahlers darstellt und T_{real} die reale Temperatur des NFOB ist.

$$\varepsilon = \frac{T_{schwarz}}{T_{real}} \quad 4.8$$

Die Emissionszahl wird an zwei unterschiedlichen NF/PP-Materialien gemessen, die Fasern mit verschiedenen Röstgraden beinhalten. Dabei wird jeweils eine Probe auf eine konstante Temperatur zwischen 50 °C und 200 °C erwärmt und gleichzeitig die Oberflächentemperatur mittels eines Pyrometers und eines Thermoelements gemessen. Durch die Emissionszahleinstellung von 1 am Pyrometer wird eine falsche Temperatur gemessen, welche der Temperatur eines schwarzen Strahlers entspricht. Das Thermoelement misst die reale Temperatur. Die so gemessenen Emissionszahlen sind in Abbildung 4.34 dargestellt. Die meisten undurchsichtigen, nicht-metallischen Materialien haben eine hohe, temperaturabhängige Emissionszahl zwischen 0,85 - 0,95 [124], was durch die Messung bestätigt werden kann. Im interessierenden Bereich der Umformung von NFOB ab 160 °C sinkt die Emissionszahl auf 0,81 - 0,82 sowohl für helle als auch dunkle NF/PP-Materialien. Für die mathematische Beschreibung der Erwärmung wird daher eine Emissionszahl ε_{NFOB} von 0,82 angewandt.

⁵ Vgl. Kapitel 2.3.4

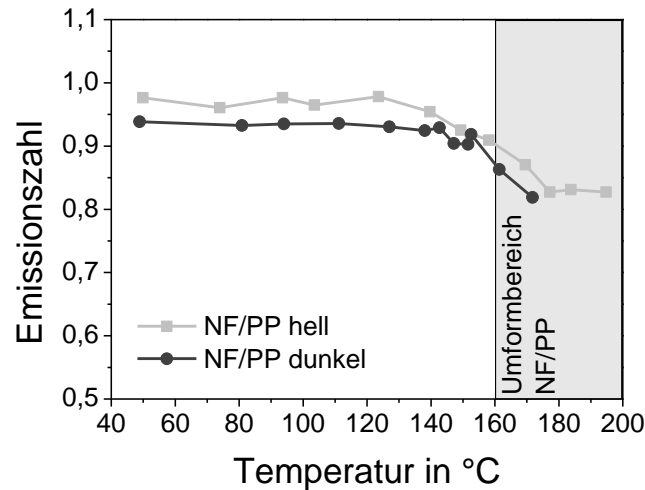


Abbildung 4.34: Emissionszahl von NF/PP über der Temperatur

Emissionszahl der IR-Strahler

Da es sich beim IR-Strahler nicht um einen schwarzen Strahler handelt, emittiert er Strahlung nicht mit der vollen Intensität. Der Wärmestrom vom IR-Strahler auf das NFOB muss daher durch eine Emissionszahl korrigiert werden. Die vom Hersteller zur Verfügung gestellte Emissionszahl über der Wellenlänge der emittierten Strahlung ist in Abbildung 4.35 gezeigt. Die von einem IR-Strahler bei 572 °C emittierte Strahlung hat nach Gleichung 2.18 in Kapitel 2.3.4 das Maximum ihrer Strahlungsintensität bei 3,4 μm . In diesem Bereich weist der IR-Strahler eine Emissionszahl zwischen 0,82 – 0,85 auf. Für nachfolgende Berechnungen wird eine Emissionszahl ε_s von 0,82 angenommen.

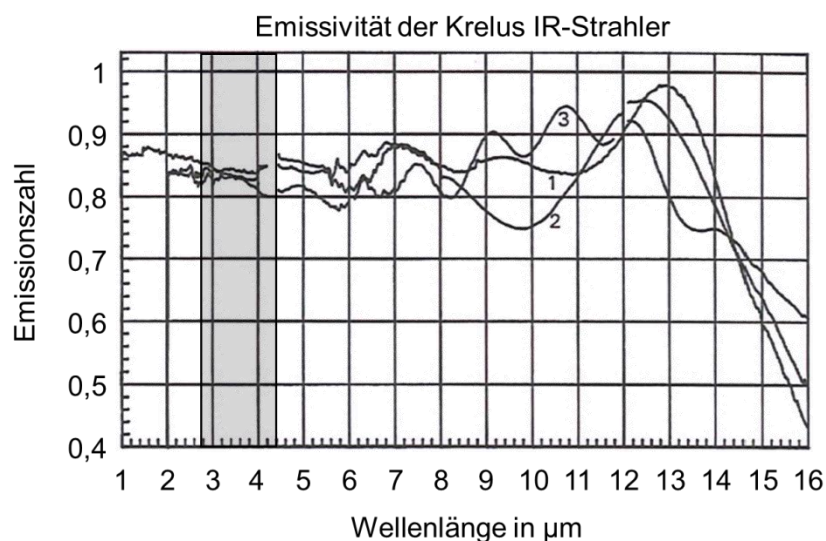


Abbildung 4.35: Emissionszahl von Krelus IR-Strahlern über der Wellenlänge [125]

4.5.2 Modellbildung und Ergebnis

Für die mathematische Beschreibung der Erwärmung von NFOB werden aufgrund der zuvor beschriebenen Erkenntnisse die Vereinfachungen in Tabelle 4.5 angenommen:

Tabelle 4.5: Vereinfachungen für die mathematische Beschreibung der Erwärmung von NFOB

| Vereinfachung | Begründung |
|--|---|
| Die IR-Strahlung wird ausschließlich auf der Oberfläche absorbiert, während der Materialkern durch Wärmeleitung erwärmt wird | Mittelwellige IR-Strahlung dringt nicht nennenswert in das Materialinnere ein |
| Zwischen Oberfläche und Kern des NFOB herrscht stationäre Wärmeleitung | Vereinfachte Berechnung |
| Die Wärmeleitfähigkeit der NFOB ist konstant | Es handelt sich um einen Feststoff und der Phasenübergang des Polymers wird für eine vereinfachte Berechnung vernachlässigt |
| Die Wärmeleitfähigkeit ist nur abhängig von der Dicke des NFOB; das Flächengewicht wird als konstant angenommen und beträgt 1700 g/m^2 | Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der NFOB-Dicke ist größer als in Abhängigkeit des Flächengewichts, vgl. Tabelle 9.2 |
| Die Konvektion wird vernachlässigt | Die angepasste Leistung des IR-Strahlers wirkt einer Kühlung der NFOB-Oberfläche entgegen |
| Die Starttemperaturen der Oberfläche und des Kerns betragen $30 \text{ }^\circ\text{C}$ | Die Umgebung um das IR-Feld wird erwärmt, sodass nicht alle Proben bei Heizbeginn Raumtemperatur aufweisen. Daher wird eine erhöhte Raumtemperatur angenommen |

Eine schematische Darstellung der Wärmeströme ins NFOB ist in Abbildung 4.36 dargestellt.

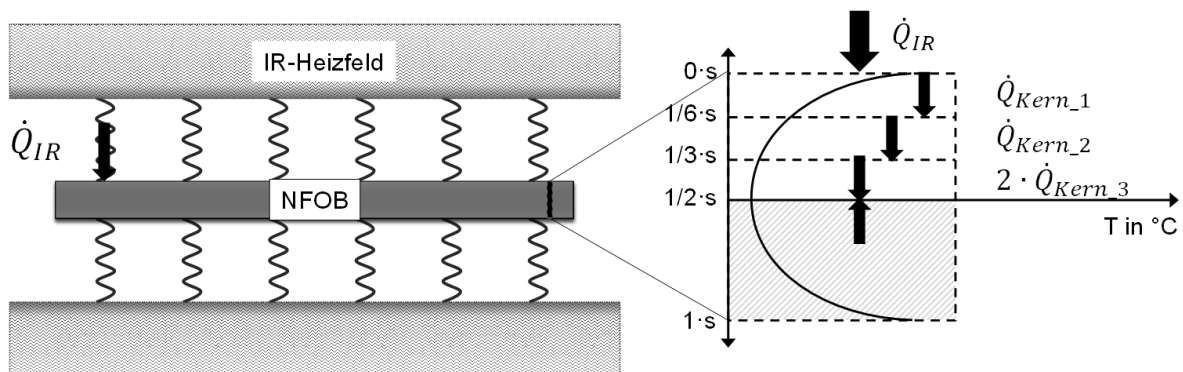


Abbildung 4.36: Schematische Darstellung der Wärmeströme ins NFOB

Auf die Oberfläche des NFOB geht der IR-Wärmestrom \dot{Q}_{IR} ein. Da die IR-Erwärmung schneller verläuft als die Wärmeleitung in das Materialinnere, entsteht ein instationärer, konduktiver Wärmestrom in den Materialkern (Hälfte der Dicke $s/2$) wie in Abbildung 4.36 rechts dargestellt. Wird das NFOB in sechs Abschnitte unterteilt, kann ein stationärer Wärmestrom je NFOB-Abschnitt und je Zeiteinheit angenommen werden. So führt \dot{Q}_{Kern_1} zur Erwärmung des ersten NFOB-Abschnitts und \dot{Q}_{Kern_2} zur Erwärmung des zweiten Abschnitts. Aufgrund des symmetrischen Versuchsaufbaus wird der Kern bei der Hälfte der NFOB-Dicke $s/2$ beidseitig durch den Wärmestrom \dot{Q}_{Kern_3} erwärmt.

Zum Zeitpunkt $t = 0$ beträgt die Starttemperatur der NFOB-Oberfläche und des Kerns 30 °C , woraus sich ihr Wärmestrom nach Gleichung 4.9 gemäß Kapitel 2.3.4 berechnen lässt.

$$\dot{E}_{Kern(t)} = \dot{E}_{Oberfläche(t)} = \sigma \cdot T_{Kern(t)}^4 = \sigma \cdot T_{Oberfläche(t)}^4 \quad 4.9$$

Der Wärmestrom \dot{Q}_{IR} vom IR-Strahler zur FKV-Plattenoberfläche pro Sekunde ist mit Gleichung 4.10 gegeben. Der konduktive Wärmestrom von der Oberfläche in den ersten NFOB-Abschnitt \dot{Q}_{Kern_1} ist in Gleichung 4.11 gegeben.

$$\dot{Q}_{IR} = \varepsilon_S \varepsilon_{NFOB} F_{Strahler \rightarrow NFOB} \cdot \sigma \cdot A_{Strahler} \cdot (T_{Strahler}^4 - T_{Oberfläche}^4) \quad 4.10$$

$$\dot{Q}_{Kern_1} = \frac{\lambda_{NFOB}}{s/6} \cdot A_{NFOB} \cdot (T_{Oberfläche} - T_{1/6_NFOB}) \quad 4.11$$

$$\dot{Q}_{Kern_2} = \frac{\lambda_{NFOB}}{s/6} \cdot A_{NFOB} \cdot (T_{1/6_{NFOB}} - T_{1/3_{NFOB}}) \quad 4.12$$

$$\dot{Q}_{Kern_3} = 2 \cdot \frac{\lambda_{NFOB}}{s/6} \cdot A_{NFOB} \cdot (T_{1/3_{NFOB}} - T_{1/2_{NFOB}}) \quad 4.13$$

Der Wärmestrom in den zweiten Abschnitt \dot{Q}_{Kern_2} des NFOB wird analog zum ersten Abschnitt mit Gleichung 4.12 berechnet, wobei hier die Temperaturdifferenz zwischen 1/6 und 1/3 der NFOB-Dicke einen Wärmestrom bedingt. Analog verhält es sich zum Wärmestrom in den Materialkern bei der Hälfte der NFOB-Dicke, wobei hier wie in Gleichung 4.13 der Wärmestrom aufgrund der beidseitigen Erwärmung verdoppelt wird.

Für die Bestimmung der Oberflächentemperatur nach einer Zeit Δt , muss der konduktive Wärmestrom \dot{Q}_{Kern_1} vom Strahlungswärmestrom \dot{Q}_{IR} subtrahiert werden, woraus sich der neue Oberflächen-Wärmestrom gemäß Gleichung 4.14 ergibt. Durch Auflösung nach $T_{Oberfläche(t+\Delta t)}$ kann die Oberflächentemperatur nach einer Zeiteinheit Δt ermittelt werden.

$$\dot{E}_{Oberfläche(t+\Delta t)} = \dot{E}_{Kern(t)} + \dot{Q}_{IR} - \dot{Q}_{Kern_1} = \sigma \cdot T_{Oberfläche(t+\Delta t)}^4 \quad 4.14$$

Die neue Oberflächentemperatur $T_{Oberfläche(t+\Delta t)}$ wird in Gleichung 4.11 eingesetzt, woraus der konduktive Wärmestrom \dot{Q}_{Kern_1} am Ende der ersten Zeiteinheit Δt ermittelt werden kann und der gemäß Gleichung 4.15 zur Erhöhung der Temperatur bei 1/6 der NFOB-Dicke führt.

$$\dot{E}_{Kern_1(t+\Delta t)} = \dot{E}_{Kern_1(t)} + \dot{Q}_{Kern_1} = \sigma \cdot T_{1/6_{NFOB}(t+\Delta t)}^4 \quad 4.15$$

So können alle Oberflächen- und Kerntemperaturen iterativ bis zu 60 s Heizzeit wie in Abbildung 4.37 berechnet werden. Bei Zeiteinheiten von $\Delta t = 0,1s$ beträgt der Zuwachs der Oberflächentemperatur zunächst bis zu 8 %, während er bereits nach einer Sekunde unter 3 % abfällt. Da der Beginn der Erwärmung für weiterführende Betrachtungen nicht ausschlaggebend ist, ist die Zeiteinheit von 0,1 s in diesem Fall ausreichend genau.

| Delta t (s) | Oberfläche | | NFOB | | | TOberfläche (°C) | Zuwachs (%) | TKern (°C) | Zuwachs (%) |
|-------------|-------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|------------------|-------------|------------|-------------|
| | Wärmestrom IR (W) | Gesamt Wärmestrom Oberfläche (W) | Wärmestrom 1/6 s (W) | Wärmestrom 1/3 s (W) | Wärmestrom Kern (W) | | | | |
| 0,0 | 0,00 | 478,87 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 30,00 | 0,00 | 30,00 | 0,00 |
| 0,1 | 15,29 | 494,16 | 1,70 | 0,00 | 0,00 | 32,39 | 7,97 | 30,00 | 0,00 |
| 0,2 | 15,28 | 507,74 | 2,99 | 0,19 | 0,00 | 34,47 | 6,42 | 30,00 | 0,00 |
| 0,3 | 15,28 | 520,03 | 3,96 | 0,50 | 0,04 | 36,31 | 5,35 | 30,00 | 0,00 |
| 0,4 | 15,27 | 531,34 | 4,71 | 0,89 | 0,13 | 37,98 | 4,59 | 30,01 | 0,05 |
| 0,5 | 15,26 | 541,89 | 5,28 | 1,33 | 0,24 | 39,52 | 4,04 | 30,05 | 0,13 |
| 0,6 | 15,26 | 551,87 | 5,72 | 1,79 | 0,38 | 40,95 | 3,62 | 30,13 | 0,25 |
| 0,7 | 15,25 | 561,41 | 6,05 | 2,25 | 0,52 | 42,29 | 3,29 | 30,25 | 0,40 |
| 0,8 | 15,25 | 570,60 | 6,31 | 2,71 | 0,67 | 43,58 | 3,04 | 30,41 | 0,55 |
| 0,9 | 15,24 | 579,53 | 6,51 | 3,16 | 0,83 | 44,81 | 2,83 | 30,63 | 0,70 |
| | | | | | | | | | |
| 59,0 | 12,98 | 4790,65 | 6,36 | 8,96 | 2,97 | 265,99 | 0,07 | 242,35 | 0,08 |
| 59,1 | 12,97 | 4797,26 | 6,36 | 8,96 | 2,97 | 266,18 | 0,07 | 242,54 | 0,08 |
| 59,2 | 12,97 | 4803,87 | 6,36 | 8,96 | 2,97 | 266,36 | 0,07 | 242,73 | 0,08 |
| 59,3 | 12,97 | 4810,48 | 6,36 | 8,96 | 2,97 | 266,55 | 0,07 | 242,92 | 0,08 |
| 59,4 | 12,96 | 4817,08 | 6,36 | 8,96 | 2,97 | 266,73 | 0,07 | 243,11 | 0,08 |
| 59,5 | 12,96 | 4823,69 | 6,36 | 8,95 | 2,96 | 266,92 | 0,07 | 243,30 | 0,08 |
| 59,6 | 12,96 | 4830,29 | 6,35 | 8,95 | 2,96 | 267,10 | 0,07 | 243,49 | 0,08 |
| 59,7 | 12,95 | 4836,89 | 6,35 | 8,95 | 2,96 | 267,29 | 0,07 | 243,68 | 0,08 |
| 59,8 | 12,95 | 4843,48 | 6,35 | 8,95 | 2,96 | 267,47 | 0,07 | 243,87 | 0,08 |
| 59,9 | 12,95 | 4850,08 | 6,35 | 8,95 | 2,96 | 267,66 | 0,07 | 244,06 | 0,08 |
| 60,0 | 12,94 | 4856,67 | 6,35 | 8,95 | 2,96 | 267,84 | 0,07 | 244,25 | 0,08 |

Abbildung 4.37: Berechnung der Oberflächen- und Kerntemperatur eines 2 mm dicken NFOB mit einem Flächengewicht von 1700 g/m²

Der Verlauf der berechneten Oberflächen- und Kerntemperatur für ein NFOB der Dicke 2 mm mit einem Flächengewicht von 1700 g/m² ist für einen Strahlerabstand von 15 cm in Abbildung 4.38 dargestellt. Während die Oberflächentemperatur sehr gut mit den Messwerten übereinstimmt, sind die berechneten Werte für die Kerntemperatur etwas höher als die gemessenen. Der qualitative Verlauf stimmt allerdings überein.

