

# Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisions-Schalungen aus 100 % recycelbaren Industrie-Wachsen zur Herstellung von geometrisch komplexen Beton-Bauteilen | Non-Waste-Wax-Formwork: Novel precise formwork-technology on basis of 100% recyclable industrial wax for the fabrication of geometrically complex concrete elements

- ▶ Sarah Baron<sup>1</sup>, Jeldrik Mainka<sup>2</sup>, Hans Werner Hoffmeister<sup>1</sup>, Klaus Dröder<sup>1</sup>, Harald Kloft<sup>2</sup>
- ▶ <sup>1</sup> Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), TU Braunschweig
- ▶ <sup>2</sup> Institut für Tragwerksentwurf (ITE), TU Braunschweig

## 1 Einleitung

Die neuen 3D-Entwurfs-, Berechnungs- und Fertigungsverfahren in Kombination mit dem Werkstoff ultrahochfester Beton (UHPC) bieten das Potenzial, den Beton-Leichtbau zu revolutionieren [1]. Die Herausforderung bei der Herstellung von geometrisch komplexen und hochpräzisen UHPC-Bauteilen liegt dabei im Schalungsbau. Da bisher keine verfügbaren abfallfreien und somit nachhaltigen alternativen Schalungsmaterialien bzw. -systeme identifiziert werden konnten, wurde der Forschungsansatz entwickelt, frei geformte Schalungen für Betonbauteile unter Verwendung von CNC-gefrästen recycelbaren Industriewachsen zu verwenden. Die Erforschung dieses Ansatzes hin zu einer anwendbaren *Non-Waste*-Schalungstechnologie wurde in einem gemeinsamen Forschungsprojekt des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) und des Instituts für Tragwerksentwurf (ITE) der TU Braunschweig durchgeführt.

Im Folgenden werden die wesentlichen Inhalte des Vorhabens, ausgehend von der Auswahl

## 1 Introduction

The new 3D design, calculation and manufacturing methods in combination with ultra-high strength concrete (UHPC) offer the potential to revolutionise lightweight concrete construction [1]. The challenge in the production of geometrically complex and high-precision UHPC components lies in formwork construction. As no available waste-free and thus sustainable alternative formwork materials or systems have been identified so far, the research approach was developed to use freely shaped formwork for concrete components using CNC-milled recyclable industrial waxes. The research of this approach towards an applicable non-waste formwork technology was carried out in a joint research project of the Institute for Machine Tools and Production Engineering (IWF) and the Institute of Structural Design (ITE) of the Technical University of Braunschweig.

In the following, the main contents of the project, starting with the selection of suitable waxes, the investigation of machinability up to

geeigneter Wachse, über die Untersuchung der Zerspanbarkeit bis hin zur Betonierung und anschließenden Analyse der Schalungen und Abgüsse, vorgestellt und diskutiert. Grundlegende Erkenntnisse wurden u. a. bereits 2016 in [2]–[5] veröffentlicht. Diese werden hier teilweise wiedergegeben und zudem mit zusätzlichen Informationen ergänzt. Die wesentlichen Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben werden zusammengefasst. Ausführliche Informationen zur Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie finden sich in der 2019 veröffentlichten Dissertation von Jeldrik Mainka [6].

## 2 Physikalisch-technische Eigenschaften des ausgewählten ConFormWax

Zur Auswahl eines geeigneten Wachses für die Non-Waste-Schalungstechnologie wurden in Vorversuchen am ITE insgesamt 28 verschiedene technische Wachse hinsichtlich ihrer Zerspanbarkeit untersucht. Die Zerspanversuche wurden auf einer dreiachsigen CNC-Fräsmaschine durchgeführt und ergaben eine Einordnung der Wachse in drei Kategorien: spröde, ölig/klebrig und gut zerspanbar. Für die zehn Wachse mit guter Zerspanbarkeit und einem Schmelzpunkt von 60 °C bis 120 °C wurden weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der folgenden physikalisch-technischen Eigenschaften durchgeführt:

- Druck-, Biege- und Zugfestigkeit,
- E-Modul,
- Zeitstandfestigkeit / Kriechen,
- temperaturabhängiges Dehnungsverhalten bzw. Volumenänderung,
- Differenzkalorimetrie (DSC, Messung der aufgenommenen Wärmemenge),
- Dynamisch-mechanische Analyse (DMA, temperaturabhängige Änderung des E-Moduls),
- Wärmeleitfähigkeit.

Als Ergebnis der Voruntersuchungen wurden zwei Wachse mit vergleichbarem Schmelzpunkt ( $T_S \approx 60$  °C) für die weiterführenden Untersuchungen zur Zerspanbarkeit von Industriewa-

the concreting and subsequent analysis of the formwork and castings are presented and discussed. Basic findings have already been published in 2016 in [2]–[5]. These are partly reproduced here and supplemented with additional information. The main findings of the research project are summarised. Detailed information on the development of non-waste wax formwork technology can be found in the dissertation by Jeldrik Mainka [6], published in 2019.

## 2 Physical and technical properties of the selected ConFormWax

Based on these requirements 28 different waxes were chosen and tested in preliminary tests regarding their machinability (millability) using a triaxial CNC-milling machine. By this, the waxes could be classified in three categories: brittle, soft/sticky and excellent milling ability. The following experiments, in parts already published in Mainka et al. [3], were conducted with the 10 waxes with an excellent milling ability and a fusion point between 60 and 120 °C:

- Compressive, bending and tensile strength,
- Elastic modulus,
- Creep rupture strength/creep,
- Temperature-dependent expansion behaviour or volume change,
- Differential calorimetry (DSC, measurement of the amount of heat absorbed),
- Dynamic mechanical analysis (dependency of the elastic modulus on the temperature),
- Thermal conductivity.

As a result of the preliminary investigations, two waxes with comparable melting points ( $T_S \approx 60$  °C) were selected for further investigations into the machinability of industrial waxes. The wax ConFormWax (CFW) from Wachs- & Ceresin-Fabriken Th. C. Tromm GmbH, Cologne, was found to be more suitable for use as a formwork material due to its higher elasticity than the wax with the designation PW 3146 from ROMONTA GmbH, Arnsdorf. The physical and technical properties of CFW are explained below.

chen ausgewählt. Das Wachs ConFormWax (CFW) der Firma Wachs- & Ceresin-Fabriken Th. C. Tromm GmbH, Köln, zeigte auf Grund seiner höheren Elastizität gegenüber dem Wachs mit der Bezeichnung PW 3146 der ROMONTA GmbH, Arnsdorf, die insgesamt bessere Eignung als Schalungsmaterial. Im Folgenden werden die physikalisch-technischen Eigenschaften von CFW erläutert.

In Bezug auf den hypothetischen hydrostatischen Frischbetondruck am Fußpunkt einer 10 m hohen Betonsäule von etwa 0,25 N/mm<sup>2</sup> wird die in den Versuchen ermittelte Druckfestigkeit von CFW für die Anwendung als Schalungsmaterial auch bei hohen Bauteilen bis zu einer Gebrauchstemperatur von 40 °C als ausreichend erachtet. Wie in Bild 1 dargestellt, zeigt CFW unter Druckbeanspruchung ein elasto-plastisches Verhalten. Bei der angenommenen standardmäßigen Gebrauchstemperatur von 20 °C erreicht CFW eine Druckfestigkeit von etwa 2,3 N/mm<sup>2</sup> bei 1 % Stauchung und einen E-Modul von etwa 2000 N/mm<sup>2</sup> (E-Module ermittelt zwischen 0,15 N/mm<sup>2</sup> und 1,05 N/mm<sup>2</sup>). Obwohl die Festigkeit des Wachses stark von der Temperatur abhängig ist und bei Zunahme der Temperatur über 20 °C, beispielsweise aufgrund von Sonneneinstrahlung oder Hydratationswärme, abnimmt, erreicht CFW bei 40 °C immer noch eine als ausreichend anzusehende Druckfestigkeit von etwa 0,5 N/mm<sup>2</sup> bei 1 % Stauchung.

Bei dem im Forschungsprojekt verwendeten UHPC (Typ Dyckerhoff Nanodur) ist die Entwicklung der Hydratationswärme quantitativ zwar entsprechend hoch, beginnt aber erst 18 h nach dem Guss mit einem Temperaturpeak nach etwa 26 h. Da UHPC zu diesem Zeitpunkt bereits eine Grünstandfestigkeit (Reduzierung des horizontalen Frischbetondrucks) aufweist, ist ein Erweichen des Wachses aufgrund der Hydratationswärme und somit eine Beeinflussung der Form des Betonbauteils nicht zu erwarten.

Weitere relevante Einflussgrößen sind die thermischen Eigenschaften der Wachse. Insbesondere die temperaturabhängige Volumenänderung (Phasenübergang vom flüssigen zum festen Zu-

With regard to the hypothetical hydrostatic fresh concrete pressure at the base of a 10 m high concrete column of approximately 0.25 N/mm<sup>2</sup>, the compressive strength of CFW determined in the tests is considered sufficient for use as a formwork material, even with high components up to a service temperature of 40 °C. As shown in Fig. 1, CFW shows elasto-plastic behaviour under compressive stress. At the assumed standard service temperature of 20 °C, CFW achieves a compressive strength of about 2.3 N/mm<sup>2</sup> at 1% compression and a modulus of elasticity of about 2,000 N/mm<sup>2</sup> (moduli of elasticity determined between 0.15 N/mm<sup>2</sup> and 1.05 N/mm<sup>2</sup>). Although the strength of the wax is strongly dependent on temperature and decreases with an increase in temperature above 20 °C, for example due to solar radiation or heat of hydration, CFW still achieves a compressive strength of about 0.5 N/mm<sup>2</sup> at 1% compression at 40 °C, which can be regarded as sufficient.