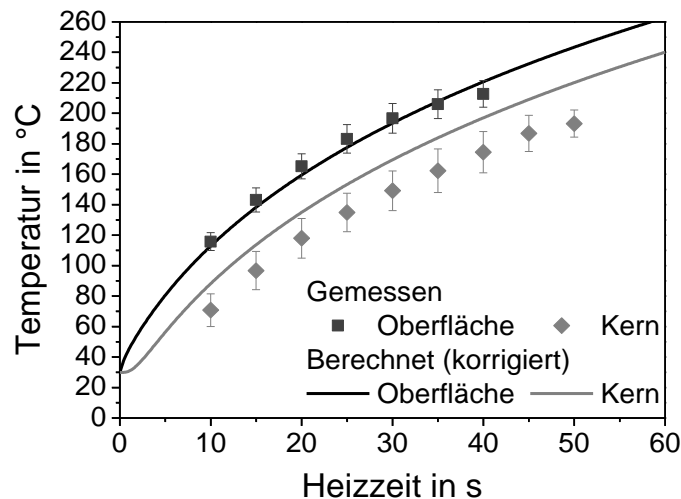


Abbildung 4.38: Berechnete Oberflächen- und Kerntemperatur eines 2 mm dicken NFOB mit einem Flächengewicht von 1700 g/m² und einem IR-Strahlerabstand von 15 cm

Berechnung der Oberflächentemperaturen in Abhängigkeit der Dicke

Da die Oberflächentemperatur, wie in Kapitel 4.4.3 gezeigt, lediglich von der Dicke des NFOB abhängt, werden die restlichen Oberflächentemperaturen zwischen 2 mm und 4 mm und für die Strahlerabstände 15 cm und 20 cm gemäß Gleichung 4.14 berechnet, wobei in Gleichung 4.11 die jeweilige NFOB-Dicke und dazugehörige Wärmeleitfähigkeit des NFOB mit einem Flächengewicht von 1700 g/m² eingesetzt wird. Die so berechneten Oberflächentemperaturen für 15 cm und 20 cm Strahlerabstand sind in Abbildung 4.39 zu sehen. Da der Phasenübergang des Polymers nicht berücksichtigt ist und eine temperaturunabhängige Wärmeleitfähigkeit für die Berechnungen angenommen wurde, ist eine Abweichung der berechneten und gemessenen Oberflächentemperaturen erkennbar. Die berechneten Oberflächentemperaturen bei 20 cm Strahlerabstand bilden die Messwerte bei kurzen Heizzeiten sehr gut ab. Für höhere Heizzeiten und bei kritischen Oberflächentemperaturen ab 200 °C sind die berechneten Werte konservativ und geben einen etwas höheren Wert an als gemessen.

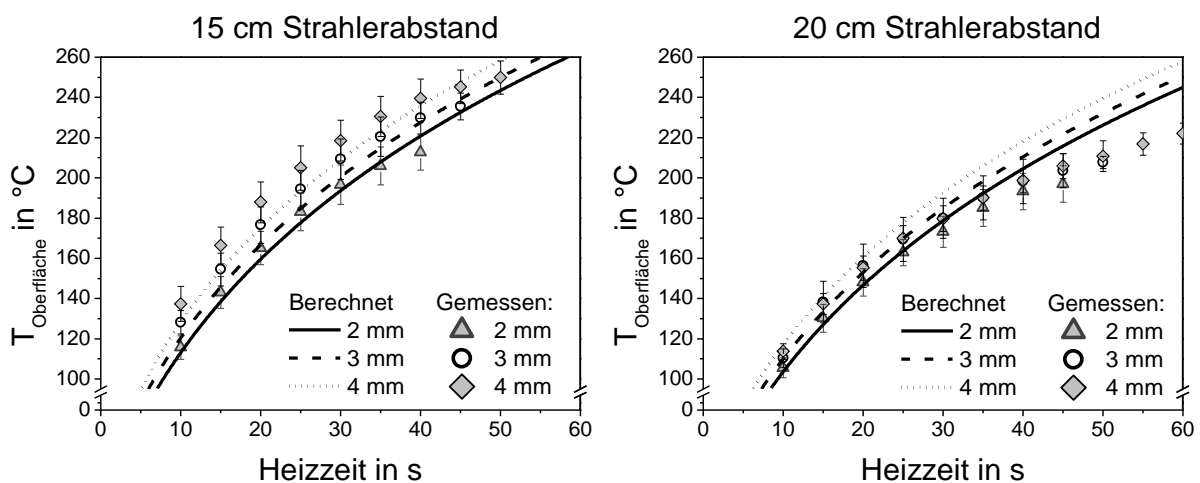


Abbildung 4.39: Vergleich der berechneten Oberflächentemperatur mit den Messwerten über der Heizzeit für verschiedene Strahlerabstände

Berechnung der Kerntemperaturen in Abhängigkeit des Flächengewichts

Die Kerntemperatur von NFOB hängt primär vom Flächengewicht ab und ist von der Dicke unabhängig. Dieses Verhalten kann mathematisch unter der Annahme einer stationären Wärmeleitung nicht berücksichtigt werden, da der Wärmestrom in den Materialkern lediglich von der Wärmeleitfähigkeit beeinflusst wird. Geringere Flächengewichte haben bei gleichbleibender Dicke aufgrund der höheren Porosität im Material

eine geringere Wärmeleitfähigkeit, dennoch werden sie schneller erwärmt. Grund dafür ist, dass einerseits weniger Masse erwärmt werden muss und andererseits die IR-Strahlung in ein poröses Material tiefer eindringt als in ein Material mit glatter Oberfläche und höherer Dichte. Die Überlagerung dieser Effekte führt dazu, dass der Verlauf der berechneten Kerntemperatur über der Heizzeit nur qualitativ der wahren Temperatur entspricht. Aus diesem Grund werden die Kerntemperaturen in Abhängigkeit des Flächengewichts des NFOB an die Messwerte gefittet. Es wird ein Korrekturfaktor k wie in Gleichung 4.16 für die Berechnung der Kerntemperatur T_{Kern_x} des Flächengewichts x eingeführt.

$$T_{Kern_x} = k \cdot T_{Kern_{berechnet}} \quad 4.16$$

Der Korrekturfaktor für die einzelnen Flächengewichte wird folgendermaßen, unabhängig vom IR-Strahlerabstand, ausgewählt:

| Flächengewicht | k |
|-----------------------|------|
| 1700 g/m ² | 0,87 |
| 1500 g/m ² | 0,91 |
| 1200 g/m ² | 0,96 |
| 1000 g/m ² | 1,00 |

Abbildung 4.40 zeigt, dass die Korrekturfaktoren einen linearen Verlauf über dem Flächengewicht aufweisen. So können die Korrekturfaktoren für verschiedene Flächengewicht zwischen 1000 g/m² und 1700 g/m² interpoliert werden.

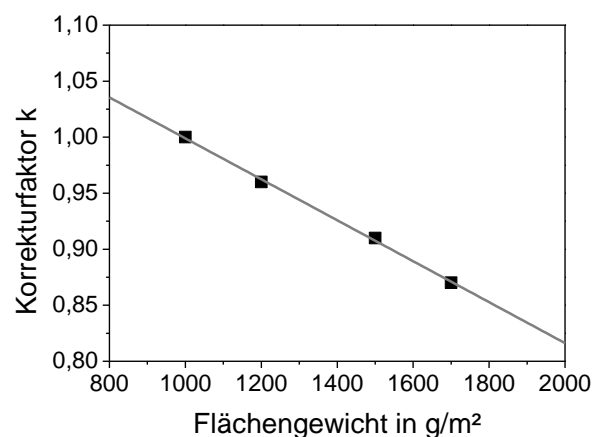


Abbildung 4.40: Korrekturfaktoren für die Berechnung der Kerntemperatur in Abhängigkeit des NFOB-Flächengewichts

Die angepassten Kerntemperaturen der NFOB in Abhängigkeit ihrer Flächengewichte und der Heizzeit sind für die Strahlerabstände 15 cm und 20 cm in Abbildung 4.41 als Linien dargestellt. Insgesamt bilden die Kurven der berechneten Temperaturen die Messwerte über den gesamten Bereich von 10 s - 60 s sehr gut ab.

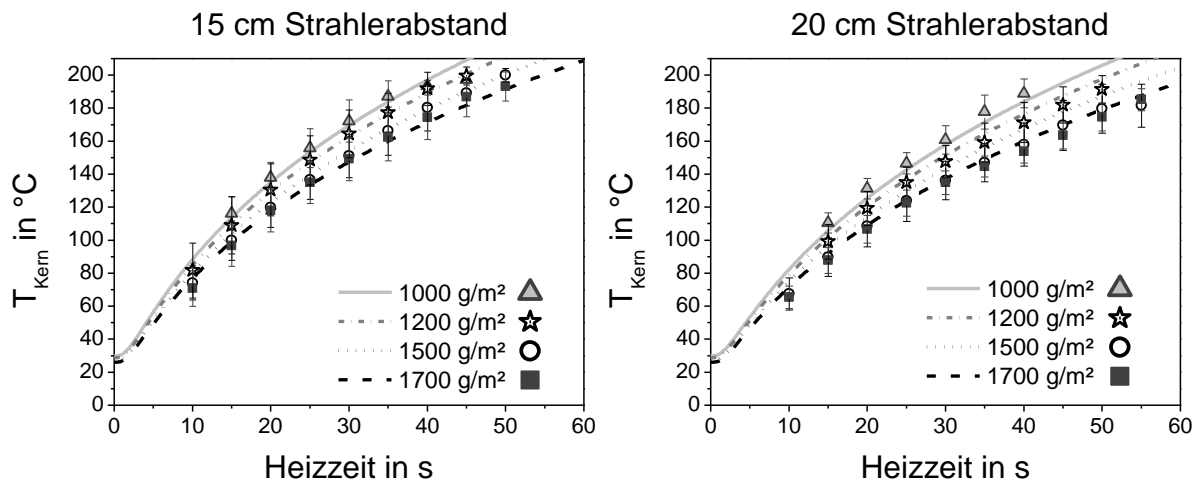


Abbildung 4.41: Vergleich der berechneten Kerntemperaturen mit den Messwerten über der Heizzeit für verschiedene Strahlerabstände

Zusammenfassend zeigen sowohl die Versuchsergebnisse als auch die mathematischen Beschreibungen der Kern- und Oberflächentemperaturen, dass eine gezielte, anwendungsangepasste Erwärmung von NFOB für diverse Vorkompaktierungsgrade und Flächengewichte möglich ist.

Zu klären ist jedoch, wie sich die Kern- und Oberflächentemperaturen der verarbeiteten NFOB auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Bauteile wie Geruch und Emissionen auswirken und inwiefern die Erwärmung bedürfnisgerecht optimiert und das Prozessfenster vergrößert werden kann. Die Prozessoptimierung wird daher im nachfolgenden Kapitel vorgenommen.

5 Prozessoptimierung

Die Umformtemperatur bei der Verarbeitung von NFOB zu Bauteilen muss vom Verarbeiter in Abhängigkeit des Umformgrades beim Thermoformen gewählt oder empirisch ermittelt werden. Im Allgemeinen liegt eine sinnvoll gewählte Umformtemperatur oberhalb des Kristallit-Schmelzbereiches von PP, d. h. oberhalb von 158 °C und unterhalb der Degradationstemperatur von Naturfasern, d. h. unterhalb von 200 °C. Je höher der Umformgrad ist, desto höher muss die Umformtemperatur gewählt werden. Da die Auswahl der Umformtemperatur in hohem Maß von der Werkzeuggeometrie und daher vom jeweiligen Bauteil abhängig ist, ist ihre Untersuchung nicht Gegenstand dieser Ausarbeitung. Um dem Verarbeiter von NFOB ein möglichst großes Temperaturprozessfenster zu ermöglichen, soll folglich der Einfluss der Aufheiztemperatur im Bereich der Umformtemperatur von NFOB auf die Rekonsolidierung betrachtet werden. Die Wahl einer zu geringen oder zu hohen Rekonsolidierungstemperatur kann einerseits zu Faserschädigungen bei der Kompaktierung und andererseits zu Geruchs- und Emissionsentwicklung führen.

5.1 Einfluss der NFOB-Rekonsolidierungstemperatur auf die mechanischen Eigenschaften

Probenherstellung und Versuchsdurchführung

Eine Faserschädigung bei der Wahl einer ungeeigneten Rekonsolidierungstemperatur kann durch die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften untersucht werden. Hierfür werden NFOB verschiedener Kompaktierungsgrade mit einem Flächengewicht von 1700 g/m² im Thermoformverfahren zu Platten mit einer für Bauteile üblichen Zieldichte von 0,85 g/cm³ - 0,95 g/cm³, d. h. einer Zieldicke von 1,8 mm - 2 mm, gepresst. Für die leichtere Entnahme prismatischer Probekörper für die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften erfolgt hierbei keine Umformung, sondern eine dem Thermoformprozess entsprechende Konsolidierung, bzw. Kompaktierung. Die NFOB-Halbzeuge weisen Dicken von 2,5 mm, 3 mm und 4 mm auf und werden mit dem gleichen Versuchsaufbau wie in Kapitel 4.2.2 mittels IR-Strahlung auf verschiedene Kerntemperaturen zwischen 160 °C und 200 °C erwärmt und anschließend in einer nicht beheizten Laborpresse, d. h. bei Raumtemperatur, zu 2 mm dicken Platten gepresst. Die

Plattendicke wird über Distanzleisten definiert. Die Oberflächentemperaturen und die Kerntemperatur werden während des gesamten Vorgangs wie bereits in Kapitel 4.2.2 gezeigt über der Zeit aufgezeichnet.