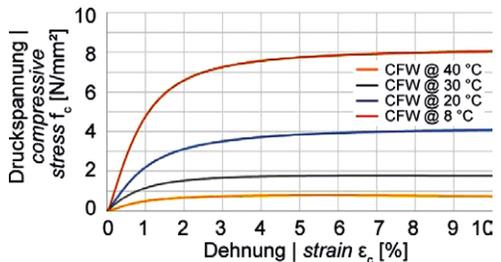


Bild 1: Einachsige Zylinderdruckfestigkeit von CFW-Wachs bei 8, 20, 30 und 40 °C | Fig. 1: Uniaxial cylinder compressive strength of CFW wax at 8, 20, 30 and 40 °C

In the UHPC (type Dyckerhoff Nanodur) used in the research project, the development of the heat of hydration is quantitatively correspondingly high, but does not begin until 18 h after casting with a temperature peak after about 26 h. Since UHPC already exhibits green strength at this point (reduction of the horizontal fresh concrete pressure), a softening of the wax due to the heat of hydration and thus an influence on the shape of the concrete component is not to be expected.

Further relevant influencing factors are the thermal properties of the waxes. In particular,

stand) sollte möglichst gering sein, da sonst während der Abkühlung und Erstarrung des Wachses Verformungen, innere Spannungen oder Risse entstehen. Das Wachs CFW zeigt hier zwischen seinem festen Zustand bei einer Temperatur von 20 °C und dem geschmolzenen Zustand bei etwa 80 °C eine Volumenänderung von rund 12 Vol.-%. Da diese temperaturabhängige Volumenänderung zu hoch ist, um große Wachsböcke in einem Stück zu gießen, hat es sich als zielführend herausgestellt, beim Heißguss bereits erkaltete Wachs-Füllkörper aus CFW in den zu gießenden Wachsböcke zu integrieren. Hierzu werden, wie in Bild 2 dargestellt, kalte Wachstafeln in regelmäßigen Abständen in der Form positioniert und mit heißem Wachs zu nahezu beliebig großen Wachsböcken vergossen. Es konnten somit große und homogene Wachsböcke aus CFW gefertigt werden, ohne dass die Vergussflächen eine Schwächung des Materials darstellen.

Damit die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie nicht nur ökologisch sinnvoll, sondern auch aus ökonomischen Gesichtspunkten erfolgreich ist, müssen die Materialkosten des Wachses je Einsatz  $WAX_{JE}$  nach Gl. (1) mindestens unter den Einweg-Schalungsmaterialkosten von EPS (40 kg/m<sup>3</sup>) von etwa 130 €/m<sup>3</sup> (brutto) liegen.

$$WAX_{JE} \left[ \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = \frac{WAX_{inv}}{WAX_{wvr}} + E_{Schm} \quad (1)$$

Die Schmelzenergiekosten  $E_{Schm}$  je m<sup>3</sup> CFW-Wachs und Aufschmelzvorgang wurden dabei auf Basis der in den dynamischen Differenzkalorimetriemessungen ermittelten Schmelzenergie von 120 J/g zu etwa 13,78 €/m<sup>3</sup> (brutto) berechnet. Die Materialkosten  $WAX_{inv}$  des CFW-Wachses sind rohstoffabhängig und lagen laut Hersteller Anfang 2018 bei 4.951 €/m<sup>3</sup> (brutto). Hieraus berechnet sich eine Nutzenschwelle (*break-even point*) des CFW-Wachses gegenüber EPS bei einer Wiederverwendungsrate  $WAX_{wvr}$  von mindestens 75 Zyklen.

Zusammenfassend lässt sich zum Wachs CFW festhalten, dass dieses den physikalisch-technischen Anforderungen an ein Schalungs-

the temperature-dependent change in volume (phase transition from liquid to solid state) should be as low as possible, otherwise deformations, internal stresses or cracks will occur during cooling and solidification of the wax. The CFW wax shows a volume change of about 12% by volume between its solid state at a temperature of 20 °C and the molten state at about 80 °C. Since this temperature-dependent change in volume is too high to cast large wax blocks in one piece, it has proved to be expedient to integrate wax fillers of CFW, which have already cooled during hot casting, into the wax block to be cast. For this purpose, as shown in Fig. 2, cold wax slabs are positioned in the mould at regular intervals and cast with hot wax to form wax blocks of almost any size. Thus large and homogeneous wax blocks could be produced from CFW without the casting surfaces weakening the material.



**Bild 2:** Vergießen von Kaltwachs-Tabletten mit Heißwachs zu Wachsböcken (links), abgekühlter Wachsböcke (rechts) | **Fig. 2:** Grouting of cold wax tablets with hot wax to wax blocks (left), cooled off wax block (right)

To ensure that the non-waste wax formwork technology is not only ecologically sensible but also successful from an economic point of view, the material costs of the wax per  $WAX_{JE}$  application must be at least below the disposable formwork material costs of EPS (40 kg/m<sup>3</sup>) of about 130 €/m<sup>3</sup> (gross) according to Equation (1).

$$WAX_{JE} \left[ \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = \frac{WAX_{inv}}{WAX_{wvr}} + E_{Schm} \quad (1)$$

The melting energy costs  $E_{Schm}$  per m<sup>3</sup> CFW wax and melting process were calculated on the basis of the melting energy of 120 J/g determined in the dynamic differential calorimetry meas-

material für frei geformte Betonbauteile genügt und gegenüber den bisher verwendeten Einweg-Schalungsmaterialien wie EPS und XPS nicht nur hinsichtlich der Festigkeit bei 20 °C, sondern auch hinsichtlich seiner Materialkosten eine sinnvolle Alternative darstellt.

### 3 Zerspanung von Industrieglaxen

Die Untersuchungen zur spanenden Bearbeitbarkeit der ausgewählten Industrieglaxe CFW und PW 3416 erfolgten an Wachsblöcken mit den Abmessungen 300 mm × 300 mm × 80 mm, die zur besseren Positionierbarkeit auf den Bearbeitungsmaschinen auf einer Holzplatte fixiert wurden. Diese Geometrie stellt sowohl eine gute Handhabbarkeit als auch die Möglichkeit des modularen Aufbaus größerer Geometrien sicher. Die von ITE bereitgestellten direkt gegossenen Wachsblöcke besitzen im Anlieferungszustand eine gussraue konkave Oberfläche mit zum Teil auftretenden Schwundrissen (CFW) bzw. Poren (PW 3416). Dies ist auf das Verfestigen des Waxes zurückzuführen bzw. beim Werkstoff PW 3416 auf Luftpinschlüsse beim schmelzflüssigen Mischen der Bestandteile. Zur Sicherstellung einer definierten Ausgangsoberfläche wurden alle Wachsblöcke vor Beginn der eigentlichen Untersuchungen plangefäst.

#### 3.1 Voruntersuchungen auf einem 3-Achs-Bearbeitungszentrum

Zunächst wurden grundlegende Untersuchungen auf einem 3-Achs-Bearbeitungszentrum der Fa. IMA (Typ: bima 280 quadroform) durchgeführt. Die vertikale Bohr- und Fräsmaschine ist ein CNC-gesteuertes Bearbeitungszentrum für die Bearbeitung von Plattenwerkstoffen und verfügt über eine Vakuumspanvorrichtung. Die Führungsbahnen und Antriebe sind in offener Bauweise ausgeführt. Die maximale Drehzahl der Werkzeugspindel beträgt  $n = 18.000$  1/min.

Für die endkonturnahe Fertigung mit hohen Zerspanvolumen wurde das Planfräsen mit drei Messerkopffräsen untersucht. Diese un-

urements at about 13.78 €/m<sup>3</sup> (gross). The material costs  $WAX_{inv}$  of the CFW wax depend on the raw material and, according to the manufacturer, were 4,951 €/m<sup>3</sup> (gross) at the beginning of 2018. This results in a break-even point of the CFW wax compared to EPS at a reuse rate  $WAX_{wvr}$  of at least 75 cycles.

In summary, it can be said that CFW wax meets the physical-technical requirements for a formwork material for freely formed concrete components and is a sensible alternative to the disposable formwork materials used up to now, such as EPS and XPS, not only in terms of strength at 20 °C, but also in terms of material costs.

### 3 Machining of industrial waxes

The investigations into the machinability of the selected industrial waxes CFW and PW 3416 were carried out on wax blocks measuring 300 mm × 300 mm × 80 mm, which were fixed to a wooden plate for better positioning on the processing machines. This geometry ensures both good handling and the possibility of modular construction of larger geometries. The directly cast wax blocks provided by ITE have a cast-rough concave surface in the as-delivered condition with partially occurring shrinkage cracks (CFW) or pores (PW 3416). This is due to the hardening of the wax or, in the case of PW 3416, to air inclusions during the molten mixing of the components. In order to ensure a defined initial surface, all wax blocks were face milled before starting the actual investigations.

#### 3.1 Preliminary investigations on a 3-axis machining centre

First of all, fundamental investigations were carried out on a 3-axis machining centre from IMA (type: bima 280 quadroform). The vertical drilling and milling machine is a CNC-controlled machining centre for the machining of panel materials and is equipped with a vacuum clamping device. The guideways and drives are

terscheiden sich sowohl im Durchmesser, der Schneidenanstellung und der Schneidenanzahl als auch in der maximal möglichen Zustelltiefe  $a_p$ . Die Voruntersuchungen zum Planfräsen haben gezeigt, dass:

- hohe Zeitspanvolumen erreicht werden können,
- angestellte Schneiden zu geringeren Kantenausbrüchen und besseren Oberflächen führen,
- Gleich- und Gegenlaufräsen keine signifikanten Unterschiede zeigen,
- kein Verschleiß an den Fräsern festgestellt werden konnte.

Das definierte Einbringen von Formen mit hoher Maß- und Formhaltigkeit wurde durch das Schafftfräsen von Nuten untersucht. Hierbei wurden Schafftfräser mit unterschiedlichen Schneidstoffen (Vollhartmetall beschichtet und unbeschichtet) untersucht. Zudem wurde die Stegbreite zwischen den gefertigten Nuten variiert, um die Grenzen der Strukturstabilität herauszuarbeiten. Die erzeugten Nutenarrays zeichnen sich durch saubere Bearbeitungsspuren aus, es traten keine Spananhaftungen oder Aufschmelzungen auf. Die Nutwände sind rillenfrei und optisch glatt, im Nutgrund sind die zu erwartenden Bearbeitungsspuren vorhanden. Die Voruntersuchungen zum Schafftfräsen haben gezeigt, dass:

- definierte Formen mit hoher Maß- und Formhaltigkeit erreicht werden können,
- Stegbreiten von 5 mm nicht unterschritten werden sollten,
- hohe Aspektverhältnisse erreicht werden können,
- kein Verschleiß an den Fräsern auftritt.

### 3.2 Weiterführende Untersuchungen auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum

Die weiterführenden Untersuchungen zur Zerspanbarkeit der beiden Wachse, auch im Bereich deutlich höherer Vorschubgeschwindigkeiten und Zeitspanvolumen, wurden auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum (DMU-100-Monoblock) durchgeführt. Hierbei wurden neben den Prozessparametern und Einstellgrößen

of open construction. The maximum speed of the tool spindle is  $n = 18,000$  1/min.

For near-net-shape production with high chip removal rates, face milling with three cutter head milling machines was investigated. These differ in diameter, cutting edge position and number of cutting edges as well as in the maximum possible infeed depth  $a_p$ . The preliminary investigations for face milling have shown that:

- high metal removal rates can be achieved,
- the use of angled cutting edges results in less edge chipping and better surfaces,
- co-milling and up-cut milling do not show significant differences,
- no wear on the milling cutters could be detected.

The defined insertion of moulds with high dimensional and shape accuracy was investigated by end milling of grooves. Here, end mills with different cutting materials (solid carbide coated and uncoated) were investigated. In addition, the web width between the machined grooves was varied in order to work out the limits of structural stability. The generated groove arrays are characterised by clean machining marks, no chip build-up or melting occurred. The groove walls are free of grooves and optically smooth, the expected machining marks are present in the groove base. The preliminary investigations for end milling have shown that:

- defined shapes with high dimensional and shape accuracy can be achieved,
- web widths should not be less than 5 mm,
- high aspect ratios can be achieved,
- there is no wear on the milling cutters.

### 3.2 Further investigations on a 5-axis machining centre

Further investigations into the machinability of the two waxes, also in the area of significantly higher feed rates and metal removal rates, were carried out on a 5-axis machining centre (DMU-100 monoblock). In addition to the process parameters and setting variables, the cool-

auch die Kühlschmierbedingungen systematisch variiert. Die Untersuchungen zur Fertigung von einfachen Nutgeometrien wurden um die Fertigung von Nutgeometrien mit Entformungswinkeln sowie Freiformen erweitert. Es wurden jeweils unterschiedliche Werkzeuge und Schneidstoffe, Kühlschmierbedingungen (trocken, Druckluft, Polymerlösung) und Prozessparameter (Eingriff, Zustellung, Vorschubgeschwindigkeit) untersucht. Bild 3 zeigt eine Auswahl der eingesetzten Werkzeuge je nach zu fertigender Geometrie:

- Messerkopf- und Walzenstirnfräser: ebene Flächen, leichte Krümmungen,
- Schafffräser: Konturen, Nuten, beliebige Geometrien,
- Vollradiusfräser: durchmesserabhängig – hohe oder geringe Aspektverhältnisse, Krümmungswechsel.

### 3.2.1 Planfräsen

In den weiterführenden Versuchsreihen zur Fertigung endkonturnaher Oberflächen durch Planfräsen wurden drei Fräserswerkzeuge eingesetzt (Tabelle 1).

In den Tests wurden die Vorschubgeschwindigkeiten variiert, die Schnittgeschwindigkeiten  $v_c$  und Zustellungen  $a_p$  (Schnitttiefe des Fräasers im Werkstück) blieben innerhalb der Versuchsreihen konstant. Die Schnittbreite entsprach jeweils dem halben Fräskopfdurchmesser.

Für die Messerkopffräser konnte ein deutlicher Einfluss der Vorschubgeschwindigkeiten auf die entstehende Oberflächenrauheit festgestellt

ing lubricant conditions were also systematically varied. The investigations on the production of simple groove geometries were extended by the production of groove geometries with demoulding angles as well as free forms. Different tools and cutting materials, cooling-lubrication conditions (dry, compressed air, polymer solution) and process parameters (engagement, in-feed, feed rate) were investigated. Fig. 3 shows a selection of the tools used depending on the geometry to be produced:

- face mill: planar surfaces, small curvatures,
- end mill cutter: contours, grooves, variable geometries,
- ball nose cutter depending on the diameter – high and small aspect ratios, changes in curvature.



**Bild 3:** Werkzeugauswahl in den weiterführenden Untersuchungen; von links nach rechts: Walzenstirn-, Messerkopf-, Schaft- und Vollradiusfräser | **Fig. 3:** Tool selection in the further investigations; from left to right: helical- and knife cutter head, shank and full radius cutters

### 3.2.1 Face milling

Three milling tools were used in the further test series for the production of near-net-shape surfaces by face milling (Table 1).

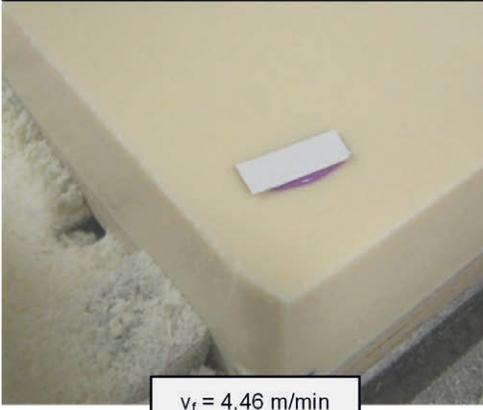
In the tests the feed rates were varied, the cutting speeds  $v_c$  and infeeds  $a_p$  (cutting depth of the cutter in the workpiece) remained constant

Serie   Series	Messerkopfräser   Inserted tooth milling cutter		Walzenstirnfräser   End face mill
	Ø = 100 mm	Ø = 90 mm	Ø = 50 mm
Schneidenanzahl   Number of cutting edges z	8	2	3
Schneidstoff   Cutting material	Hartmetall beschichtet   Hard metal coated	Hartmetall unbeschichtet   Hard metal uncoated	HSS Co5

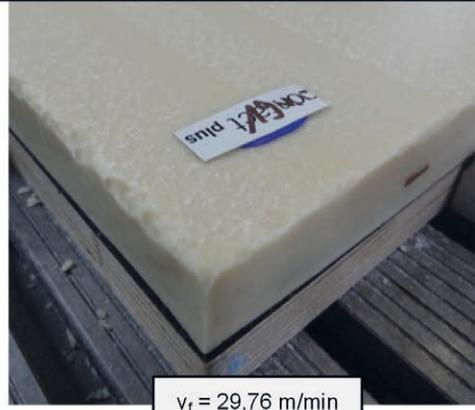
**Tabelle 1:** Werkzeugkenngrößen in den weiterführenden Untersuchungen | **Table 1:** Tool characteristics in the further investigations

Werkzeug | Tool: Messerkopfräser | Milling head  
 Wachs | Wax :  
 Schneidstoff | Cutting material : Hartmetall beschichtet | coated hard metal  
 Bearbeitung | Machining :  
 $n = 3100 \text{ 1/min}$   
 $v_c = 974 \text{ m/min}$

$\varnothing = 100 \text{ mm}$ ,  $z = 8$   
 I-Paraffin  
 trocken | dry  
 $a_p = 7 \text{ mm}$   
 $v_f = \text{variiert}$



$v_f = 4,46 \text{ m/min}$



$v_f = 29,76 \text{ m/min}$

Bild 4: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Oberflächenausbildung bei CFW-Wachs (I-Paraffin) | Fig. 4: Influence of the feed speed on the surface formation of CFW wax (I-paraffin)

werden. Bild 4 zeigt exemplarisch plangefräste Oberflächen im Wachs CFW (I-Paraffin).

Die maximale Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer sichtbar schlechteren Oberfläche. Bereits ab einer Vorschubgeschwindigkeit von  $v_f = 14,88 \text{ m/min}$  treten erste Kantenausbrüche und Aufschmelzungen auf. Für den Messerkopfräser mit  $\varnothing = 90 \text{ mm}$  ließen sich selbst bei Vorschubgeschwindigkeiten kleiner als  $10 \text{ m/min}$  nur visuell schlechtere Oberflächen fertigen. Der Walzenstirnfräser führte hingegen bei moderaten Vorschubgeschwindigkeiten ( $v_f = 1,30 \text{ m/min} - 3,91 \text{ m/min}$ ) und vergleichsweise hohen Zustellungen ( $a_p = 10 \text{ mm}$  und  $20 \text{ mm}$ ) zu sehr guten, visuell glatten Oberflächen.

Der Einsatz von Druckluft oder Polymerlösung als Kühlmedium führte bei den untersuchten Planfräs Werkzeugen zu visuell vergleichbaren Oberflächen. Dies wird durch die Auswertung der erreichten Oberflächenrauheiten, hier dargestellt durch  $R_z$ , unterstützt. Die Rauheiten wurden an Abdrücken der Wachs Oberfläche ermittelt. Die Auswertung anhand von Negati-

within the test series. The cutting width corresponded in each case to half the milling head diameter.