Als Referenzmaterial dienen NF/PP-Vliese mit dem gleichen Flächengewicht und aus derselben Charge, um einen Einfluss der Rohstoffeigenschaften auf die Eigenschaften der gefertigten Platten zu vermeiden. Die Vliese werden in einer Labor-Kalibrierpresse auf unterschiedliche Kerntemperaturen erwärmt und anschließend zu 2 mm dicken Platten gepresst. Beide Prozesse sind schematisch in Abbildung 5.1 gezeigt, die Parameter sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

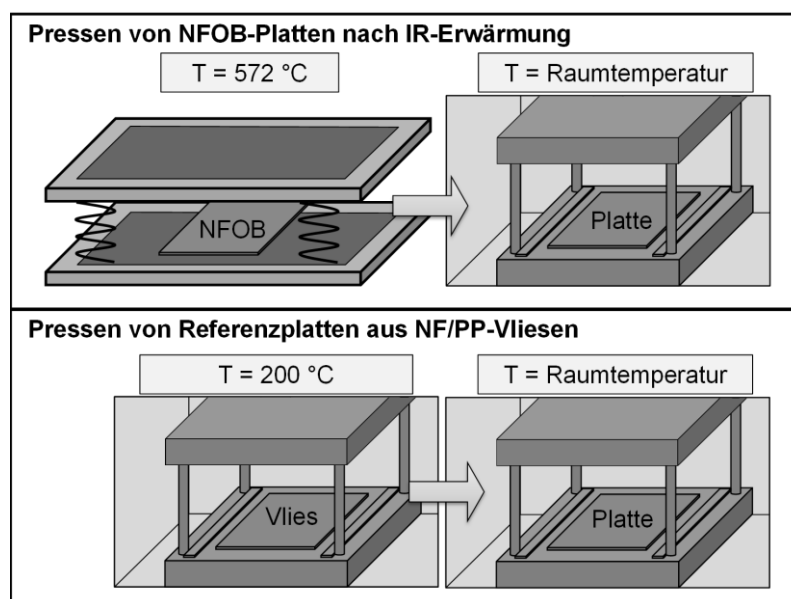


Abbildung 5.1: Schematische Herstellung von Probekörpern für die Untersuchung des Einflusses der Rekonsolidierungstemperatur

Tabelle 5.1: Parameter für die Probenherstellung

| Halbzeug | Halbzeugdicke in mm | Heiztemperatur | Kerntemperatur in °C | Kompaktier-temperatur in °C |
|-------------|---------------------|----------------|----------------------|-----------------------------|
| NFOB | 2,5; 3; 4 | 572 °C | 160 - 200 | 25 |
| Hybridvlies | 8 | 200 °C | 160 - 200 | 25 |

Die Werkzeugtemperatur der Kalibrierpresse beträgt 200 °C, während die Laborpresse zur Kompaktierung der Referenzplatten auch hier nicht beheizt ist und daher Raumtemperatur aufweist. Die Anhaftung der Vliese am beheizten Werkzeug wird ent-

sprechend dem Stand der Technik durch PTFE-Trennfolien vermieden. Die Druckaufbringung in der Kalibrier- und Kompaktierpresse wird pneumatisch von Hand gesteuert und beträgt maximal 2,5 bar¹.

Definition der Rekonsolidierungstemperatur

Für die Untersuchung des Einflusses der Rekonsolidierungstemperatur auf die mechanischen Eigenschaften von NF/PP-Bauteilen ist zunächst die Definition dieser Temperatur notwendig. Im Thermoformprozess soll die Rekonsolidierungstemperatur der Kerntemperatur zum Zeitpunkt der Druckaufbringung im Umformwerkzeug entsprechen. Grafisch ist diese Definition sowohl für NF/PP-Vliese als auch NFOB in Abbildung 5.2 dargestellt.

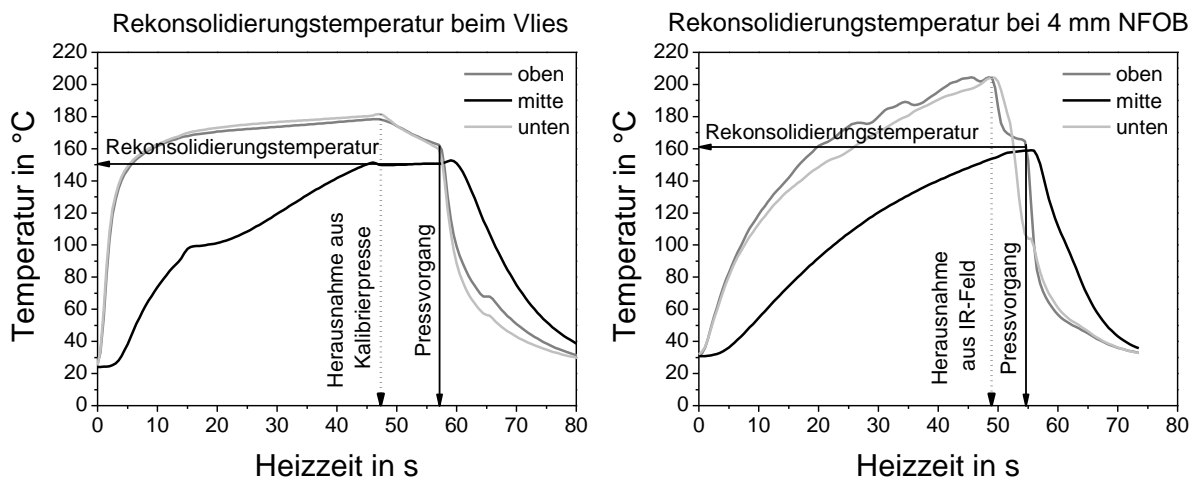


Abbildung 5.2: Definition der Rekonsolidierungstemperatur für Vliese und NFOB

Es ist zu sehen, dass die NF/PP-Vliese bei der gewünschten Kerntemperatur aus der Kalibrierpresse herausgenommen werden und innerhalb der nächsten 10 s in der Umformpresse der Druck für die Kompaktierung aufgebracht wird. In der Transportzeit ändert sich die Kerntemperatur des Vlieses nicht signifikant.

Die Rekonsolidierungstemperatur der NFOB-Probekörper wird ähnlich definiert. Bei Herausnahme der NFOB aus dem IR-Feld steigt die Kerntemperatur aufgrund der größeren Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Kern weiter an, während sich die

¹ Auf den Presszylinder mit einem Durchmesser von 38 mm werden maximal 200 bar aufgebracht. Die Werkzeuggröße beträgt 300 mm x 300 mm, sodass der resultierende Druck auf dem Werkzeug 2,5 bar beträgt.

Oberflächentemperaturen konvektiv bedingt schnell abkühlen. Die Rekonsolidierungstemperatur ist die Kerntemperatur bei der Druckaufbringung, allerdings sind hier die Oberflächentemperaturen bereits wesentlich geringer als die Kerntemperatur.

Ermittlung der mechanischen Eigenschaften

Die Ermittlung des Einflusses der Rekonsolidierungstemperatur auf das Material erfolgt über die Biegeeigenschaften der gefertigten Platten. Diese werden in Anlehnung an DIN EN ISO 178 geprüft. Aus den Platten werden prismatische Probekörper des Typs 2 herausgetrennt und ihre Dichte durch Wiegen und Messen des Volumens bestimmt. Es werden nur Probekörper quer zur Produktionsrichtung der Vlieshalbzeuge verwendet.

Der Auflagerabstand bei den Biegeversuchen beträgt $L = (16 \pm 1) \cdot \text{mittlere Dicke}$. Abbildung 5.3 zeigt den Biege-Elastizitätsmodul der NFOB verschiedener Ausgangsdicken über der Rekonsolidierungstemperatur im Vergleich zu Proben aus dem Referenz-Vliesmaterial und im Vergleich zu Literaturwerten von NF/PP-Bauteilen². Während beim Vlies der E-Modul mit steigender Umformtemperatur aufgrund der besseren Imprägnierung auch ansteigt, erreichen die 2,5 mm und 3 mm dicken NFOB bei 190 °C Umformtemperatur ein Maximum der Steifigkeit. Die Steifigkeit des Referenzvlieses ist bei keiner Umformtemperatur signifikant höher als die Steifigkeiten der NFOB. Alle gemessenen Werte erfüllen, bzw. sind höher als die Literaturwerte für NF/PP-Bauteile. Ein ähnliches Verhalten ist für die Biegefestigkeit in Abbildung 5.4 feststellbar.

Die Festigkeit der Referenzvliese steigt mit steigender Rekonsolidierungstemperatur, während die Festigkeit der 2,5 mm und 3 mm dicken NFOB bei 190 °C Rekonsolidierungstemperatur ihr Maximum erreicht. Bei den ursprünglich 4 mm dicken NFOB kann kein Zusammenhang zwischen Rekonsolidierungstemperatur und E-Modul ermittelt werden. Die Festigkeit des Referenzvlieses ist bei 160 °C, 170 °C und 200 °C höher als die Festigkeiten der ursprünglich 2,5 mm und 3 mm dicken NFOB. Bei geringen Rekonsolidierungstemperaturen von 160 °C - 180 °C ist nicht gewährleistet, dass alle Materialien die Literaturwerte der Festigkeit von NF/PP erreichen.

² Vgl. Kapitel 2.2.1

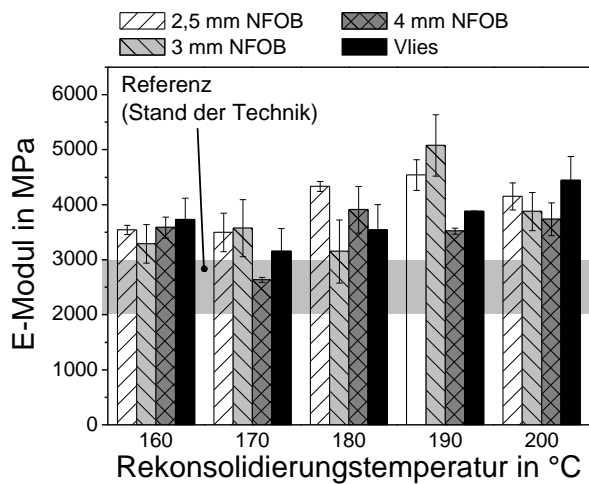


Abbildung 5.3: E-Modul von IR-Erwärmten NFOB in Abhängigkeit der Rekonsolidierungstemperatur im Vergleich zum Referenzvlies und Literaturwerten von NF/PP

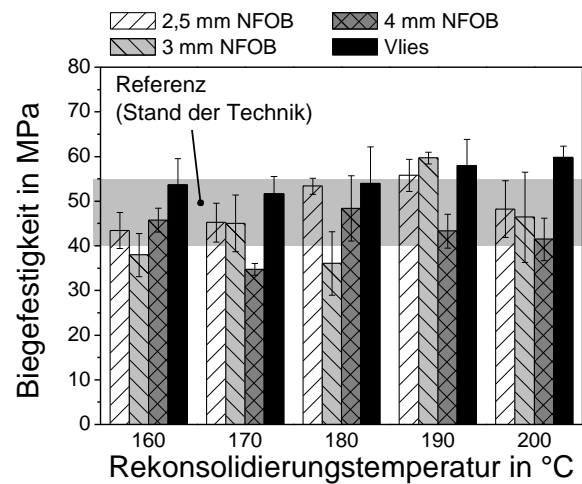


Abbildung 5.4: Biegefestigkeit von IR-Erwärmten NFOB in Abhängigkeit der Rekonsolidierungstemperatur im Vergleich zum Referenzvlies und Literaturwerten von NF/PP

Da eine Korrelation zwischen Rekonsolidierungstemperatur und Biegeeigenschaften der NFOB und Referenzvliese nicht eindeutig ist, liegt die Vermutung nahe, dass die Eigenschaften von den Enddichten der Platten abhängig sind, die trotz Distanzleisten aufgrund der durch natürlichen Wachstum bedingten schwankenden Eigenschaften von Naturfasern und demnach auch Vliesen nicht ideal gefertigt werden konnten. So beträgt die Variation in den Dichten zwischen den einzelnen Probekörpern $0,67 \text{ g/cm}^3$ - $0,97 \text{ g/cm}^3$ und korreliert mit üblichen Erfahrungswerten der Dichtevariation in industriell gefertigten NFK-Platten, wie sie in Abbildung 5.5 beispielhaft dargestellt ist.

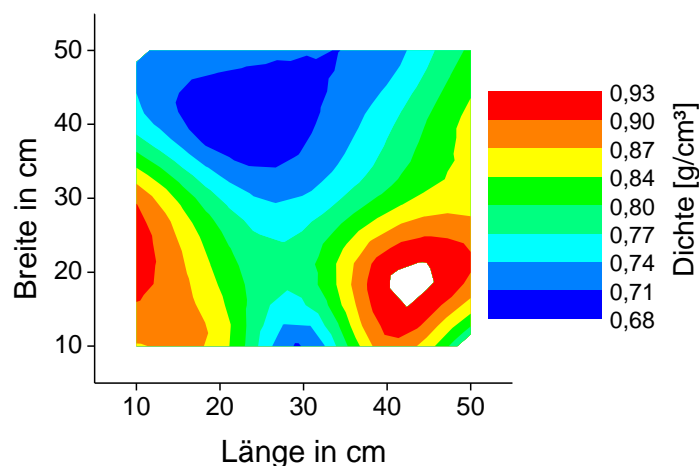


Abbildung 5.5: Variation der Dichte in einer industriell gefertigten NFK-Platte über die Länge und Breite

Daher werden für eine bessere Aussagekraft der Ergebnisse die spezifischen mechanischen Eigenschaften der NFOB und Referenzvliese in Abhängigkeit der Rekonsolidierungstemperatur in Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7 verglichen.

In den Abbildungen ist zu sehen, dass die spezifische Steifigkeit und Festigkeit von sowohl den NFOB als auch dem Referenzvlies die Literaturwerte für NF/PP erfüllt. Das Referenzvlies weist tendenziell eine etwas geringere Steifigkeit auf als die NFOB. Bei der Festigkeit ist es wiederum umgekehrt, hier weisen die Vliese tendenziell eine höhere Festigkeit auf als die NFOB, allerdings sind die Unterschiede nicht signifikant, sodass nicht auf eine thermische Schädigung durch zu hohe Temperatur oder durch den doppelten thermischen Eintrag geschlossen werden kann.

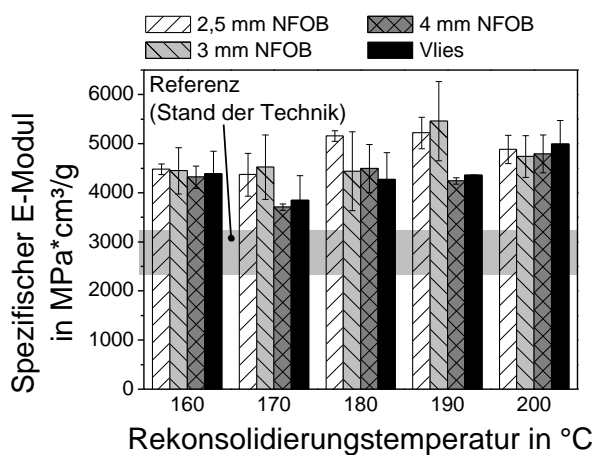


Abbildung 5.6: Spezifischer E-Modul von IR-Erwärmten NFOB in Abhängigkeit der Rekonsolidierungstemperatur im Vergleich zum Referenzvlies und Literaturwerten von NF/PP

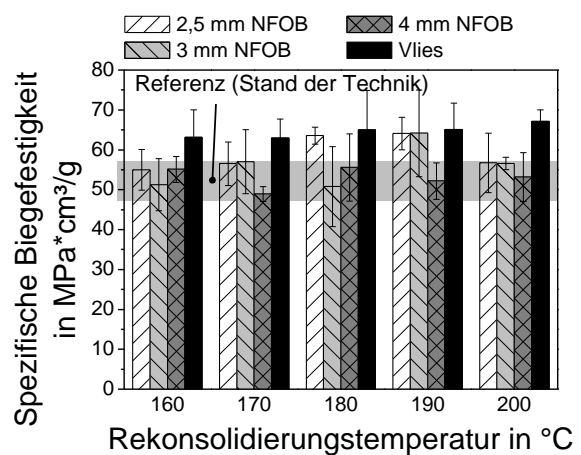


Abbildung 5.7: Spezifische Biegefestigkeit von IR-erwärmten NFOB in Abhängigkeit der Rekonsolidierungstemperatur im Vergleich zum Referenzvlies und Literaturwerten von NF/PP

Fazit

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Naturfasern weder bei der angesetzten Mindest- noch bei der Höchst-Rekonsolidierungstemperatur der NFOB geschädigt werden und die mechanischen Eigenschaften demnach von der Dichte der einzelnen Probekörper abhängen. Die Rekonsolidierungstemperatur in den sinnvoll gewählten Grenzen hat demnach keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, sodass die Umformtemperatur vom Verarbeiter in Abhängigkeit des Umformgrades im Werkzeug in den sinnvoll gewählten Temperaturgrenzen gewählt werden kann.