For the cutter head cutters, a clear influence of the feed rates on the resulting surface roughness could be determined. Fig. 4 shows an example of a surface milled in CFW (I-paraffin) wax.

The maximum feed rate leads to a visibly worse surface. Already from a feed speed of  $v_f = 14.88 \text{ m/min}$  the first edge chipping and melting occurs. For the cutter head cutter with  $\varnothing = 90 \text{ mm}$ , only visually poorer surfaces could be produced even at feed speeds  $< 10 \text{ m/min}$ . In contrast, the shell end mill produced very good, visually smooth surfaces at moderate feed rates ( $v_f = 1.30 \text{ m/min} - 3.91 \text{ m/min}$ ) and comparatively high infeeds ( $a_p = 10 \text{ mm}$  and  $20 \text{ mm}$ ).

The use of compressed air or polymer solution as a coolant led to visually comparable surfaces on the face milling tools investigated. This is supported by the evaluation of the achieved surface roughness, here represented by  $R_z$ . The roughnesses were de-

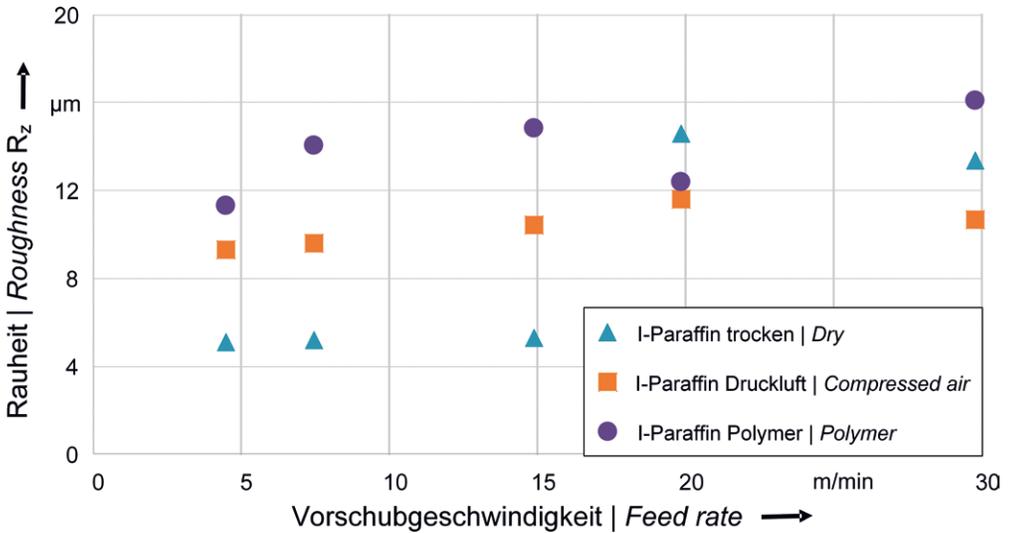


Bild 5: Rauheit  $R_z$  über der Vorschubgeschwindigkeit (Messerkopfräser  $\varnothing = 100$  mm) beim Planfräsen von CFW-Wachs (I-Paraffin) | Fig. 5: Roughness  $R_z$  above the feed speed (cutter head cutter  $\varnothing = 100$  mm) during face milling of CFW wax (I-paraffin)

ven der Wachs Oberfläche ist darin begründet, dass die Wachsblöcke wegen ihrer Größe nicht mit dem Konfokalmikroskop PL $\mu$  (ATOS GmbH) vermessen werden können.

Bild 5 zeigt exemplarisch die Rauheit, aufgetragen über der Vorschubgeschwindigkeit, für den Messerkopfräser  $\varnothing = 100$  mm bei verschiedenen Kühlschmierbedingungen beim Fräsen von CFW-Wachs. Bis zur Vorschubgeschwindigkeit  $v_f = 14,88$  m/min kann deutlich zwischen den einzelnen Kühlschmierbedingungen (trocken, Druckluft, Polymerlösung) unterschieden werden. Die trocken gefertigte Oberfläche hat einen vergleichsweise niedrigen  $R_z$ -Wert. Der Einsatz von Druckluft führt zu einer Erhöhung der Oberflächenrauheit, welche unter Einsatz der Polymerlösung nochmals ansteigt. Bei Vorschubgeschwindigkeiten  $v_f$  größer 14,88 m/min steigt der  $R_z$ -Wert bei der Trockenbearbeitung sprunghaft und nähert sich den Werten der unter Druckluft und Polymerlösung gefertigten Oberflächen an. Es zeigt sich hierin, dass mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit und damit mit zunehmendem Zeitspannvolumen der Einfluss der Kühlschmierung durch den Einfluss der deutlich raueren Frässpuren überlagert wird. Das gleiche Verhalten zeigt

terminated on impressions of the wax surface. The evaluation on the basis of negatives of the wax surface is based on the fact that the wax blocks cannot be measured with the confocal microscope PL $\mu$  (ATOS GmbH) due to their size.

Fig. 5 shows an example of the roughness, plotted against the feed rate, for the cutter head cutter  $\varnothing = 100$  mm under different cooling lubricant conditions when milling CFW wax. Up to a feed rate of  $v_f = 14,88$  m/min, a clear distinction can be made between the individual cooling lubrication conditions (dry, compressed air, polymer solution). The dry machined surface has a comparatively low  $R_z$ -value. The use of compressed air leads to an increase in surface roughness, which increases again when using the polymer solution. At feed speeds  $v_f$  greater than 14,88 m/min, the  $R_z$ -value increases abruptly during dry machining and approaches the values of surfaces produced under compressed air and polymer solution. This shows that with increasing feed rate and thus with increasing metal removal rate, the influence of cooling lubrication is superimposed by the influence of the significantly rougher milling marks. The same behaviour is shown with wax PW 3416 during dry machining and under compressed air. Ma-

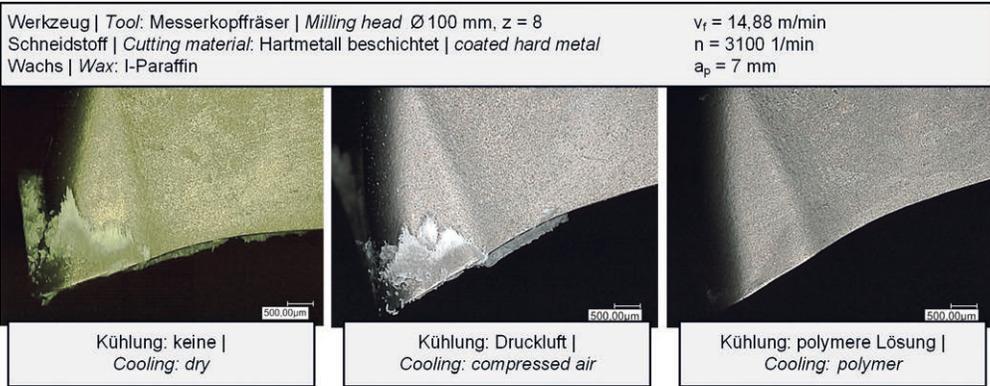


Bild 6: Anhaftungen von CFW-Wachs (I-Paraffin) an der Schneide | Fig. 6: Adhesion of CFW wax (I-paraffin) to the cutting edge

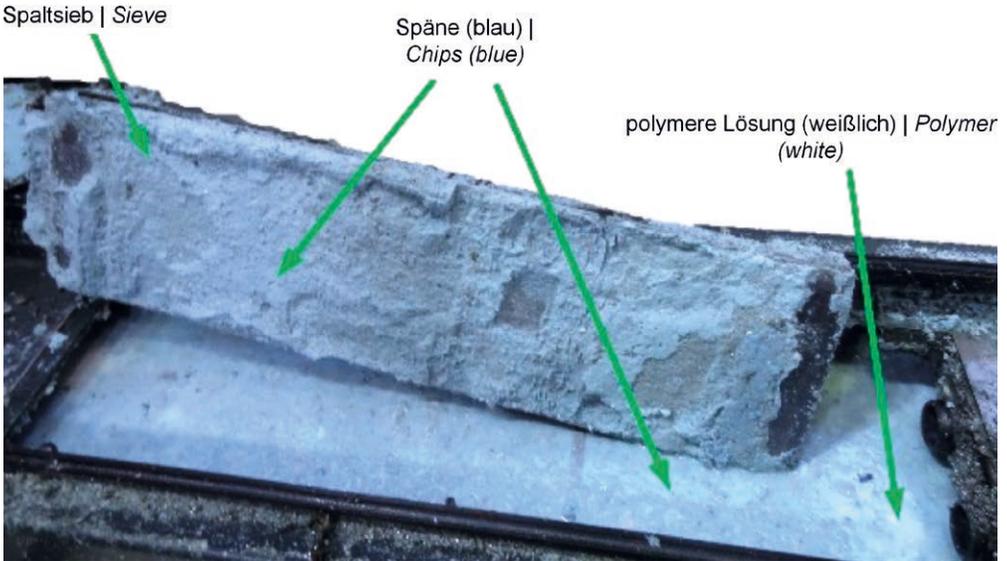
sich beim Wachs PW 3416 bei trockener Bearbeitung und unter Druckluft. Auf eine Bearbeitung unter Polymerlösung wurde verzichtet, da keine wesentlichen Vorteile bei der Bearbeitung des Wachses CFW auftraten. Der Einsatz des Messerkopfräfers  $\varnothing = 90$  mm und des Walzenstirnfräasers führt zu ähnlichen Ergebnissen. Mit Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit nimmt der  $R_z$ -Wert zu, der Einfluss der Kühlschmierbedingungen ist wiederum gering.

Die Bearbeitung der Wachse ohne Kühlschmierstoff oder Druckluft führt zu Anhaftungen von Wachs an der Schneide und zu Zusetzungen der Kühlkanäle des Werkzeugs. Es besteht die Gefahr, dass die anhaftenden Späne an der Werkzeugschneide wieder in den Schnitt gezogen werden und es somit zum Einglätten beziehungsweise zur Beeinflussung der Oberfläche kommt. Die Zusetzung der Kühlkanäle tritt nicht auf, wenn Druckluft oder Polymerlösung eingesetzt werden, da es hier die Späne stetig entfernt werden. Sie werden sofort von der Zerspanstelle transportiert, sodass ein Zusetzen der Werkzeuge und Anhaftungen größtenteils vermieden wird (Bild 6). Die Bearbeitung unter Polymerlösung zeigt, dass die Wachspäne zwar von der Zerspanstelle weggespült werden, sich aber in den kühlmittelfördernden Leitungen des Bearbeitungszentrums agglomerieren und zu starken Verschmutzungen in den Ablaufkanälen und Spaltsieben führen können (Bild 7). Abhilfe können hier die trockene bzw. Druckluft-Zerspannung oder ein angepasstes Maschinensystem

chining under polymer solution was dispensed with, since no significant advantages were found when machining the CFW wax. The use of the cutter head cutter  $\varnothing = 90$  mm and the shell end mill leads to similar results. As the feed rate increases, the  $R_z$ -value increases, the influence of the cooling lubricant conditions is again low.

Processing the waxes without cooling lubricant or compressed air causes wax to adhere to the cutting edge and clog the cooling channels of the tool. There is a risk that the chips adhering to the cutting edge will be drawn back into the cut, thus smoothing or influencing the surface. Clogging of the cooling channels does not occur when compressed air or polymer solution is used, as the chips are continuously removed. They are transported immediately from the cutting point, so that clogging of the tools and build-up is largely avoided (Fig. 6). Machining under polymer solution shows that although the wax chips are flushed away from the cutting point, they agglomerate in the coolant-conveying lines of the machining centre and can lead to heavy soiling in the drainage channels and slotted screens (Fig. 7). This can be remedied by dry or compressed air machining or by an adapted machine system. A modified chip collection and filter design also allows machining under polymer solution in principle.

The wear behaviour of the tools used depends on the cutting materials and the wax specifications machined. During the processing of the



**Bild 7:** Schmiermittelleitung mit zugesetztem Spaltsieb und aufgeschwemmten Spänen, Wachs PW 3146 (blau = Wachs P-Montan) | **Fig. 7:** Lubricant line with added slotted sieve and suspended chips of wax PW 3146 (blue = wax P-Montan)

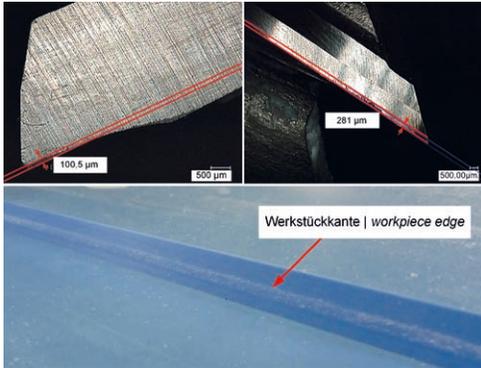
schaffen. Eine modifizierte Späneerfassung und Filterkonstruktion ermöglicht prinzipiell auch die Zerspanung unter Polymerlösung.

Das Verschleißverhalten der eingesetzten Werkzeuge ist abhängig von den Schneidstoffen und den bearbeiteten Wachsspezifikationen. Bei der Bearbeitung des homogenen Wachses CFW wurde über alle Versuche kein Verschleiß an den Schneiden detektiert. Gleiches gilt für die Bearbeitung des Wachses PW 3146 mit den Schneidstoffen Hartmetall beschichtet und unbeschichtet. Demgegenüber führte die Bearbeitung des Wachses PW 3146 mit dem Schneidstoff HSS Co5 bereits nach einem sehr kleinen Zerspanvolumen von  $V_w = 900 \text{ cm}^3$  zum Verschleiß der Schneiden (Bild 8) auf Grund des im Wachs PW 3146 enthaltenen Füllstoffs Terephthalsäure. Es wurden eine Verschleißmarkenbreite von ca.  $100 \mu\text{m}$  und ein Schneidkantenversatz von ca.  $281 \mu\text{m}$  detektiert. Dies führt zu einer deutlich sichtbaren, unsauberen Schnittkante im Wachs.

Zusammenfassend lässt sich für das Planfräsen der Wachse herausstellen, dass die Bearbeitung mit dem Messerkopfräser  $\varnothing = 100 \text{ mm}$ ,

homogeneous wax CFW no wear of the cutting edges was detected during all tests. The same applies to the machining of PW 3146 wax with the cutting materials carbide coated and uncoated. In contrast, machining the wax PW 3146 with the cutting material HSS Co5 resulted in wear of the cutting edges (Fig. 8) after a very small cutting volume of  $V_w = 900 \text{ cm}^3$  due to the filler terephthalic acid contained in the wax PW 3146. A wear mark width of approx.  $100 \mu\text{m}$  and a cutting edge offset of approx.  $281 \mu\text{m}$  were detected. This leads to a clearly visible, unclean cutting edge in the wax.

In summary, for face milling of the waxes, it can be stated that machining with the cutter head cutter  $\varnothing = 100 \text{ mm}$ ,  $z = 8$ , cutting material: carbide, for a feed rate lower  $v_f = 14.88 \text{ m/min}$  is useful with regard to surface formation ( $a_p = 7 \text{ mm}$ , speed  $n = 3,100 \text{ rpm}$ ). The resulting metal removal rate is  $5,208 \text{ cm}^3/\text{min}$  per milling path ( $50 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ). Similarly, the machining time for  $1 \text{ m}^2$  is 1.34 min and for  $1 \text{ m}^3$  thus approx. 192 min with an infeed  $a_p = 7 \text{ mm}$ . The cutter head cutter  $\varnothing = 90 \text{ mm}$  led to visually much worse surfaces ( $a_p = 10$  or  $20 \text{ mm}$ ) even at lower feed rates. In contrast, the shell end mill



**Bild 8:** Verschleißmarkenbreite der Schneide (oben links), Schneidkantenversatz an der Freifläche (oben rechts) und resultierende Schnittkante im Wachs PW 3146 (unten) | **Fig. 8:** Wear mark width of the cutting edge (top left), cutting edge offset on the free surface (top right) and resulting cutting edge in the wax PW 3146 (below) and corresponding FE results

$z = 8$ , Schneidstoff: Hartmetall, für eine Vorschubgeschwindigkeit kleiner  $v_f = 14,88$  m/min sinnvoll hinsichtlich der Oberflächenausbildung ist ( $a_p = 7$  mm, Drehzahl  $n = 3.100$  1/min). Das damit erreichte Zeitspanvolumen beträgt  $5.208$  cm<sup>3</sup>/min je Fräsbahn (50 mm × 7 mm × 300 mm). Die Bearbeitungszeit für 1 m<sup>2</sup> beträgt analog dazu 1,34 min und für 1 m<sup>3</sup> somit ca. 192 min bei einer Zustellung  $a_p = 7$  mm. Der Messerkopfräser  $\varnothing = 90$  mm führte auch bei geringeren Vorschubgeschwindigkeiten zu visuell deutlich schlechteren Oberflächen ( $a_p = 10$  bzw. 20 mm). Demgegenüber konnten mit dem Walzenstirnfräser bei ebenso gleichhohen Zustellungen und moderaten Vorschubgeschwindigkeiten sehr gute Oberflächen gefertigt werden. Für die Zerspanung des Wachses CFW wird somit der Einsatz des Walzenstirnfräasers empfohlen.

### 3.2.2 Schaftfräsen

In den weiterführenden Versuchen zur Fertigung von Strukturen mit hoher Maß- und Formgenauigkeit wurde, neben der Fertigung einfacher Nutgeometrien, die Fertigung von Nuten mit Entformungswinkeln untersucht. Hierbei wurde die aus den Vorversuchen ermittelte stabile Stegbreite von 5 mm nicht unterschritten. Zum Einsatz kamen zwei Schaftwerkzeuge mit 16 mm Durchmesser, Zähnezahl  $z = 2$  aus Hart-

metall, die in der Lage waren, sehr gute Oberflächen zu erzeugen, die bei den gleichen Infeeds und moderaten Vorschubgeschwindigkeiten herstellbar waren. Die Verwendung des Shell-Endmills wird daher für die Bearbeitung von CFW-Wachs empfohlen.

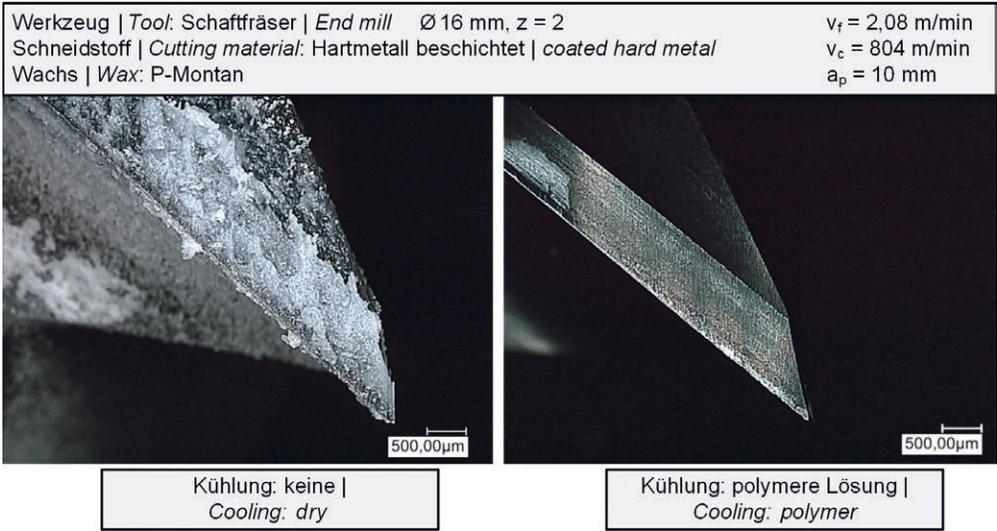
### 3.2.2 Endmilling

In den weiteren Tests für die Produktion von Strukturen mit hoher Dimensional- und Formgenauigkeit, wurde die Produktion von Nuten mit demoulding angles untersucht, zusätzlich zur Produktion von einfachen Nutgeometrien. Hier, wurde die stabile Webbreite von 5 mm, die aus den Vorversuchen ermittelt wurde, nicht unterschritten. Zwei Schaftwerkzeuge mit einem Durchmesser von 16 mm und einer Anzahl von Zähnen  $z = 2$  aus Hartmetall mit und ohne einer zusätzlichen DLC-Beschichtung (DLC: amorphes Kohlenstoffschicht) wurden verwendet. Letzteres wurde hinsichtlich der Verbesserung der Chipabfuhr und damit der Reduzierung der Adhäsion von Spänen an das Werkzeug untersucht.