5.2 Geruch und Emissionen

Ziel der Ausarbeitung ist die Untersuchung des Einflusses einer doppelten thermischen Belastung von Naturfasern, wie sie bei der Herstellung von NFK-Bauteilen mit dem Thermoformverfahren auftritt, auf Emissionen und Geruchsentwicklung. Das Ergebnis soll dazu beitragen, sowohl den Herstellungsprozess der NFOB als auch ihre Verarbeitung im Thermoformverfahren durch die Wahl geeigneter Verarbeitungstemperaturen optimal zu gestalten.

Probenherstellung

Analog zur Herstellung von NFOB verschiedener Kompaktierungsgrade in Kapitel 4.1 werden aus NF/PP-Vliesen mit einem Flächengewicht von 1700 g/m² NFOB mit einer Dicke von 3 mm im beschriebenen Labor-Pressverfahren hergestellt. Die Temperatur bei der 10-minütigen Imprägnierung der Vliese wird zwischen 190 °C und 220 °C variiert, wobei die Imprägniertemperatur als **erste thermische Belastung** definiert wird.

Die so hergestellten NFOB-Platten werden 24 Stunden bei Raumtemperatur gelagert und anschließend analog zum Versuchsaufbau in Kapitel 4.2.2 im IR-Feld bei 20 cm Strahlerabstand bis auf die Oberflächentemperaturen 200 °C, bzw. 220 °C erwärmt, was als **zweite thermische Belastung** definiert wird. Im Anschluss werden die erwärmten NFOB in einer Presse bei Raumtemperatur auf 2 mm Dicke gepresst, 24 Stunden bei Raumtemperatur gelagert, in Aluminiumfolie verpackt und für die Ermittlung der Geruchs- und Emissionswerte an das durchführende Institut³ versendet. Für die Untersuchung der Unterschiede zwischen einfacher und doppelter thermischer Belastung wird eine bei 190 °C imprägnierte Vergleichsplatte keiner zweiten thermischen Belastung ausgesetzt, die als **Referenz Laborpresse (LP)** bezeichnet wird.

Mit der Variation der Imprägnier- und IR-Temperatur soll untersucht werden, ob die Herstellung der NFOB oder die IR-Erwärmung den für Geruch und Emissionen kritischeren Schritt bei der Herstellung von NFK-Bauteilen darstellt.

Als zweite Referenz, nämlich für die Untersuchung der Unterschiede zur konventionellen NF/PP-Pressverarbeitung, dient ein NF/PP-Vlies aus derselben Charge, welches allerdings analog zum Versuchsaufbau in Kapitel 5.1 in einer Labor-Kalibrierpresse bis

³ imat-uve GmbH, Krefelder Straße 679-691, 41066 Mönchengladbach

auf 200 °C Oberflächentemperatur erwärmt und anschließend in einer Umformpresse bei Raumtemperatur zu 2 mm dicken Platten kompaktiert und als **Referenz Kalibrierpresse (KP)** bezeichnet wird. Um Anhaftungsprobleme zu vermeiden, werden PTFE-Folien sowohl in der Kalibrier- als auch der Umformpresse verwendet. Zur Nachahmung von Produktionsbedingungen werden zunächst sieben NF/PP-Platten mit denselben PTFE-Folien hergestellt und erst die achte Platte wird auf Geruchs- und Emissionsmessungen untersucht. Wie in der industriellen Verarbeitung werden die Folien zwischenzeitlich nicht gereinigt.

Die Referenzplatten KP und LP und die doppelt thermisch belasteten Platten sind mit ihrer Imprägnier- und Heizzeit in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Thermische Belastungen der NFOB für Geruchs- und Emissionsmessungen⁴

| Plattennr. | 1. thermische Belastung (Presse) | Imprägnierzeit in s | 2. thermische Belastung (IR) | Heizzeit in s |
|--------------|----------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------|
| Referenz KP | 200 °C | 60 | – | – |
| Referenz LP | 190 °C | 600 | – | – |
| 1 | 190 °C | | 200 °C | 36 - 41 |
| 2 | | | 220 °C | 45 - 54 |
| 3 | 200 °C | | 200 °C | 36 - 41 |
| 4 | | | 220 °C | |
| 5 | 210 °C | | 200 °C | 36 - 41 |
| 6 | | | 220 °C | 45 - 54 |
| 7 | 220 °C | | 200 °C | 36 - 41 |
| 8 | | 220 °C | 45 - 54 | |

Für die Untersuchung der Geruchs- und Emissionswerte wird die ungünstigste Konstellation gewählt, sodass die Platten nach einer 24-stündigen Lagerung bei Raumtemperatur anschließend in Aluminiumfolie verpackt und an das Prüfinstitut gesendet werden. Dort werden sie nach Eintreffen innerhalb von 48 Stunden geprüft.

Versuchsdurchführung der Geruchsmessung

An den Proben in Tabelle 5.2 werden Geruchsmessungen nach VDA 270 durch fünf geschulte Personen nach Variante 3 durchgeführt. Variante 3 besagt, dass die Proben nicht bei Raumtemperatur, sondern unter ungünstigsten Bedingungen nach einer 24-

⁴ Bei Platte 4 kam es bei der Ermittlung der Oberflächentemperatur zu Messfehlern aufgrund von Rauchentwicklung, daher wird diese Platte verworfen.

stündigen Lagerung bei 80 °C auf ihre Geruchsentwicklung untersucht werden. Abbildung 5.8 zeigt die Geruchsnoten der NFOB im Vergleich zu den Referenzvliesen KP und LP.

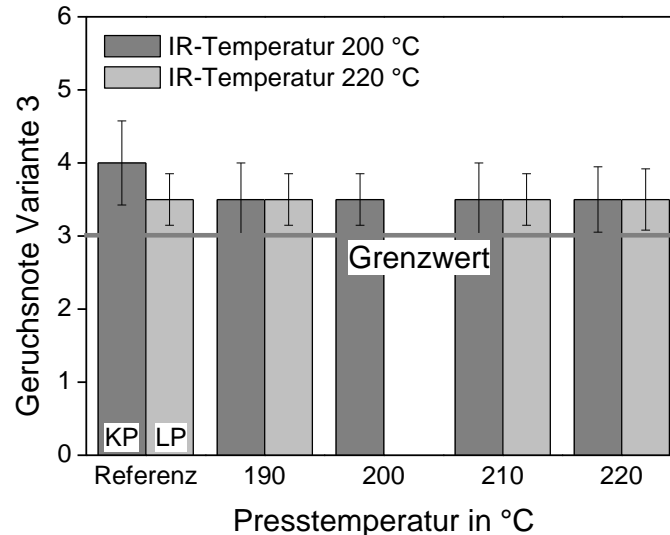


Abbildung 5.8: Geruch nach VDA 270, Variante 3

Es ist zu erkennen, dass alle Proben die Grenzwert-Note 3 überschreiten. Obwohl die Einwirkzeit der thermischen Belastung bei der Referenzplatte KP die geringste ist, weist diese Platte die Geruchsnote 4 auf, während alle in der Laborheizpresse hergestellten und die IR-erwärmten Platten die Note 3,5 aufweisen. Der Vergleich zwischen der Referenzprobe LP und den NFOB mit einer Presstemperatur von 190 °C zeigt keinen Einfluss der zweiten Erwärmung auf die Geruchsentwicklung. Die Auswertung zeigt, dass die IR-Erwärmung der Standard-Herstellungsmethode nicht unterlegen ist. Entgegen der Erkenntnisse des Standes der Technik ist auch bei höheren Imprägnier-temperaturen als 190 °C kein Unterschied zur Referenzprobe LP zu sehen. Das kann vor allem daran liegen, dass die kontaktlose zweite Erwärmung der NFOB zu einer Verflüchtigung geruchsbildender Substanzen führt. Der Geruch kann demnach bei doppelter thermischer Belastung und kontaktloser zweiter Erwärmung gleich oder sogar geringer sein als bei einfacher Erwärmung und einer Erwärmung über Kontaktheizung mit PTFE-Folien.

Versuchsdurchführung der Emissionsmessung

Zur Bestimmung der Emissionen werden mehrere Methoden angewandt, da keine einzelne Prüfmethode das gesamte Substanzspektrum abbilden kann. Die Summe aller

flüchtigen organischen Verbindungen, d. h. die TVOC- (Total Volatile Organic Compound-) Emissionen, werden nach VDA 277 mittels statischem Headspace-Verfahren geprüft. Dabei werden leichtflüchtige bis mittelflüchtige Verbindungen identifiziert und zusammengefasst. Bei NF/PP sind das vor allem Methanol, Methylacetat, Essigsäure und Furfural. Bei der Thermodesorption, also einem dynamischen Headspace, wird die Emission der mittel- bis schwerflüchtigen organischen Verbindungen nach VDA 278 ermittelt und im Temperaturbereich von 90 °C als VOC-Wert und im Bereich von 120 °C als Fog-Wert zusammengefasst. Bei NF/PP sind das vor allem Laurinsäure, Myristinsäure und Palmitinsäure. Die Substanzspektren der verschiedenen Messverfahren sind in Abbildung 5.9 in Abhängigkeit der Schwerflüchtigkeit der Verbindungen dargestellt.

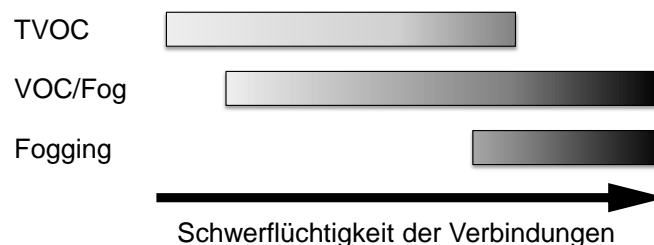


Abbildung 5.9: Substanzspektren der Messmethoden zum Vergleich der Emissionswerte nach [126]

Mit der Ermittlung der TVOC- sowie VOC/Fog-Werte kann fast das gesamte Substanzspektrum identifiziert werden, sodass von weiteren Prüfungen abgesehen wird.

Die TVOC-Werte der Probekörper sind in Abbildung 5.10 zusammengefasst.

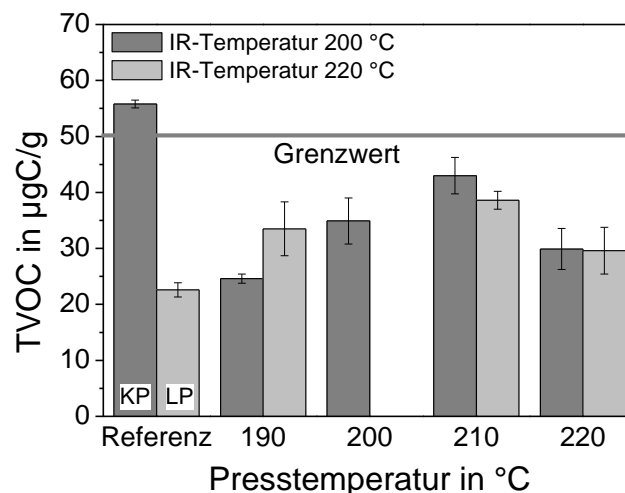


Abbildung 5.10: Mittels statischem Headspace-Verfahren ermittelte TVOC-Werte nach VDA 277

Obwohl die Referenzplatte KP die kürzeste Einwirkzeit der thermischen Belastung aufweist, ist sie die einzige Platte, welche den von der Automobilindustrie geforderten Grenzwert der Summe aller flüchtigen organischen Verbindungen von 50 µg C/g überschreitet.

Im Vergleich zum Referenzwert LP zeigen die bei 190 °C imprägnierten NFOB, dass bei einer zweiten thermischen Belastung weitere Stoffe freigesetzt werden, sodass die Summe der TVOC besonders bei einer höheren Aufheiztemperatur im IR-Feld ansteigt. Diese Annahme lässt sich für höhere Imprägniertemperaturen nicht bestätigen, da hier die eventuell schon die höhere Imprägniertemperatur bereits zur Freisetzung der gleichen Stoffe führt. Insgesamt wird der Grenzwert bei jeder Imprägniertemperatur und auch nach doppelter thermischer Belastung deutlich unterschritten.

Abbildung 5.11 zeigt die VOC- und Fog-Werte der NFOB und der Referenzproben KP und LP. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die VOC-Werte bei einfacher thermischer Belastung die geringsten sind. Allerdings sind auch hier die Werte der Referenzprobe KP trotz kürzerer Einwirkzeit der thermischen Belastung höher als bei der Referenzprobe LP. Die doppelt thermisch belasteten NFOB zeigen, dass bei einer Presstemperatur von 190 °C die VOC-Werte im Vergleich zur Referenzprobe LP höher sind. Bei der zweiten thermischen Belastung werden demnach weitere Stoffe freigesetzt. Das Maximum der VOC-Werte erreichen demnach auch die bei 220 °C imprägnierten und doppelt erwärmten NFOB.

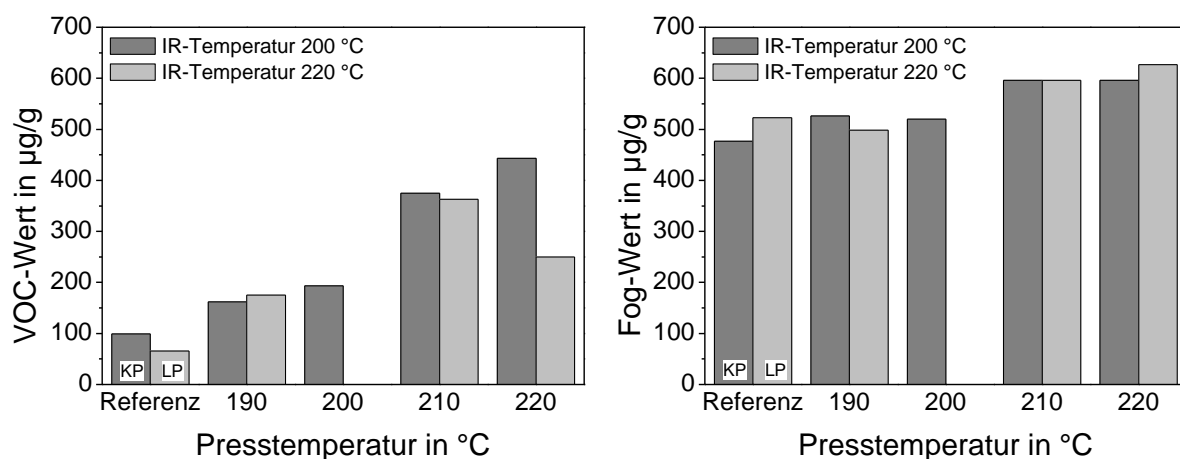


Abbildung 5.11: Mittels Thermodesorption ermittelte VOC-Werte und FOG-Werte nach VDA 278

Die Fog-Werte zeigen ein anderes Verhalten. Hierbei weist die Referenzprobe KP die geringsten Fog-Werte auf. Die Werte der Referenzprobe LP und der bei 190 °C imprägnierten, aber doppelt thermisch belasteten NFOB sind relativ ähnlich. Daraus kann geschlossen werden, dass eine doppelte thermische Belastung sich nicht negativ auf die Fog-Werte auswirkt. Vielmehr ist hier eine Korrelation zwischen Imprägniertemperatur und Fog-Werten zu erkennen, die allerdings unabhängig von der Höhe der zweiten thermischen Belastung sind.