Die Produktion der Nuten ohne demoulding angle wurde durch die Variation der Infeed-Rate und der Infeed-Tiefe sowie der Kühl- und Schmierbedingungen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass mit zunehmender Infeed-Rate die Rauheit in den Nuten von  $R_z = 9,9$  µm auf  $R_z = 18,0$  µm ansteigt. Hinsichtlich der demoulding des späteren Betonabstempels, wurde kein Einfluss der Rauheit festgestellt. Die Materialadhäsion wurde durch den Einsatz einer Polymerlösung (Fig. 9) deutlich reduziert. Weiterhin, wurde kein Einfluss der DLC-Beschichtung auf die resultierende Chipadhäsion festgestellt.

Weiterhin, wurden Nuten mit demoulding angles von 1°, 2°, 3° und 4° in zwei unterschiedlichen Tiefen ( $a_p = 10$  und 20 mm) und mit Variation der Infeed-Geschwindigkeit ( $v_f = 2,08$  m/min und 8,32 m/min) (Fig. 10) hergestellt.

Die Fertigungspräzision der Winkel wurde gemessen und ist ausreichend hoch, mit einer maximalen Abweichung von 2,55% zwischen den tatsächlichen und den Zielwerten. Die Nuttiefen wurden mit einer Wiederholgenauigkeit von  $\pm 10$  µm hergestellt.



**Bild 9:** Werkstoffanhaftungen an der Schneide unter verschiedenen Kühlschmierbedingungen beim Fräsen vom Wachs PW 3146 (P-Montan) | **Fig. 9:** Material buildup on the cutting edge under various cooling lubricant conditions during milling of PW 3146 wax (P-Montan)

metall mit und ohne einer zusätzlichen DLC-Beschichtung (DLC: amorphe Kohlenstoffschicht, englisch: *diamond-like carbon*). Letztere wurde im Hinblick auf eine verbesserte Spanabfuhr und damit geringere Anhaftungen von Spänen am Werkzeug untersucht.

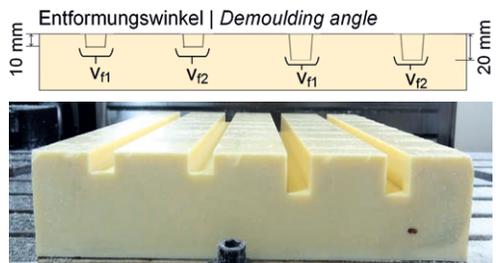
Die Fertigung der Nuten ohne Entformungswinkel erfolgte unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit und der Zustelltiefe sowie der Kühlschmierbedingungen. Es konnte wiederum gezeigt werden, dass mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit die Rauheit in den Nuten von  $R_z = 9,9 \mu\text{m}$  auf  $R_z = 18,0 \mu\text{m}$  zunimmt. Im Hinblick auf die Entformung des späteren Betonabgusses wurde kein Einfluss der Rauheit festgestellt. Die Werkstoffanhaftungen nahmen unter Nutzung von Polymerlösung deutlich ab (Bild 9). Es wurde kein Werkzeugverschleiß festgestellt. Zudem konnte kein Einfluss der DLC-Beschichtung bezüglich der resultierenden Spananhaftungen festgestellt werden.

Des Weiteren wurden Nuten mit Entformungswinkeln von  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$  und  $4^\circ$  in zwei verschiedenen Tiefen ( $a_p = 10$  und  $20 \text{ mm}$ ) und unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit ( $v_f = 2,08$  und  $8,32 \text{ m/min}$ ) gefertigt (Bild 10).

### 3.2.3 Free form milling

Free forms were produced in further test series. These generally have more complex geometries due to curvatures. In initial tests, uniaxially curved surfaces with different tool path distances were manufactured. Full radius milling cutters with diameters of  $\varnothing = 10$  and  $20 \text{ mm}$  were used here. The machining took place without cooling lubricant. The milling path distance was selected with  $x = 1, 0, 5$  and  $0.1 \text{ mm}$  in order to be able to evaluate the resulting structure on the later concrete casting.

It could be shown that the use of a full radius milling cutter with a diameter  $\varnothing = 20 \text{ mm}$  and



**Bild 10:** Fertigung von Nuten mit Entformungswinkeln | **Fig. 10:** Manufacture of grooves with demoulding angles

Die Fertigungsgenauigkeit der eingebrachten Winkel wurde vermessen und ist mit einer maximalen Abweichung von IST- zu SOLL-Wert mit 2,55 % ausreichend hoch. Die Nuttiefen wurden mit einer Wiederholgenauigkeit von  $\pm 10 \mu\text{m}$  gefertigt.

### 3.2.3 Freiformfräsen

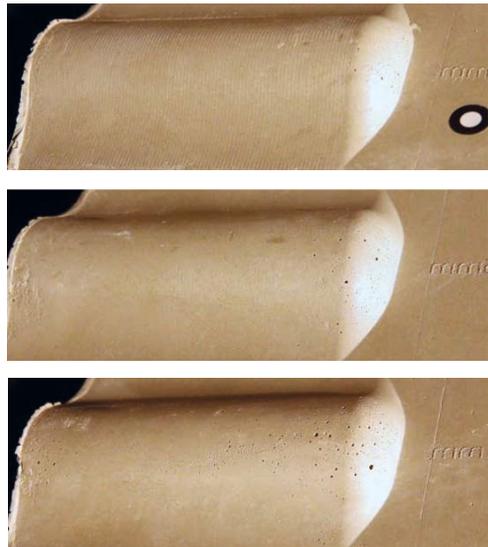
In weiteren Versuchsreihen wurden Freiformen gefertigt. Diese weisen im Allgemeinen durch Krümmungen und insgesamt komplexe Geometrien auf. In ersten Untersuchungen wurden einachsig gekrümmte Flächen mit unterschiedlichen Fräsbahnabständen gefertigt. Zum Einsatz kamen hier Vollradiusfräser mit den Durchmessern  $\varnothing = 10$  und  $20 \text{ mm}$ . Die Bearbeitung fand ohne Kühlschmierstoff statt. Der Fräsbahnabstand wurde mit  $x = 1, 0,5$  und  $0,1 \text{ mm}$  gewählt, um so die resultierende Struktur auf dem späteren Betonabguss auswerten zu können.

Es konnte gezeigt werden, dass bei Verwendung eines Vollradiusfräasers mit dem Durchmesser  $\varnothing = 20 \text{ mm}$  und einem Fräsbahnabstand von  $x = 1 \text{ mm}$  sichtbare Rillen entstehen. Bei dem Fräsbahnabstand  $x = 0,5 \text{ mm}$  sind die Rillen auf dem Wachs ebenfalls noch zu erkennen, jedoch deutlich weniger ausgeprägt. Bei einem Bahnabstand von  $x = 0,1 \text{ mm}$  ist kaum noch eine Struktur zu erkennen und die Oberfläche wirkt optisch glatt. Bild 11 zeigt die Oberflächen des Betonabgusses der Freiform-Wachsschalung unter Verwendung von UHPC.

Zum Erreichen einer im Sinne der Architektur optisch glatten Sichtbetonoberfläche, wie diese z. B. von Bauherren bei Fassadenelementen oft verlangt wird, ist die Verwendung eines Fräsbahnabstandes von  $x = 0,5 \text{ mm}$  zu empfehlen. Dieser Fräsbahnabstand stellt bei den verwendeten Vollradiusfräsern und unter Verwendung des in geringen Maßen nivellierenden Trennmittels (Schalwachs: GRACE Ciri LM-33) eine geeignete Prozesskonstellation im Hinblick auf die Oberflächengüte und die Bearbeitungszeit dar.

a milling path distance of  $x = 1 \text{ mm}$  produces visible grooves. With a milling path distance of  $x = 0.5 \text{ mm}$ , the grooves on the wax are also still visible, but much less pronounced. At a tool-path distance of  $x = 0.1 \text{ mm}$ , hardly any structure is visible and the surface appears optically smooth. Fig. 11 shows the surfaces of the concrete cast of the freeform wax formwork using UHPC.

In order to achieve an optically smooth exposed concrete surface in terms of architecture, as is often required by clients for façade elements, for example, it is recommended to use a milling path distance of  $x = 0.5 \text{ mm}$ . This milling path distance represents a suitable process constellation in terms of surface quality and machining time with the full radius milling cutters used and with the use of a release agent that levels to a small extent (formwork wax: GRACE Ciri LM-33).



**Bild 11:** Oberflächen von Abgüssen der Freiformen mit UHPC; von oben nach unten:  $x = 1 \text{ mm}$  – Rillen optisch und haptisch zu erkennen,  $x = 0,5 \text{ mm}$  – Rillen nur optisch feststellbar,  $x = 0,1 \text{ mm}$  – optisch und haptisch glatt | **Fig. 11:** Surfaces of the UHPC freeform cast; from top to bottom:  $x = 1 \text{ mm}$  – grooves noticeable visual and haptic,  $x = 0.5 \text{ mm}$  – grooves only visual noticeable,  $x = 0.1 \text{ mm}$  – look and feel smooth

## 4 Entwurf und Herstellung von Schalungselementen aus Wachs durch subtraktive Bearbeitung und Betonierung der Referenzprobekörper

## 4 Design and manufacture of formwork elements made of wax by subtractive machining and concreting of reference specimens

### 4.1 Geometrie

### 4.1 Geometry

Die bisherigen Erkenntnisse wurden im nächsten Schritt verwendet, um formstabile Außen-Wachsschalungen aus CFW-Wachs zu fertigen. Hierzu wurden vom ITE aus vergossenen Wachstafeln hergestellte Wachsböcke mit den Abmessungen 500 mm × 500 mm × 120 mm bereitgestellt. Als Wachs für diese Untersuchungen wurde ausschließlich das CFW-Wachs verwendet. Obwohl das Wachs PW 3416 bessere physikalisch-technische Eigenschaften (u. a. höherer E-Modul, größere Festigkeit und geringere thermische Dehnung) aufweist, führte der im Wachs PW 3416 enthaltene Füllstoff Terephthalsäure zu einem höheren Verschleiß an einigen Werkzeugen sowie zu einem Ansäuern der finalen Betonoberfläche.

The previous findings were used in the next step to produce dimensionally stable exterior wax formwork from CFW wax. For this purpose, wax blocks measuring 500 mm × 500 mm × 120 mm were provided by ITE from cast wax sheets. Only CFW wax was used as the wax for these investigations. Although the wax PW 3416 has better physical-technical properties (including higher modulus of elasticity, higher strength and lower thermal expansion), the filler terephthalic acid contained in the wax PW 3416 led to higher wear on some tools and to acidification of the final concrete surface.

Zur Herstellung repräsentativer geometrischer Formen wurden durch das ITE sogenannte Formenbausteine konstruiert und im CAD zu Wachsschaltafeln zusammengesetzt (Bild 12). Zudem wurde eine Wachsschaltafel mit einer parametrisch strukturierten Oberfläche und

In order to produce representative geometric shapes, the ITE designed so-called mold blocks and assembled them in CAD to form wax formwork panels (Fig. 12). In addition, a wax formwork panel with a parametrically structured surface and a further wax formwork panel were constructed to investigate the aspect ratio ( $b : h = 2 : 1$  to  $1 : 5$ ) and thus the demoldability of the subsequent casting.

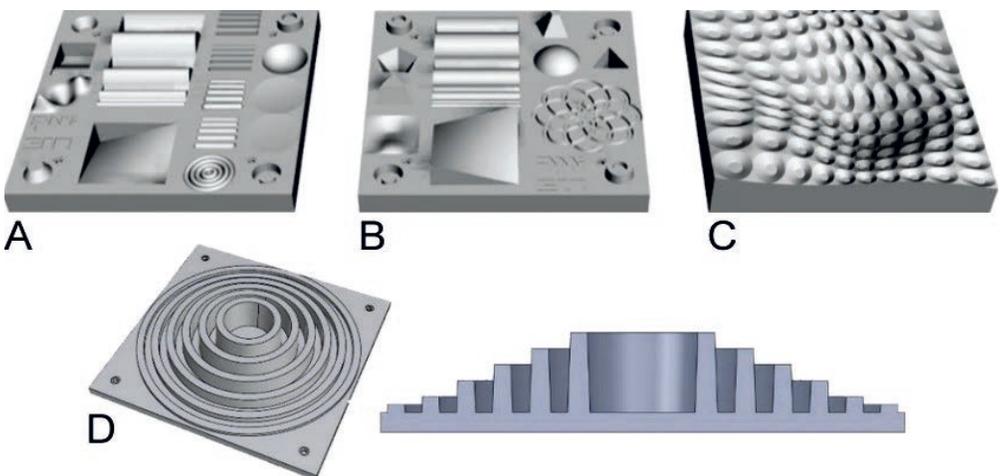


Bild 12: Digitale CAD-Modelle der Wachsschaltafeln | Fig. 12: Digital CAD models of the wax formwork panels

eine weitere Wachsschalttafel zur Untersuchung des Aspektverhältnisses ( $b : h = 2 : 1$  bis  $1 : 5$ ) und somit der Entformbarkeit des späteren Abgusses konstruiert.

#### 4.2 Fertigung

Zur Fertigung der Wachsschalttafeln wurden die CAD-Daten des ITE an das IWF übergeben und im CAM-System Solid CAM 2015 der NC-Code erstellt. Am Beispiel der Wachsschalttafel A wird die Bearbeitungsabfolge erläutert. Zum Einsatz kamen insgesamt neun Werkzeuge (Schaft- und Kopierfräser) mit Durchmessern von 16 mm bis 1,5 mm.

Zunächst wurde der angelieferte Wachsblock auf dem Bearbeitungszentrum DMU-100-Monoblock fixiert und die Position eingemessen. Im sogenannten *IMachining* erfolgt die erste Schruppbearbeitung des gesamten Wachsblocks (Schaftfräser  $\varnothing = 16$  mm). Hierbei wird unter den optimalen Schnittbedingungen möglichst viel Werkstoff zerspannt. Beim *IMachining* werden Trochoidalfräser eingesetzt, wobei mit der gesamten Schneidenlänge  $a_p$  bei geringem Schneideneingriff  $a_e$  eine recht hohe Vorschubgeschwindigkeit  $v_f = 5$  m/min gefahren wird. Nach dem *IMachining* werden die ersten Konturen mit einem Schaftfräser  $\varnothing = 10$  mm schruppend bearbeitet ( $n = 17.492$  1/min,  $v_f = 12,94$  m/min). Mit dem Modus „I3D Rough“ werden anschließend ausgewählte, kleine Strukturen bearbeitet (Schaftfräser  $\varnothing = 6$  mm,  $n = 18.000$  1/min,  $v_f = 5,9$  m/min) ebenso wie tieferliegende Bohrungen vorbearbeitet (Schaftfräser  $\varnothing = 6$  mm,  $n = 10.610$  1/min,  $v_f = 0,954$  m/min). Mit einem Schaftfräser  $\varnothing = 10$  mm wird nachfolgend die gesamte Wachs Oberfläche zwischen den For-

#### 4.2 Manufacturing

For the production of the wax formwork panels, the CAD data from ITE were transferred to IWF and the NC code was created in the CAM system Solid CAM 2015. The machining sequence is explained using the example of wax board A. A total of nine tools (end mills and copy mills) with diameters from 16 mm to 1.5 mm were used.

First the delivered wax block was fixed on the machining center DMU-100-Monoblock and the position was measured. In the so-called *IMachining* the first roughing of the entire wax block (end mill  $\varnothing = 16$  mm) is carried out. During this process, as much material as possible is machined under optimum cutting conditions. Trochoidal milling cutters are used in the *IMachining* process, whereby the entire cutting edge length  $a_p$  is machined at a rather high feed rate  $v_f = 5$  m/min with a low cutting edge engagement  $a_e$ . After *IMachining*, the first contours are rough-machined with an end mill  $\varnothing = 10$  mm ( $n = 17,492$  1/min,  $v_f = 12.94$  m/min). The “I3D Rough” mode is then used to machine selected, small structures (end mill  $\varnothing = 6$  mm,  $n = 18,000$  rpm,  $v_f = 5.9$  m/min) as well as pre-machining deeper holes (end mill  $\varnothing = 6$  mm,  $n = 10,610$  rpm,  $v_f = 0.954$  m/min). With an end mill  $\varnothing = 10$  mm, the entire wax surface between the mould modules is then finished ( $n = 16,000$  rpm,  $v_f = 2.88$  m/min). The finishing of the individual mould modules takes place at comparatively low feed rates.

Fig. 13 shows an example of the machining of the curved, back surfaces (brownish-green surfaces). Here the pre-machined surface is

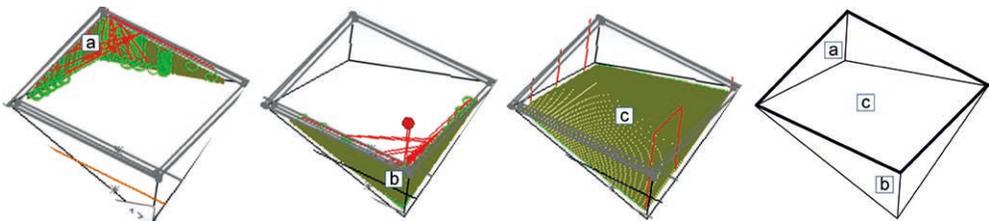


Bild 13: Ablauf Schlichtbearbeitung des Formenbausteins „gekrümmte Fläche“ | Fig. 13: Finishing process 'curved surface'

menbausteinen geschichtet ( $n = 16.000 \text{ 1/min}$ ,  $v_f = 2,88 \text{ m/min}$ ). Die Schlichtbearbeitung der einzelnen Formenbausteine findet bei vergleichsweise geringen Vorschubgeschwindigkeiten statt.