Eine Zusammenfassung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Geruchs- und Emissionswerte ist in Tabelle 5.3 gegeben.

Tabelle 5.3: Einfluss der Presstemperatur (1. thermische Belastung) und Oberflächentemperatur bei IR-Erwärmung (2. thermische Belastung) auf Geruch und Emissionen und Vergleich mit der Verarbeitung in einer Kalibrierpresse

| | Presstemperatur ↑ (190 °C - 220 °C) | T_{Oberfläche} bei IR ↑ (200 °C - 220 °C) | Vergleich mit Kalibrierpresse |
|--------|--|--|--|
| Geruch | o | o | geringer |
| TVOC | ↑ | ↑ | geringer |
| VOC | ↑ | ↑ | höher |
| Fog | ↑ | o | gleich/höher |

↑: steigend, ↓: senkend, +: Einfluss vorhanden, o: kein klarer Einfluss

Im Vergleich zu Geruchs- und Emissionswerten des Referenzmaterials KP ist die IR-Erwärmung von NFOB für Geruch und TVOC vorteilhafter, die VOC- und Fog-Werte sind allerdings bei höheren Imprägniertemperaturen auch höher. Im Mittel schneiden die NFOB ähnlich ab und sind demnach dem herkömmlichen Fertigungsverfahren nicht unterlegen. Bezüglich der Geruchsentwicklung ist die Erwärmung mittels IR-Strahlung der herkömmlichen Verarbeitungsmethode sogar überlegen, da die geruchsbildenden flüchtigen Komponenten durch die berührungslose Erwärmung nicht im Material oder den PTFE-Folien gespeichert werden. Insgesamt ist allerdings die Imprägniertemperatur der ausschlaggebende Faktor bei der Emissionsentwicklung. Üblicherweise steigen die Emissionswerte mit steigender Presstemperatur, was die Literaturwerte bestätigt. Eine zweite thermische Belastung zwischen 200 °C - 220 °C hat darüber hinaus eine weitere Auswirkung auf Emissionen. Demnach sollte die Chance genutzt werden, bei niedrigen Temperaturen umzuformen, wenn möglich.

Wichtig ist anzumerken, dass Emissionen nicht zeitlich konstant sind und Faktoren wie Zeitpunkt der Fertigung, Lagerung, Probenentnahme und der Zerkleinerungsgrad eine

große Rolle spielen. Üblicherweise ist die Zeitspanne bis zum Gebrauch der NFK-Bauteile länger als 24 Stunden, sodass die Emissions- und Geruchswerte mit hoher Wahrscheinlichkeit in Realbauteilen geringer sind als die hier gemessenen.

Da ein Zusammenhang zwischen NFOB-Herstellungstemperatur und Emissionen ersichtlich ist, dienen die Ergebnisse dieser Untersuchung nachfolgend der Erstellung von Verarbeitungsrichtlinien.

6 Richtlinien für die IR-Erwärmung von NFOB

Die Richtlinien für Verarbeiter thermoplastischer NFK umfassen sowohl die Rohstoffauswahl, die Verarbeitung dieser Rohstoffe zu Halbzeugen sowie die Weiterverarbeitung zu Bauteilen. Grundsätzlich können in der Praxis folgende Fragen gestellt werden, die anhand der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse beantwortet werden sollen.

1. *Wie kann die Verarbeitung thermoplastischer NFK effizient auf bereits verfügbarem Equipment für die Verarbeitung konventioneller FKV ohne große Investition erreicht werden und welche Vorteile ergeben sich im Vergleich zur konventionellen Herstellung in einer Pressstraße?*

Die Ergebnisse in dieser Arbeit zeigen, dass eine alternative Methode zur derzeitigen Herstellung thermoplastischer NFK-Bauteile enorme Vorteile in Bezug auf Logistik, Automatisierung und Hybridisierung von Verarbeitungsverfahren aufweisen kann. Diese Methode beruht auf der Verwendung bereits imprägnierter und vorkompakterter Naturfaser-Organobleche, welche mittels eines herkömmlichen, für GFK-/CFK-Organobleche optimierten, Thermoformverfahrens in einem Schritt zum Bauteil verarbeitet werden können. Dafür wurde in dieser Arbeit eine speziell für Naturfasermaterialien materialelektive IR-Erwärmung entwickelt. Durch die Auswahl einer geeigneten Strahlertemperatur kann das vom Strahler emittierte Wellenlängenband so eingestellt werden, dass ein größerer Teil der IR-Strahlung durch das Polymer absorbiert wird als durch Naturfasern, was eine besonders schonende Erwärmung des Materials zulässt und die thermische Belastung der Faserverstärkung minimiert. Für eine möglichst schnelle und dennoch schonende Erwärmung liegt die ideale Strahlertemperatur zwischen 500 °C - 590 °C. Aufgrund der konvektiven Kühlung durch die Umgebungsluft ist grundsätzlich eine höhere Oberflächentemperatur auf der Oberseite des Materials zu erwarten, weshalb eine entsprechende Leistungsanpassung des Strahlers (oder des Strahlerabstandes) erfolgen muss. Auch eine vertikale Erwärmung des Materials ist möglich, wenn der anschließende Pressprozess das zulässt.

2. *Welche Faserrohstoffe mit welchen Röstgraden und Farben sind geeignet und welche sind ungeeignet für die materialelektive IR-Erwärmung von NFOB*

Die Absorption mittelwelliger IR-Strahlung durch die Naturfasern Hanf, Flachs und Kenaf hängt in verschwindend geringem Maß von ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrem Röstgrad, bzw. ihrer Farbe ab. Die Wahl der Rohstoffe kann demnach primär von der Verfügbarkeit, dem aktuellen Naturfaserpreis und den mechanischen Eigenschaften erfolgen. Es ist davon auszugehen, dass andere Bastfasern wie Ramie und Jute aufgrund ähnlicher chemischer Zusammensetzung auch ähnliche Ergebnisse zeigen. Tendenziell ist allerdings die Geruchsnote von Fasern mit ansteigendem Röstgrad schlechter und überröstete Fasern weisen selten ausreichende Noten auf. In geruchskritischen Anwendungen, beispielsweise im automobilen Innenraum, kann durch die Wahl der Faserrohstoffe bereits vor der Verarbeitung die Geruchsnote minimiert werden.

3. *Gibt es Restriktionen bei der Halbzeugherstellung (NFOB) für die materialelektive IR-Erwärmung?*

NFOB können mithilfe diskontinuierlicher, semi-kontinuierlicher und kontinuierlicher Pressverfahren hergestellt werden, wobei die Anlagenproduktivität von diskontinuierlich bis kontinuierlich zunimmt. Grundsätzlich ist die Imprägnierung von Naturfasern durch das thermoplastische Polymer eine zeitabhängige und demnach teure Komponente der NFOB-Herstellung. Sie kann durch höheren Druck und höhere Temperatur beschleunigt werden, was allerdings zur Faserschädigung führen kann. Die Herstelltemperatur der NFOB ist ein entscheidender Faktor für die Emissionsentwicklung und muss umso geringer gewählt werden, je kritischer die Emissionen für die spätere Anwendung sind. Mit einer geringen Herstelltemperatur sind auch geringere Kompaktierungsgrade erreichbar, die allerdings mit einer schlechteren Wärmeleitung einhergehen und so die Prozesszeit bei der IR-Erwärmung verlängern. Aus diesem Grund muss für jeden Fall und jedes einzelne Bauteil ein Kompromiss zwischen den erforderlichen IR-Erwärmungseigenschaften und den Kosten für die Erreichung eines hohen Kompaktierungsgrades gefunden werden. Grundsätzlich haben die Ergebnisse dieser Ausarbeitung gezeigt, dass eine materialelektive IR-Erwärmung für NFOB-Flächenge-

wichte zwischen 1000 g/m^2 - 1700 g/m^2 sowie Dicken zwischen 2 mm und 4 mm funktional ist. Dabei ist die Heizzeit umso geringer, je geringer auch das Flächengewicht und je höher der Kompaktierungsgrad sind.

4. *Ist die Geruchsentwicklung durch die doppelte thermische Belastung einmal bei der Herstellung und einmal bei der Verarbeitung von NFOB höher als bei der Herstellung derselben Bauteile im herkömmlichen Pressprozess?*

Nein, die Geruchsentwicklung bei doppelter thermischer Belastung ist sogar leicht geringer als beim herkömmlichen Pressprozess. Das liegt an der kontaktlosen zweiten Erwärmung der NFOB durch die IR-Strahlung, welche die Verflüchtigung geruchsbildender Emissionen fördert.

5. *Sind die mechanischen Eigenschaften der Bauteile von der Umformtemperatur abhängig?*

Kapitel 5.1 hat gezeigt, dass die mechanischen Eigenschaften IR-erwärmter NFOB nicht von der Umformtemperatur zwischen $160 \text{ }^\circ\text{C}$ und $200 \text{ }^\circ\text{C}$ abhängen, sondern vielmehr von der Dichte des Endbauteils und demnach von der Kompaktierung in der Umformpresse. Die Bauteildicke und -Dichte sowie das Flächengewicht werden von der Konstruktion vorgegeben.

6. *Welche Heizzeit ist für welche Flächengewichte bei welchen Vorkompaktierungsgraden zu erwarten und wie kann sie an die Bedürfnisse der Verarbeiter bezüglich Zykluszeit oder minimaler Emissionsentwicklung optimiert werden?*

In Kapitel 4.4 wurde eine umfassende Analyse der Einflüsse von Flächengewicht und Dicke der NFOB sowie der Einfluss des IR-Strahlerabstandes auf die Heizzeit sowie die Oberflächentemperatur durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Flächengewicht für die Heizzeit bis zum Erreichen einer definierten Kerntemperatur ausschlaggebend und unabhängig von der Dicke und Dichte des NFOB ist. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse auch, dass die Dicke der NFOB die Oberflächentemperatur in Abhängigkeit der Heizzeit bestimmen, welche vom Flächengewicht unabhängig ist. Diese Abhängigkeiten wurden mathematisch beschrieben und sind in Abbildung 6.1 als Richtlinien für das Heizzeit-Prozessfenster zusammengefasst.

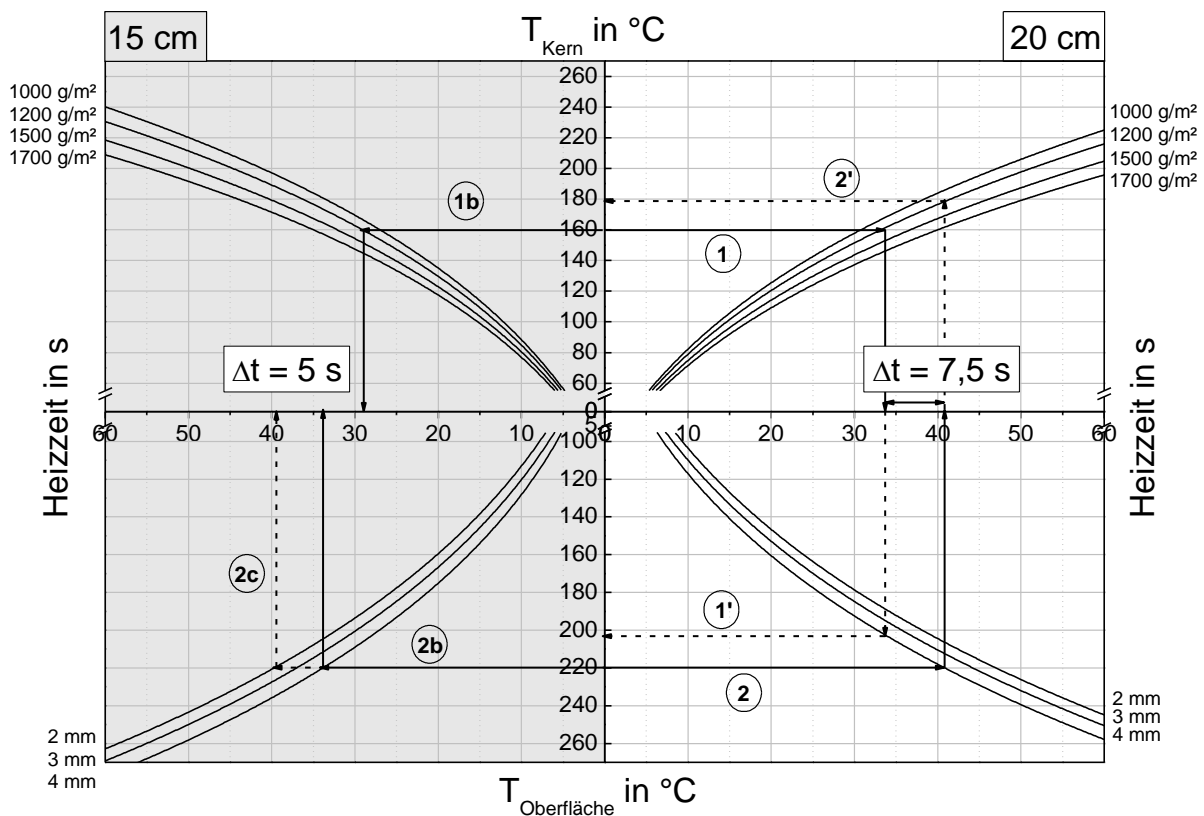


Abbildung 6.1: Richtlinien für das Heizzeit-Prozessfenster bei der IR-Erwärmung von NFOB in Abhängigkeit des Flächengewichts, der Dicke und des IR-Strahlerabstands

Es wird beispielhaft ein geeignetes Heizzeit-Prozessfenster für ein NFOB mit einem Flächengewicht von 1200 g/m^2 bei einem IR-Strahlerabstand von 20 cm ermittelt, siehe rechte Seite in Abbildung 6.1. Wenn der Verarbeiter eine Mindest-Umformtemperatur von $160 \text{ }^\circ\text{C}$ fordert, beträgt die Mindest-Heizzeit bis zum Erreichen dieser Umformtemperatur $33,5 \text{ s}$ (Pfad 1). Für 4 mm dicke NFOB wird eine Oberflächentemperatur von $202 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht (Pfad 1'). Die Oberflächentemperatur soll bei der Verarbeitung einen Maximalwert von $220 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht überschreiten. Als ökonomisch vorteilhafteste Variante werden 4 mm dicke NFOB ausgewählt. Diese überschreiten die maximale Oberflächentemperatur erst, wenn eine Zeit von 41 s überschritten ist (Pfad 2). Damit wird eine maximale Umformtemperatur von $179 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht (Pfad 2'). Der Verarbeiter hat somit ein Heizzeit-Prozessfenster zwischen $33,5 \text{ s}$ und 41 s , welches $\Delta t = 7,5 \text{ s}$ beträgt.

Wenn der Prozess hinsichtlich Zeit optimiert werden muss, kann der Verarbeiter einen IR-Strahlerabstand von 15 cm bevorzugen, siehe linke Seite in Abbildung 6.1. Die Heizzeit bis zum Erreichen der geforderten Umformtemperatur beträgt in diesem Fall

29 s und ist daher 4,5 s kürzer als bei einem größeren Strahlerabstand (Pfad 1b). Allerdings wird für eine maximale Oberflächentemperatur von 220 °C bei einer NFOB-Dicke von 4 mm eine maximale Heizzeit von 34 s empfohlen (Pfad 2b), sodass das Heizzeit-Prozessfenster lediglich $\Delta t = 5 \text{ s}$ beträgt. Für emissionskritische Bauteile kann der Verarbeiter auf ein 2 mm dickes NFOB ausweichen, welches eine Heizzeit bis 40 s bis zum Erreichen der maximalen Oberflächentemperatur zulässt (Pfad 2c). Das Heizzeit-Prozessfenster würde in diesem Fall zwischen 29 s und 40 s liegen und $\Delta t = 11 \text{ s}$ betragen. So kann auch durch eine nicht optimale Prozessführung eine thermische Degradation der NFOB-Oberfläche vermieden werden.