Bild 13 zeigt exemplarisch die Bearbeitung der gekrümmten, zurückliegenden Flächen (bräunlich-grüne Flächen). Hierbei wird die vorbereitete Fläche mit einem Kopierfräser ( $\varnothing = 10 \text{ mm}$ ,  $n = 7.000 \text{ 1/min}$ ,  $v_f = 0,78 \text{ m/min}$ ) geschichtet. Es werden zunächst die senkrechten Außenkanten (a, b) und die Kanten­geometrie in den Ecken des Formenbausteins bearbeitet. Anschließend erfolgt die Schlichtbearbeitung der mehrfach gekrümmten Oberfläche (c). Die roten Striche zeigen die Anfahrbewegungen des eingesetzten Fräsers im Eilgang ( $v_f = 30 \text{ m/min}$ ) an, wohingegen die grünen Markierungen die eigentlichen Vorschubbewegungen aufzeigen.

Jeder weitere Formenbaustein wurde ebenfalls individuell und je nach Strukturfeinheit mit den benötigten Werkzeugdurchmessern bearbeitet. Besonders filigrane Strukturen wie die Stege und Nuten (Breiten: 10 bis 2 mm, Höhen bzw. Tiefen: 10 mm) wurden mit einem Kopierfräser ( $\varnothing = 1,5 \text{ mm}$ ,  $n = 16.000 \text{ 1/min}$ ,  $v_f = 1,6 \text{ m/min}$ ) fertig bearbeitet, Bild 14.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Bearbeitung größerer und geometrisch deutlich komplexerer Wachsschalungen und Wachsformelemente möglich ist. Es treten keine Maßstabseffekte auf. Zu beachten bleibt allerdings der zunehmend erschwerte Späneabtransport bei zunehmender Struktur­tiefe. Es kommt hierbei schnell zu Zersetzungen des Werkzeugs und Anhaftungen am Werkstück. Aus diesem Grund wurde der Prozess regelmäßig unterbrochen, um die Werkzeuge und insbesondere die feinen Strukturen von anhaftenden Spänen zu säubern.

Während aller Versuchsreihen und Fertigungsabläufe wurden die anfallenden Wachsspäne sortenrein gesammelt und zur Wiederverwendung an das ITE übergeben. Bei der Bearbeitung recyclerter und erneut vergossener Späne konnte

finished with a copy milling cutter ( $\varnothing = 10 \text{ mm}$ ,  $n = 7,000 \text{ 1/min}$ ,  $v_f = 0.78 \text{ m/min}$ ). First the vertical outer edges (a, b) and the edge geometry in the corners of the mould module are machined. Then the finishing of the multi-curved surface (c) is carried out. The red lines indicate the approach movements of the milling cutter used in rapid traverse ( $v_f = 30 \text{ m/min}$ ), whereas the green marks indicate the actual feed movements.

Each additional mould module was also individually machined with the required mould diameters depending on the structural fineness. Particularly filigree structures such as the webs and grooves (widths: 10 to 2 mm, heights or depths: 10 mm) were finished with a copy milling cutter ( $\varnothing = 1.5 \text{ mm}$ ,  $n = 16,000 \text{ rpm}$ ,  $v_f = 1.6 \text{ m/min}$ ), Fig. 14.

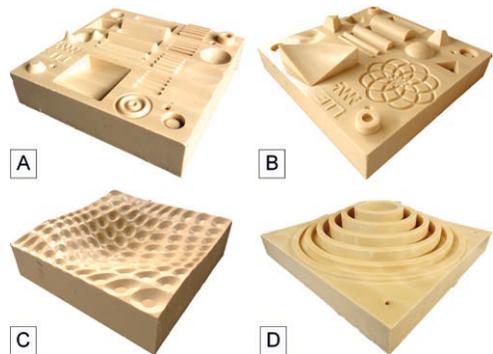


Bild 14: Gefertigte Wachsschaltafeln | Fig. 14: Manufactured wax formwork panels

In summary, it can be stated that the processing of larger and geometrically much more complex wax formwork and wax form elements is possible. There are no scale effects. However, the increasingly difficult chip removal with increasing structure depth must be taken into account. This quickly causes the tool to decompose and adhere to the workpiece. For this reason, the process was regularly interrupted to clean the tools and especially the fine structures from adhering chips.

During all test series and production processes, the wax chips were collected according to type

Serie   Series	Messerkopfräser   Inserted tooth milling cutter			
	A	B	C	D
Schnittzeit   Cutting time [hh:mm:ss]	07:46:39	05:30:14	04:33:16	02:29:34

**Tabelle 2:** Werkzeugkenngrößen in den weiterführenden Untersuchungen | **Table 2:** Tool characteristics in the further investigations

kein Unterschied im Prozessverhalten im Vergleich zu neuwertig vergossenen Blöcken festgestellt werden.

### 4.3 Optimierung der Fertigungsparameter

Die Fertigung der Wachsschaltafeln benötigt, je nach gewählten Schnittbedingungen, eine bestimmte Schnittzeit (Tabelle 2).

Neben der eigentlichen Schnittzeit für die Wachsschaltafeln war nach der Fertigung noch eine Nachbearbeitung jeder Wachsschalung notwendig. Durch den Bearbeitungsprozess kam es teilweise zu Anhaftungen und Aufschmelzungen von Spänen auf den entstehenden Formbausteinen. Insbesondere mit zunehmender Strukturtiefe wird der Spanabtransport erschwert. Bild 15 zeigt exemplarisch aufgeschmolzene Späne an der Schalttafel A.

Die Nachbearbeitung jeder Wachsschalttafel erfolgte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen und Fertigungsabläufe händisch durch Bürstoperationen mit Polyamidborsten und bei stärkeren Anhaftungen durch Schaben mit einer metallischen Klinge. Für einen produktiven Fertigungsablauf bieten sich hier Bürstoperationen direkt auf dem Bearbeitungszentrum an. Das Polieren mit Polierstiften wird als kritisch bewertet, da es hier, ausgehend von den Erfahrungen mit Zerspanwerkzeugen mit definierter Schneide, voraussichtlich zur schnellen Zusetzung des Porenraums kommt und keine Zerspannung mehr stattfinden kann.

Wie bereits dargestellt, führt eine Bearbeitung unter Druckluft und Polymerlösung im Hinblick auf die erreichten Oberflächenrauheiten bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten zu vergleichbaren Ergebnissen wie die Trockenbearbeitung. Der wesentliche Vorteil der Polymerlösung ist

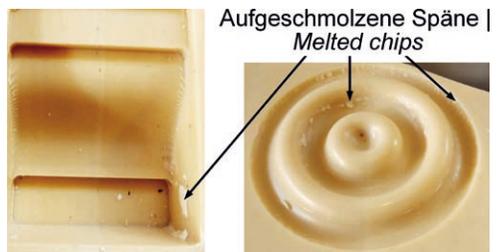
and handed over to ITE for reuse. When machining recycled and recast chips, no difference in process behaviour could be detected in comparison to blocks cast as new.

### 4.3 Optimisation of the production parameters

Depending on the selected cutting conditions, the production of the wax formwork panels requires a certain cutting time (Table 2).

In addition to the actual cutting time for the wax formwork panels, each wax formwork had to be reworked after production. The machining process sometimes caused chips to adhere to and melt on the resulting mould blocks. Especially with increasing structure depth, the removal of chips becomes more difficult. Fig. 15 shows an example of fused chips on the shuttering panel A.

Within the scope of the investigations and production processes carried out, the finishing of each wax board was carried out manually by brushing with polyamide bristles and, in the case of stronger adhesions, by scraping with a metallic blade. For a productive manufacturing process, brushing operations directly on the machining centre are recommended here. Pol-



**Bild 15:** Spananhaftungen an einzelnen Formbausteinen | **Fig. 15:** Chip buildup on individual form bricks

die beinahe vollständige Vermeidung von Zusetzungen an den Werkzeugschneiden und, sofern vorhanden, in den Kühlkanälen. Für eine Bearbeitung unter Polymerlösung muss ein geeignetes Spanabfuhrkonzept in der Bearbeitungsmaschine vorliegen, um Agglomerationen von Spänen in den schmiermittelfördernden Leitungen und Verstopfungen der Spaltsiebe vorzubeugen. Hierzu bietet es sich an, zunächst grobe Späne direkt im Bearbeitungsraum aufzufangen. Feine Späne können mit geeigneten Schwerkraft-Anschwemmfiltern filtriert werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung eines Kammer- bzw. Absatzfilters. Bei diesem schwimmen die feinen Späne oben auf und können abgeschöpft werden. Die letzte Stufe des Kammerfilters pumpt somit ausschließlich gereinigten Kühlschmierstoff zurück in den Kreislauf.

#### 4.4 Abguss der Wachsschalungen mit UHPC

Die am IWF gefrästen Wachsschalungen wurden am ITE in eine Standard-Systemschalung eingebracht, mit einer dünnen Schicht Trennmittel eingestrichen und mit UHPC abgegossen (Bild 16, links).

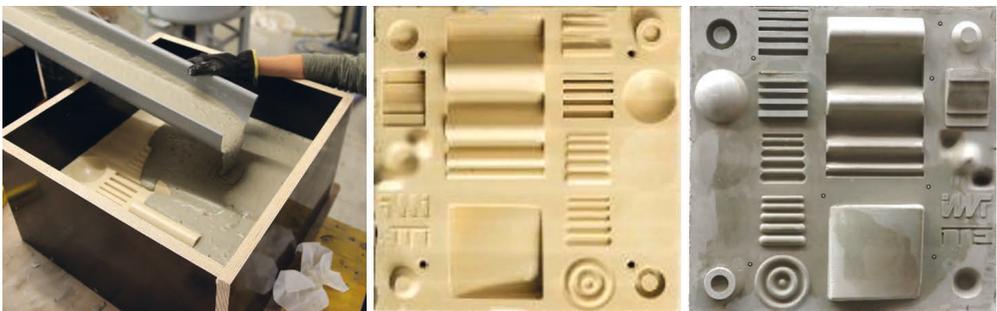
Durch den visuellen Vergleich der mit UHPC abgegossenen Wachsschalungen (Bild 