Für den Fall, dass Flächengewichte, Dicken oder Strahlerabstände zwischen den angegebenen Werten gefordert sind, kann der Verarbeiter die Heizzeit durch die Ermittlung des nächstkleineren und nächstgrößeren Wertes interpolieren.

Die Wahl der Kerntemperatur richtet sich dabei nach dem Umformgrad, der je nach Geometrie empirisch ermittelt werden muss. Weiterhin können insbesondere VOC-Werte durch die Wahl einer geeigneten, maximalen Oberflächentemperatur, bzw. einer hinreichend geringen Umformtemperatur optimiert werden.

7 Zusammenfassung und Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung eines großserientauglichen Aufheizverfahrens für thermoplastische, vorkompaktierte und bereits imprägnierte naturfaserverstärkte Kunststoffe, welche im Rahmen der Ausarbeitung als Naturfaser-Organobleche bezeichnet werden. Mit der neuartigen Erwärmungsmethode soll die Nutzung der hocheffizienten Thermoform-Prozessketten, wie sie bereits für glas- und kohlenstofffaserverstärkte, thermoplastische Halbzeuge zum Einsatz kommen, gewährleistet werden.

Die Entwicklung basiert auf einem zunächst theoretisch ausgearbeiteten Konzept einer materialelektiven Infrarot-Erwärmung. Ziel war die Ermittlung einer Strahlertemperatur, deren emittiertes, mittelwelliges Wellenlängenband zu einer maximierten Absorption durch das thermoplastische Polymer und einer maximierten Transmission durch die temperatursensible Verstärkungsstruktur führt. Erste Infrarot-Spektroskopie-Aufnahmen zeigten, dass eine rein selektive Erwärmung des Polymers aufgrund der sich überlagernden Absorptionsspektren zwar nicht möglich ist, allerdings ist die Absorption der Strahlung durch Naturfasern bei Strahlertemperaturen unterhalb 625 °C geringer als durch das Polymer. Die theoretische Ausarbeitung konnte in einer experimentellen Untersuchung des Einflusses der Strahlertemperatur auf die IR-Erwärmung von Naturfaser-Organoblechen bestätigt werden, die ein optimales Strahlertemperatur-Prozessfenster von 500 °C - 590 °C zeigten. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde eine Strahlertemperatur von 572 °C für alle experimentellen Untersuchungen gewählt, da sie einen guten Kompromiss zwischen schneller und schonender Erwärmung darstellt.

Weiterhin wurde untersucht, ob die Variation der Faserrohstoffe einen Einfluss auf die Absorption der Infrarotstrahlung im mittelwelligen Bereich aufweist. Dafür wurden sowohl verschiedene Röstgrade, d. h. fast das gesamte Spektrum von unterschiedlichen Rohstofffarben, als auch die Variation der chemischen Zusammensetzung zunächst spektroskopisch und im Anschluss in IR-Heizversuchen untersucht. Es hat sich gezeigt, dass weder eine Änderung der Rohstofffarbe noch die Variation der chemischen Zusammensetzung der Naturfasern einen signifikanten Einfluss auf die Absorption mittelwelliger Strahlung aufweist. Vielmehr waren die Unterschiede in den Heizzeiten und

Oberflächentemperaturen bei der IR-Erwärmung den Halbzeugbeschaffenheiten wie Faser- und Matrixverteilung, Porositätsgehalt und -verteilung zuzuschreiben. Für das Aufheizkonzept bedeutet dies, dass eine Variation der Röstklassen zwar keine Chance für eine Verbesserung bietet, aber auch kein Risiko für eine Einschränkung der Funktionalität der Erwärmungsmethode, sodass die Rohstoffwahl auch weiterhin von der Verfügbarkeit und dem Preis abhängig sein darf.

Den größten Einfluss auf die materialelektive IR-Erwärmung weist die Halbzeugbeschaffenheit auf. Die Herstellung der Organobleche ist umso kostenintensiver ist, je höher der Kompaktierungsgrad ist und je mehr eine Halbzeugdichte im Bereich der endgültigen Bauteildichte angestrebt wird. Prozessbedingt ist daher eine möglichst geringe Dichte und hohe Bauteildicke anzustreben, die jedoch aufgrund des hohen Porositätsgehalts einer effizienten IR-Erwärmung im Wege steht. In Umfassenden Untersuchungen zum Einfluss der Halbzeugbeschaffenheit auf die IR-Erwärmung wurden Naturfaser-Organobleche mit Flächengewichten zwischen 1000 g/m^2 bis 1700 g/m^2 zunächst auf Dicken von 2 mm und 4 mm vorkompaktiert und anschließend im IR-Feld erwärmt. Es konnte gezeigt werden, dass das Flächengewicht unabhängig von der Dicke einen signifikanten Einfluss auf die Heizzeit aufweist. Hingegen wird die Oberflächentemperatur aufgrund der Wärmeübertragung in den Kern primär durch die Organoblechdicke bestimmt. Beide Einflüsse konnten mathematisch beschrieben werden und stellen die Grundlage für die Ausarbeitung von Verarbeitungsrichtlinien für den Verarbeiter dar.

Die Untersuchung des Prozesseinflusses hat im Anschluss dazu beigetragen, das thermische Prozessfenster zu vergrößern. Es konnte gezeigt werden, dass die Wahl einer Rekonsolidierungstemperatur bei der IR-Erwärmung weder bei zu geringen, noch bei zu hohen Kerntemperaturen die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Vielmehr sind Steifigkeit und Festigkeit der Bauteile durch die Kompaktierung in der Umformpresse bestimmt und hängen somit von der Enddichte des Bauteils ab, während die mechanischen Eigenschaften von kalibrierten Vliesen von der Imprägnierzeit und der Imprägniertemperatur beeinflusst werden.

Es konnte zudem gezeigt werden, dass der Geruch von verarbeiteten Naturfaser-Organoblechen, die einer doppelten thermischen Belastung einmal während der Herstellung und einmal während der Verarbeitung ausgesetzt sind, sogar geringer ist als der

Geruch entsprechender kalibrierter Vliese, die nur einer thermischen Belastung ausgesetzt werden. Grund hierfür ist, dass durch die kontaktlose Erwärmung mittels Strahlung die geruchsbildenden Stoffe die Möglichkeit haben, sich zu verflüchtigen. Im Gegensatz dazu werden Gerüche bei Kontaktheizverfahren in den Faserrückständen auf den PTFE-Trennfolien gespeichert und an die Bauteile weitergegeben.

Insgesamt konnte bei der Untersuchung der Emissionen festgestellt werden, dass diese primär von der Temperatur bei der Organoblechherstellung abhängen und nicht von der Temperatur bei der Erwärmung mittels IR-Strahlung. Während die TVOC-Werte beim Thermoformen wesentlich geringer sind als beim Referenzvlies, sind die VOC- und Fog-Werte höher. Im Schnitt kann also geschlussfolgert werden, dass die doppelte thermische Belastung der herkömmlichen Verarbeitung nicht unterlegen ist. Allerdings sollte die Chance einer geringen Umformtemperatur genutzt werden, um VOC-Werte zu minimieren.

Die Ergebnisse wurden anschließend zu Verarbeitungsrichtlinien zusammengefasst. Hierfür wurden Fragen ausgearbeitet, die in der Produktion auftreten können und mittels der Ergebnisse dieser Arbeit beantwortet werden. Die Richtlinien bieten dem Verarbeiter eine gezielte Auswahl des Halbzeugs und einen Hinweis auf die korrekte Prozessführung im Hinblick auf die Heizzeit.

Die entwickelte Erwärmungsmethode auf Basis einer materialelektiven IR-Erwärmung bildet die Grundlage für die Automatisierung derzeitiger Herstellungsprozesse und die weitere Gewichtsreduktion von thermoplastischen NFK. Viele Probleme, die mit der Verwendung von thermoplastischen NFK einhergehen, können adressiert werden. Dazu gehören Logistikprobleme, Flexibilität in der Verarbeitung, Anhaftungs- und Geruchsprobleme sowie der Investitionsbedarf. Die Forschungsergebnisse sind ein wichtiger Schritt für die Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit naturfaserverstärkter Kunststoffe im Vergleich zu glasfaserverstärkten Polymeren und ermöglichen die Erschließung neuer Anwendungsgebiete und Absatzmärkte.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Parchmann, I.; Kaminski, B.; Jansen, W.: Die Wärmeabsorption von Gasen – Voraussetzung für den Treibhauseffekt. In: CHEMKON, Vol. 2, Heft 1, 1995, S. 17-25
- [2] Schönwiese, C.-D.: Ändert der Mensch das Klima? www.energie-fakten.de, 20.06.2002
- [3] United Nations Framework Convention on Climate Change – Status of Ratification of the Kyoto Protocol, 2014. http://unfccc.int/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/2613.php, 10.04.2017
- [4] United Nations Framework Convention on Climate Change – Historic Paris Agreement on Climate Change, 12. Dezember 2015: <http://newsroom.unfccc.int/unfccc-newsroom/finale-cop21/>, 23.04.2017
- [5] Amtsblatt der europäischen Union: Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts zur Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. 5.6.2009
- [6] Krenkel, W.: Verbundwerkstoffe, 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2009
- [7] Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD: Deutschlands Zukunft gestalten. 18. Legislaturperiode. Union Betriebs-GmbH, Rheinbach 2013.
- [8] Das, S.: Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 16, 2011, S. 268-282
- [9] Barth, M.; Carus, M.: Carbon Footprint and Sustainability of Different Natural Fibres for Biocomposites and Insulation Material. nova-Institut, Huerth, 2015
- [10] Haufe, J.; Carus, M.: Hemp Fibres for Green Products – An assessment of life cycle studies on hemp fibre applications. The European Hemp Association (EiHA): <http://bio-based.eu/download/?did=1086&file=0>, 08.04.2017

- [11] Mieck, K.-P.; Reußmann, T.; Lützkendorf, R.: Berechnungen und Experimente zur Schlagzähigkeit naturlangfaserverstärkter Composites. 14. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Wiley- VCH Verlag, Weinheim, 2003
- [12] Müssig, J.; Carus, M.: Bio-Polymerwerkstoffe sowie holz- und naturfaserverstärkte Kunststoffe. In: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe Teil II, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, 2007.
- [13] Bledzki, A.K.; Faruk, O.; Sperver, V.E.: Cars from Bio-Fibres. In: Macromolecular Materials and Engineering, Vol. 291, 2006, S. 449-457
- [14] Carus, M.: Biocomposites in the Automotive Industry, markets and environment. bio!car – Biobased Materials for Automotive Applications Conference, Stuttgart, 24.-25. September 2015
- [15] Carus, M.; Eder, A.; Dammer, L.; Korte, H.; Scholz, L.; Essel, R.; Breitmayer, E.: Wood-Plastic Composites (WPC) and Natural Fibre Composites (NFC): European and Global Markets 2012 and Future Trends. WPC/NFC Market Study, nova-Institut, Huerth, 2014
- [16] Gurunathan, T.; Mohanty, S.; Nayak, S.K.: A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. In: Composites: Part A, Vol. 77, 2015, S. 1-25
- [17] Clasen, C.; Frank, B.; Reinders, M.: Marktausblick und aktuelle Preissituation von subtropischen Naturfasern (Jute, Kenaf, Meshta), Flachs- und Hanffasern. 41. AVK-Arbeitskreissitzung „Naturfaserverstärkte Kunststoffe“, Frankfurt/Main, 28. Oktober 2015
- [18] Clasen, C.: „Bei böigem Wind volle Kraft voraus!“ – Jute, Meshta, Kenaf: Markt- und Preistrends, 2. AVK-Fachtagung Naturfaserverstärkte Kunststoffe, Kaiserslautern, 10.05.2016
- [19] Carus, M.: European Industrial Hemp – Marktentwicklungen & Trends im Bereich Naturfaserverstärkte Kunststoffe, 2. AVK-Fachtagung Naturfaserverstärkte Kunststoffe, Kaiserslautern, 10.05.2016

- [20] Becker, N.: Weight Reduction through Natural Fiber Reinforced Plastics in Automotive Interiors. 2. AVK-Fachtagung Naturfaserverstärkte Kunststoffe, Kaiserslautern, 10.05.2016
- [21] Henning, F.; Moeller, E.: Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2011
- [22] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [23] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen – Halbzeuge und Bauweisen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996
- [24] Madsen, B.; Lilholt, H.: Physical and mechanical properties of unidirectional plant fibre composites – an evaluation of the influence of porosity. In: Composites Science and Technology, Vol. 63, 2003, S. 1265-1272
- [25] Madsen, B.; Thygesen, A.; Lilholt, H.: Plant fibre composites – porosity and stiffness. In: Composites Science and Technology. Vol. 69, 2009, S. 1057-1069
- [26] Seidlitz, H.; Siegel, C.; Hackert, A.; Kroll, L.; Wagenführ, A.: Prozessketten zur Herstellung und Integration von naturfaserverstärkten Hochleistungskunststoffen. In: Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology, Vol. 11, 2015, S. 1-24
- [27] Franke-Jordan, S.: Biobasiertes Naturfaser-Organoblech: Ein Leichtbaumaterial aus nachwachsenden Rohstoffen. Technische Universität Dresden: <http://141.30.75.25/innovation-pipeline/wp-content/uploads/2014/08/Naturfaserorganoblech.pdf>, 25.01.2017
- [28] Leppert, A.: NF/PP-Organobleche – Verarbeitung, Vorteile & Anwendungsmöglichkeiten. 2. AVK-Fachtagung Naturfaserverstärkte Kunststoffe, Kaiserslautern, 10.05.2016
- [29] Džalto, J.; Meinda, L.A.; Leppert, A.; Mitschang, P.: Natural Fibers Gently Heated – Process Optimization by the Use of Organic Sheets Made of Natural Fiber-Reinforced Polypropylene (NFPP). In: Kunststoffe International, Vol. 10, 2014, S. 110-113

- [30] Deutsche Norm DIN 60001-1: Textile Faserstoffe, Teil 1: Naturfasern und Kurzzeichen, Mai 2001
- [31] Weiss, J.; Hauf, J.; Carus, M.; Brandão, M.; Bringezu, S.; Hermann, B.; Patel, M.K.: A Review of the Environmental Impacts of Biobased Materials. In: Journal of Industrial Ecology, Vol. 16, Heft S1, 2012, 169 – 181
- [32] Mohanty, A.K.; Misra, M.; Drzal, L.: Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis Group, 2005
- [33] Müssig, J.: Industrial Applications of Natural Fibres – Structure, Properties and Technical Applications. John Wiley, Wiltshire, 2010
- [34] JEC (Hrsg.): Flax and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry. JEC Composites, Paris, 2012
- [35] Dambroth, M.; Seehuber, R.: Flachs – Züchtung, Anbau, Verarbeitung. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 1988
- [36] Dittenber, D.B.; GangaRao, H.V.S.: Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. In: Composites: Part A, Vol. 43, Heft 8, 2012, 1419-1429.
- [37] Satyanarayana, K.G.; Arizaga, G.G.C.; Wypych, F.: Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers – An overview. In: Progress in Polymer Science 34, Heft 9, 2009, S. 982-1021
- [38] Netravali, A.N.; Chabba, S.: Composites get greener. In: Materials Today, Vol. 4, 2003, S. 22-29
- [39] Eichhorn, S.J.; Baillie, C.A.; Zafeiropoulos, N.; Mwaikambo, L.Y.; Ansell, M.P.; Dufresne, A.; Entwistle, K.M.; Herrera-Franco, P.J.; Escamilla, G.C.; Groom, L.; Hughes, M.; Hill, C.; Rials, T.G.; Wild, P.M.: Review Current international research into cellulosic fibres and composites. In: Journal of Materials Science, Vol. 36, 2001, S. 2107-2131
- [40] Bos, H.L.; Müssig, J.; van den Oever, M.J.A.: Mechanical properties of short-flax-fibre reinforced compounds. In: Composites: Part A, Vol. 37, 2006, S. 1591-1604

- [41] Liu, M.; Silva, D.A.S.; Fernando, D.; Meyer, A.S.; Madsen, B.; Daniel, G.; Thygesen, A.: Controlled retting of hemp fibres: Effect of hydrothermal pre-treatment and enzymatic retting on the mechanical properties of unidirectional hemp/epoxy composites. In: *Composites: Part A*, Vol. 88, 2016, S. 253-262
- [42] Reich-Albrecht, S.: Mechanical Properties of Natural Fibre Thermoplastic Composites: Characterisation of Nettle in Comparison to Sisal, Date Palm and Flax, *naro.tech*, 7. Internationales Symposium "Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen", Erfurt, 9.-10. September 2009
- [43] Reich, S.; ElSabbagh, A.; Steuernagel, L.: Improvement of Fibre-Matrix-Adhesion of Natural Fibres by Chemical Treatment. In: *Macromolecular Symposia*, Vol. 262, Heft 1, 2008, 170-181
- [44] Sharma, H.S.S.; Faughey, G.; Lyons, G.: Comparison of Physical, Chemical, and Thermal Characteristics of Water-, Dew-, and Enzyme-Retted Flax Fibers. In: *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 74, 1999, 139-143
- [45] Ulbricht, H.; Gregor, E.: Beiträge zur Landröste von Flachs. In: *Zeitschrift für Allg. Mikrobiologie*, Vol. 3, Heft 4, 1963, S. 297-307
- [46] Scheer-Triebel, M.; Léon, J.: Industriefaser – Qualitätsbeschreibung und pflanzenbauliche Beeinflussungsmöglichkeiten bei Faserpflanzen: ein Literaturreview. In: *Pflanzenbauwissenschaften*, Vol. 4, Heft 1, 2000, S. 26-41
- [47] Reich-Albrecht, S.: Einstellen eines definierten Eigenschaftsprofils in naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffen durch chemische Modifikation der Naturfasern. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2015
- [48] Meijer, W.J.M.; Vertregt, N.; Rutgers, B.; van de Waart, M.: The pectin content as a measure of the retting and rettability of flax. In: *Industrial Crops and Products*, Vol. 4, 1995, S. 273-284
- [49] Naumenko, V.: Physikalische Eigenschaften von Hanf (*Cannabis sativa* L.) in Abhängigkeit von Bestandesentwicklung, Strohmanagement, Röste und Faseraufschluss. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle, Wittenberg, 2006

- [50] Pallesen, B.E.: The quality of combine-harvested fibre flax for industrial purposes depends on the degree of retting. In: *Industrial Crops and Products*, Vol. 5, 1996, S. 65-78
- [51] Österreichisches Institut für Bautechnik: Zulassung zur Beurteilung der Naturfaserqualität. Kontakt: Herr Dipl.-Ing Wolfgang Thoma, Referatsleiter OIB, Thoma@oib.or.at (Daten dankend erhalten am 23.01.2017)
- [52] <https://www.hanffaser.de/uckermark/index.php/uber-hanf/roestklassen>, 20.01.2017
- [53] Bluhm, C.; Müssig, J.: Ansätze zur reproduzierbaren Röstgradmessung mit dem Ziel der Bereitstellung einheitlicher Hanffasern. Themenkonferenz nova-Institut: Ermittlung von Qualifizierungsbedarf für den Hanfanbau, Bad Sassendorf, 16. April 1999
- [54] Martens, R.; Müssig, J.: Qualität von Hanffasern auf der Basis unterschiedlicher Beerntungs- und Bergetechniken. Tagungsdokumentation NRW-Hanftag, Bad Sassendorf/Ostinghausen, 28.08.1997,
- [55] Hagemeister, V.: Herleitung der Kubelka-Munk-Gleichungen aus allgemeinen Transportgleichungen – Diskussion der Parameter Absorption und Streuung. In: *Zeitschrift für Naturforschung*, Vol. 25 b, 1970, 1144-1148
- [56] Jentoft, F.: *Diffuse Reflectance IR and UV-vis Spectroscopy*, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin, 2004
- [57] Müssig, J.; Martnes, R.; Harig, H.: Der Einfluss von Ernte-, Aufbereitungs- und Verarbeitungstechnik auf die Eigenschaften hanfnadelfilzverstärkter Polymerwerkstoffe. 2nd International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 28.-29. Juni 1999
- [58] TechReport (Quint2002) Quint, B. Informationen zur Qualifizierung von Röste; Vorschlag zur Felddatenerfassung, 2002
- [59] Faruk, O.; Bledzki, A.K.; Fink, H.-P.; Sain, M.: Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. In: *Progress in Polymer Science*, Vol. 37, 2012, 1552-1596

- [60] Martínez-Hergueta, F.; Ridruejo, A.; González, C.; LLorca, J.: Deformation and energy dissipation mechanisms of needle-punched nonwoven fabrics: A multiscale experimental analysis. In: *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 64-64, 2015, S. 120-131
- [61] Lünenschloß, J.; Albrecht, W.: *Vliesstoffe*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 1982
- [62] Džalto, J.; Medina, L.A.; Mitschang, P.: Prozessoptimierung beim Einsatz von Naturfaser-Organoblechen. In: *LightweightDesign*, Vol. 3, 2014, S. 50-56
- [63] Medina, L.A.; Džalto, J.: *Natural Fibers*. In: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2017.
- [64] Gortner, F.; Medina, L.; Mitschang, P.: Optimized Bast Fiber Reinforced Polypropylene for Automotive Applications, ECCM17 – 17th European Conference on Composite Materials, München, 26.-30. Juni 2016
- [65] Merotte, J.; Bourmaud, A.; Le Duigou, A.; Baley, C.; Behloul, K.: Nonwoven biocomposites: tailor-made multifunctional materials for the automotive industry. In: *JEC Composites Magazine*, Heft 112, 2017, S. 28-30
- [66] Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Natural Aligned Fibers and Textiles in Composites for Structural Applications, 1st International Conference on Natural Fibers, 9.-11. Juni 2013, Guimarães, Portugal
- [67] Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Naturfaserverstärktes Polyfurfuryl Alkohol-Harz – Verarbeitung, Eigenschaften und Anwendung, 2. AVK-Fachtagung Naturfaserverstärkte Kunststoffe, 10. Mai 2016, Kaiserslautern
- [68] Klusmeier, W.: Faserverstärkte Bauteile im automobilen Interieur. 1. AVK-Fachtagung Naturfaserverstärkte Kunststoffe, Kaiserslautern, 4. November 2014
- [69] Mitschang, P.; Džalto, J.: Development of an Infrared Heating Method for the Processing of Natural Fiber Reinforced Polypropylene, Processing and Fabrication of Advanced Materials XXV, 22.-25. Januar 2017, Auckland, Neuseeland

- [70] El-Sabbagh, A.; Steuernagel, L.; Ziegmann, G.; Meiners, D.; Toepfer, O.: Processing parameters and characterisation of flax fibre reinforced engineering plastic composites with flame retardant fillers. In: *Composites: Part B*, Vol. 62, 2014, S. 12-18
- [71] Holbery, J.; Houston, D.: Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications. In: *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, Vol. 58, Heft 11, 2006, S. 80-86
- [72] Dorez, G.; Ferry, L.; Sonnier, R.; Taguet, A.; Lopez-Cuesta, J.-M.: Effect of cellulose, hemicellulose and lignin contents on pyrolysis and combustion of natural fibers. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 107, 2014, 323-331
- [73] Kabir, M.M.; Wang, H.; Lau, K.T.; Cardona, F.: Effects of chemical treatments on hemp fibre structure. In: *Applied Surface Science*, Vol. 276 2013, S. 13-23
- [74] Ouajai, S.; Shanks, R.A.; Hodzic, A.; Houshyar, S.: Thermogravimetric Analysis of Natural Cellulose Fibres. In: *Modern Science of Advanced Materials*, Townsville, QLD, Australia, 2004.
- [75] Fisher, T.; Hajaligol, M.; Waymack, B.; Kellogg, D.: Pyrolysis behavior and kinetics of biomass derived materials. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 62, 2002, 331-349
- [76] Brebu, M.; Vasile, C.: Thermal degradation of lignin – a review. In: *Cellulose Chemistry & Technology*, Vol. 44, Heft 9, 2010, S. 353-363
- [77] Martin, N.; Mouret, N.; Davies, P.; Baley, C.: Influence of the degree of retting of flax fibers on the tensile properties of single fibers and short fiber/polypropylene composites. In: *Industrial Crops and Products*, Vol. 49, 2013, 755-767
- [78] Summerscales, J.; Dissanayake, N.P.J.; Virk, A.S.; Hall, W.: A review of bast fibres and their composites. Part 1 – Fibres as reinforcements. In: *Composites: Part A*, Vol. 41, 2010, S. 1329-1335
- [79] Verband der Automobilindustrie: VDA 270 – Bestimmung des Geruchsverhaltens von Werkstoffen der Kraftfahrzeug-Innenausstattung. 01. Oktober 1992

- [80] Look, F.; Lampe, T.; Bahadir, M.: Examination of the emission of (semi-) volatile organic compounds from polymer materials used as interior trim materials in automobiles. In: Fresenius Journal of Analytical Chemistry, Vol. 347, 1993, S. 280-285
- [81] Yue, T.; Yue, X.; Chai, F.; Hu, J.; Lai, Y.; He, L.; Zhu, R.: Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from the evaporative emissions of modern passenger cars. In: Atmospheric Environment, Vol. 151, 2017, S. 62-69
- [82] Bledzki, A.K.; Sperber, V.E.; Wolff, S.: Möglichkeiten der Geruchsmessung und –minderung bei Naturfaserverbunden. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Vol. 34, 2003, S. 272-175
- [83] Fischer, H.; Abdulajeva, D.; Knittel, D.: Verbesserung der Geruchseigenschaften von Naturfasern in technischen Textilien und Verbundwerkstoffen. In: Technische Textilien, Vol. 3, 2009, S. 124-125
- [84] Hoppenheidt, K.: Mikrobiell bedingte Gerüche im Fahrzeuginnenraum - Ursachen und Abhilfemaßnahmen. 17. Workshop „Geruch und Emissionen bei Kunststoffen“, Kassel, 16.-17. März 2015
- [85] TITK – Ursachen und Beeinflussung der Emissionen von naturfaserverstärkten Composites, 6. Workshop „Geruch und Emissionen bei Kunststoffen“, Kassel, 29.-30. März 2004
- [86] Fischer, H.; Gerardi, H.; Knittel, D.; Antonov, V.: Removal of odour from bast fibres in industrial scale by chemical and enzymatic treatment. In: 15th International Conference “Structure and Structural Mechanics of Textiles”, Liberec, Tschechische Republik, Dezember 2008
- [87] Khan, M.A.; Rahaman, M.S.; Islam, J.M.M.: Odor of Natural Fibers: Sources, Chemistry and Possible Remedy by Radiation. 17. Workshop “Geruch und Emissionen bei Kunststoffen”, Kassel, 16.-17. März 2015
- [88] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen – Fasern und Matrices. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1995
- [89] Campbell, F.C.: Manufacturing Processes for Advanced Composites. Elsevier Ltd., Oxford, 2004

- [90] Zepf, H.-P.; Baron, C.; Börger, H.; Breuer, U.; Hinz, B.; Kempe, G.; Lücke, A.; Ostgathe, M.; Sprenger, H.; Ziegmann, G.: Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix – Hochleistungswerkstoffe für rationelle Verarbeitung. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1997
- [91] Böckh, P.; Wetzel, T.: Wärmeübertragung – Grundlagen und Praxis. Springer Vieweg, 5. Auflage, Karlsruhe, 2014
- [92] Tipler, P.A.; Mosca, G.: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Spektrum Akademischer Verlag, 2009
- [93] Meschede, D.: Gerthsen Physik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [94] Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen: VDI-Wärmeatlas. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [95] Williams, D.; Brown, M.: Xenon Flashlamp Heating for Automated Fibre Placement. 3rd International Symposium on Automated Composites Manufacturing, Montreal (Kanada), 20.-21. April 2017
- [96] Potente, H.: Fügen von Kunststoffen – Grundlagen, Verfahren, Anwendung. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004
- [97] Schubert, C.; Friedrich, S.; Clauß, B.; Nendel, K.; Gehde, M.: Grundlagenuntersuchung zum Heizelementschweißen von WPC. Proceedings TECHNO-MER Kunststofftagung, Chemnitz, 14.-15. November 2013
- [98] Hemmen, A.: Direktbestromung von Kohlenstofffasern zur Minimierung von Zykluszeit und Energieaufwand bei der Herstellung von Karbonbauteilen. Dissertation, Universität Augsburg, 2016
- [99] Bhattacharyya, D.: Composite Sheet Forming. Elsevier Science, Amsterdam, 1997
- [100] Gaab, L.: Optimierung der Heizprozesse von CFK- und GFK-Strukturen mit Infrarot-Strahlung. In: LightweightDesign, Nr. 2, 2013, S. 50-53
- [101] Siebenpfeiffer, W.: Leichtbau-Technologien im Automobilbau. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

- [102] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [103] Sock, A.; Egger, P.: Hybridteillfertigung – Organobleche verlassen das Hochpreissegment. In: Maschinenmarkt, Februar 2011, S. 12-15
- [104] Langeheinecke, K.; Jany, P.; Thieleke, G.: Thermodynamik für Ingenieure – Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [105] Baehr, H.D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998
- [106] Schwarzmann, P.: Halbzeuge aufheizen – womit und wie? Methoden zum Aufheizen von Halbzeugen. In: Kunststoffe, Vol. 3, 2015, S. 104-108
- [107] Stahl, K.; Miosga, G.: Infrarottechnik – Grundlagen, Strahlungssender und Detektoren, Infrarotbildaufnahmen und -wiedergabe, Fernmeßverfahren; Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1986
- [108] Krobjilowski, A.: Prozess- und Produktoptimierung beim Formpressen naturfaserverstärkter thermoplastischer Verbundwerkstoffe. Dissertation, Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen, 2003
- [109] Paus, H.J.: Physik in Experimenten und Beispielen. Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [110] Schwarzmann, P.: Heating of Intermediates – How and with What? The Common IR Radiators at a Glance. In: Kunststoffe International, Heft 1-2, 2015, S. 52-54
- [111] Heraeus Noblelight GmbH: Infrarot-Wärme für die Kunststoffverarbeitung. Firmenbroschüre, Kleinostheim, 2014
- [112] Jordi, H.: Mittelwellige IR-Strahler für die schnelle und schonende Erwärmung von verschiedenen Produkten. Allgemeine Produktpräsentation, Krelus AG, Oberentfelden 2012

- [113] Webbook National Institute of Standards and Technology, Material Measurement Laboratory: Dioxosilane IR spectrum, <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7631869&Type=IR-SPEC&Index=4>, 14.04.2017
- [114] Rattke, M.; Natrop, J.: Infraroterwärmung in der Kunststoffschweißtechnik. Sonderdruck aus: Joining Plastics, Fügen von Kunststoffen, Heft 1, 2007, S. 57-63
- [1] Saechtling, H.: Kunststoff-Taschenbuch. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1979
- [1] J. H. Ziegler GmbH: Verarbeitungsempfehlung für Naturfaser-Organoblech-Halbzeuge: HACOsol® N, 10.03.2016
- [2] Sexton, C.W.: Infrared Spectroscopic Study of Polyimide Film Degradation. Ball State University, Muncie, 2009
- [3] Alpert, N.L.; Keiser, W.E.; Szymanski, H.A.: IR – Theory and Practice of Infrared Spectroscopy. Plenum Press, New York, 1970
- [4] Günzler, H.; Gremlich, H.-U.: IR-Spektroskopie – Eine Einführung. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2003
- [5] Manaila, E.; Stelescu, M.D.; Craciun, G.; Surdu, L.: Effects of benzoyl peroxide on some properties of composites based on hemp and natural rubber. In: Polymer Bulletin, Vol. 71, 2014, S. 2001-2022
- [121] Howell, J.R.: A catalog of radiation configuration factors. McGraw-Hill, 1982
- [122] BENZ GmbH & Co. KG Baustoffe: Leitfaden Ökologische Dämmstoffe – Grüne Baustoffe für mehr Nachhaltigkeit, 2015
- [123] Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Volumetric interaction and material characterization of flax/furan bio-composites, International Journal of Applied Science and Technology, Vol. 7, Heft 1, 2014, S. 11-21
- [124] Keller HCW GmbH: Grundlagen der Infrarot-Temperaturmessung. 11.05.2011
- [125] Jordi, H.: Emissionsverhalten der RELUS IR-Strahler. Firmenbroschüre, 2012

- [126] Schulz, H.; Matthes, B.: Methoden zur Bestimmung der Emissionen aus Materialien für den Fahrzeuginnenraum. FILK – Forschungsinstitut für Leder- und Kunststoffbahnen: http://www.filkfreiberg.de/fileadmin/user_upload/Emissionsmessmethoden.pdf 18.04.2017


9 Anhang

| Merkmal | Röstgrad (Boniturnote) | | | | | | |
|---|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|---|-------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Epidermis-Färbung | Grün-hellgrün-gelb | Gelb-gelbbraun | Hellbraun-mittelbraun | Braun | Braun | Nicht sichtbar | Nicht sichtbar |
| Anteil und Färbung der Pilzkolonien | 0-5 % hellgrau | 5-50 % hellgrau | 60-70 % hellgrau-mittelgrau | 80-90 % mittelgrau | > 90 % mittel-dunkelgrau | 100 % dunkelgrau-schwarz | 100 % dunkelgrau-schwarz |
| Färbung des Holzteils | Hellgrün-hellbeige | Hellbeige | Hellbeige | Hellbeige | Beige | Beige | Nicht sichtbar |
| Anteil und Färbung der Pilzkolonien an der Holzoberfläche | Nicht sichtbar | 0-5 % hellsilber | 0-10 % hellsilber | 10-40 % hellsilber | 40-70 % hellgrau-grau, rot | 70-90 % hellgrau-grau, rot | 100 % schwarz |
| Verbindung zwischen Rinde und Holz | Rinde manuell sehr schwer ablösbar | Rinde manuell schwer ablösbar | Rinde manuell schwer ablösbar | Rinde manuell leicht ablösbar | Rinde manuell leicht ablösbar, bis 20 % selbstablösend | Rinde manuell leicht ablösbar, bis 20-60 % selbstablösend | Rinde 60-100 % selbstablösend |

Abbildung 9.1: Boniturskala nach Schurig-Kocurek [49]

Tabelle 9.1: Zusammenhang zwischen Leistung und Strahlertemperatur

| Leistung in % | Strahlertemperatur in °C | Wellenlänge in µm | Fehler Gerät in °C | Fehler Sensor in °C | Fehler Messung in °C | Fehler gesamt in °C |
|---------------|--------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 0 | 23 | 9,78 | 2,48 | 2,22 | 0,00 | 4,70 |
| 10 | 165 | 6,61 | 3,19 | 3,29 | 45,40 | 51,88 |
| 20 | 294 | 5,11 | 3,84 | 4,25 | 16,00 | 24,09 |
| 30 | 391 | 4,36 | 4,32 | 4,98 | 9,00 | 18,30 |
| 40 | 481 | 3,84 | 4,77 | 5,66 | 18,00 | 28,43 |
| 50 | 572 | 3,42 | 5,24 | 6,36 | 9,00 | 20,60 |
| 60 | 642 | 3,17 | 5,58 | 6,86 | 12,00 | 24,44 |
| 70 | 705 | 2,96 | 5,89 | 7,34 | 12,00 | 25,23 |
| 80 | 765 | 2,79 | 6,19 | 7,79 | 10,00 | 23,98 |
| 90 | 816 | 2,66 | 6,45 | 8,17 | 3,00 | 17,61 |
| 100 | 842 | 2,60 | 6,58 | 8,36 | 4,00 | 18,94 |

|  | | TECHNICAL DATA SHEET FIBRES | | | ID NR: F_PM_D004 Version: T Versiondate document: 06/01/2010 page: 1/1 |
|---|---------------|--|------------|-------------------------------------|---|
| DATE OF ISSUE TDS: | | 06/09/2012 | | | |
| CUSTOMER: | | [REDACTED] | | | |
| PRODUCT CODE: | | PP =006,7 I0000 =036C040S Cd S4 R3 T3 E3/A1 (0046785) | | | |
| Property | Value | Unit | Tolerances | Test method | |
| Raw Material | Polypropylene | | | | |
| Softening Point | 140 | °C | | | |
| Melting Point | 160 | °C | | | |
| Density | 0,91 | g/cm ³ | | | |
| Dtex | 6,7 | g/10000m | +/- 15% | ISO 1973 | |
| Length | 36C / 40S | mm | +/- 15% | DIN 53808 | |
| Fibre Cross Section | Round | | | | |
| Crimp | 3,5 | curves/cm | +/- 0,5 | ASTM D-3937 | |
| Spinfinish Content | 0,65 | % | +/- 0,20 | NMR (nuclear molecularir resonance) | |
| Rest Shrinkage | 3 | % | +/- 1% | ASTM 0-5104-02 | |
| Tenacity | 30 | cN/tex | +/- 20% | ISO 5079 | |
| Elongation | min. 100 | % | | ISO 5079 | |
| Durability-Performance Level | Level A1 | Agreed durability level to meet customer product certification | | | Customer related |

The information contained in this document is based on testing carried out by our laboratory or external research institutes and literature data, and based on Mean Values. To the best of our knowledge and at the time of publication, this information is true and accurate. It shall however, in no event be held to constitute or imply warranty undertaking express or implied commitment from the part of Beaulieu International Group - Division Yarns & Division Fibres. No liability whatsoever can be accepted by Beaulieu International Group - Division Yarns & Division Fibres with regard to the handling, processing or use of the product concerned which must in all cases be used in accordance with all applicable laws and regulations.

Beaulieu Fibres International

TDS_0_0046785_2012_09_06_15_07_14_4581

Abbildung 9.2: Technisches Datenblatt Polypropylen-Schmelzfasern

Tabelle 9.2: Berechnung der Porositätsgehalte und dazugehörigen Wärmeleitfähigkeiten der NFOB verschiedener Dicken und Flächengewichte

| Dicke | Flächengewicht in g/m ² | Dichte in g/cm ³ | Anteil PP Vol.-% | Anteil NF Vol.-% | Porosität Vol.-% | in W/(mK) |
|-------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| 2 mm | 1000 | 0,45 | 0,25 | 0,15 | 0,60 | 0,01799 |
| | 1200 | 0,57 | 0,32 | 0,19 | 0,49 | 0,01998 |
| | 1500 | 0,66 | 0,37 | 0,22 | 0,41 | 0,02179 |
| | 1700 | 0,74 | 0,41 | 0,25 | 0,34 | 0,02370 |
| 3 mm | 1000 | 0,31 | 0,17 | 0,10 | 0,72 | 0,01075 |
| | 1200 | 0,37 | 0,21 | 0,12 | 0,67 | 0,01125 |
| | 1500 | 0,46 | 0,26 | 0,15 | 0,59 | 0,01210 |
| | 1700 | 0,50 | 0,28 | 0,17 | 0,56 | 0,01252 |
| 4 mm | 1200 | 0,29 | 0,16 | 0,10 | 0,74 | 0,00794 |
| | 1500 | 0,35 | 0,19 | 0,12 | 0,69 | 0,00831 |
| | 1700 | 0,38 | 0,21 | 0,13 | 0,66 | 0,00850 |

Betreute studentische Arbeiten

Tonkinson, Maria: Vergleich unterschiedlicher Fügeverfahren für naturfaserverstärkte Thermoplaste. IVW-Bericht 13-056, 2013

Seibt, Frieder; Foltinek, Gordon: Untersuchungen zur Infraroterwärmung mit anschließender Verarbeitung naturfaserverstärkter Thermoplaste. IVW-Bericht 13-057, 2013

Barz, Heinrich: Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften und des physikalischen Verhaltens von biobasierten Kork-Polymer-Composites. IVW-Bericht 13-086, 2013

Weiland, Mario: Induktives Fügen von naturfaserverstärkten Thermoplasten und Metallen. IVW-Bericht 14-024, 2014

Linster, Dominik: Modifizierung des Plattenwerkzeugs auf der Intervallheißpresse. IVW-Bericht 14-036, 2014

Kempf, Kirsten: Einfluss der Prozessparameter bei der presstechnischen Verarbeitung naturfaserverstärkter Biopolymere. IVW-Bericht 14-052, 2014

Ackermann, Adrian: Lokale Verstärkung naturfaserverstärkter Polymere auf Grundlage der Tapelege-Technik. IVW-Bericht 14-091, 2014

Felder, Simon: Untersuchung der Permeabilität von Naturfaservliesen mit unterschiedlicher Vernadelungsdichte. IVW-Bericht 15-008, 2015

Bauer, Manuela; Polster, Pascal: Untersuchung verschiedener Furanharzsysteme im Hinblick auf ihre Eignung als Matrix in naturfaserverstärkten Kunststoffen. IVW-Bericht 15-023, 2015

Kohler, Fabian: Vergleich unterschiedlicher Messmethoden zur Bestimmung der Dichte von naturfaserverstärkten Materialien. IVW-Bericht 16-005, 2016

Mischo, Florian: Analyse unterschiedlicher Aufheizzyklen bei der Erwärmung naturfaserverstärkter Thermoplaste mittels IR-Strahlung. IVW-Bericht 16-006, 2016

Kinsvater, Andreas: Untersuchung der Naturfaserbestandteile im Hinblick auf die Infrarot-Erwärmung von Naturfaser-Organoblechen. IVW-Bericht 16-022, 2016

Schubert, Maximilian: Optimierung der optischen Temperaturmessung an der Oberfläche von Naturfaser-Organoblechen. IVW-Bericht 16-027, 2016

Lönne, Martje: Einfluss der chemischen Zusammensetzung von Bastfasern auf das Absorptionsvermögen von Strahlung im mittelwelligen Infrarotbereich. IVW-Bericht 16-042, 2016

Henn, Michael: Konstruktion einer beweglichen Vorrichtung zur Aufnahme von zwei bestehenden Infrarot-Strahlern. IVW-Bericht 16-052, 2016

Reichling, David: Simulation der Umformung von Naturfaser-Organoblechen, IVW-Bericht 16-083, 2016

Lönne, Martje: Modellierung der Infrarot-Erwärmung naturfaserverstärkter Polymere. IVW-Bericht 16-094, 2016

Publikationen

Fachbücher

Medina, L.; Džalto, J.: Natural Fibers. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier, 2017

Zeitschriften

Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Biobased composite – sandwiches for automotive applications, Bioplastics Magazine Vol. 10, Heft 01, 2015, S. 16-18

Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Natural fibers gently heated, Kunststoffe International Heft 10, 2014, S. 110-113

Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Naturfasern sanft erwärmt, Kunststoffe Heft 10, 2014, S. 194-198

Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Prozessoptimierung beim Einsatz von Naturfaser-Organoblechen, Lightweight Design Heft 3, 2014, S. 50-56

Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Volumetric interaction and material characterization of flax/furan bio-composites, International Journal of Applied Science and Technology, Vol. 7, Heft 1, 2014, S. 11-21

Holschuh, R.; Džalto, J.; Becker, D.; Mitschang, P.: Load-related locally reinforced hybrid structures. In: JEC Composites Magazine, Vol. 81, 2013, S. 64-68

Symposien und Konferenzbeiträge

Džalto, J.; Mitschang, P.; Gortner, F.: Neue Konzepte zur Verarbeitung von naturfaserverstärkten Kunststoffen, 4a Technologietag Leichtbau und Composites, 23.-24. März 2017, Schladming, Österreich

Mitschang, P.; Džalto, J.: Development of an Infrared Heating Method for the Processing of Natural Fiber Reinforced Polypropylene, Processing and Fabrication of Advanced Materials XXV, 22.-25. Januar 2017, Auckland, Neuseeland

- Džalto, J.; Mitschang, P.; Medina, L.: Biocomposites für strukturelle Anwendungen im Bauwesen, CC Tudalit-AG „Modellierung Faserverstärkung im Bauwesen“, 27. Oktober 2016, Kaiserslautern
- Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Naturfaserverstärktes Polyfurfuryl Alkohol-Harz – Verarbeitung, Eigenschaften und Anwendung, 2. AVK-Fachtagung Naturfaserverstärkte Kunststoffe, 10. Mai 2016, Kaiserslautern
- Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: High performance biocomposites for structural applications in the building industry, 9th Aachen-Dresden International Textile Conference, 26.-27. November 2015, Aachen
- Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Processing of High Performance Biocomposites for the Use in the European Building Industry, 20th International Conference on Composite Materials (ICCM20), 19.-24. Juli 2015, Kopenhagen, Dänemark
- Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Neue Entwicklungen im Bereich Naturfasern für Automobilanwendungen, CC Südwest Thementag Biocomposites, 07. Juli 2015, Kaiserslautern
- Medina, L.; Džalto, J.: Prozessoptimierung beim Einsatz von Naturfaser-Organoblechen in der Automobilindustrie, 1. AVK-Fachtagung Naturfaserverstärkte Kunststoffe - Anwendungen, Innovationen & Trends, 04. November 2014, Kaiserslautern
- Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Use of Aligned Natural fibers and Bio-Polymers for structural applications in the building industry, naro.tech, 10th International Symposium “Materials made of Renewable Resources”, 16.-17. September 2014, Erfurt
- Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Biocomposites für strukturelle Anwendungen im Bauwesen, 1. Sitzung der CCeV AG “Composites mit Verstärkungsfasern aus nachwachsenden Rohstoffen”, 1. April 2014, Kaiserslautern
- Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Comparison of different Joining Methods for Natural Fiber Reinforced Thermoplastic Polymers, V International Seminar Biopolymers and Sustainable Composites, 05.-08. März 2014, Valencia, Spanien

Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Natural Aligned Fibers and Textiles in Composites for Structural Applications, 1st International Conference on Natural Fibers, 9.-11. Juni 2013, Guimarães, Portugal

Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Natural Aligned Fibers and Textiles for Structural Applications in the Building Sector, 10th International Conference of the European Industrial Hemp Association (EIHA), 22.-23. Mai 2013, Wesseling

Holschuh, R.; Džalto, J.; Mitschang, P.: Impact of the manufacturing process of locally load-related reinforced composites on the interface behavior, 19th International Conference on Composite Materials (ICCM 19), 28.07.-02.08.2013, Montréal, Kanada

Poster

Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: Investigation of the Infrared Heating of Natural Fiber Reinforced Thermoplastic Materials. 16th European Conference on Composite Materials, 26.-30. Juni 2016, München

Džalto, J.; Medina, L.; Mitschang, P.: BioBuild: High-Performance, Economical and Sustainable Biocomposite Building Materials, 10th Congress for Biobased Materials, Natural Fibres and WPC, 24.-25. Juni 2014, Stuttgart/Fellbach

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Jovana Džalto

Beruf

10/2017 – heute Rhenoflex GmbH, Ludwigshafen
Entwicklerin, Bereich R&D

07/2012 – 06/2017 Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern
Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich
Verarbeitungstechnik

Studium

10/2005 – 06/2012 Technische Universität Kaiserslautern
Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Vertiefungsrichtung
Werkstofftechnik und Verbundwerkstoffe
Abschluss: Dipl.-Ing.

Praktika

09/2010 – 03/2011 STABILUS GmbH, Koblenz

02/2008 PFAFF Industrie Maschinen AG, Kaiserslautern

05/2005 – 07/2005 CROWN Zeller Engineering GmbH, Zell

Schulausbildung

08/2001 – 03/2005 Martin-von-Cochem-Gymnasium, Cochem
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife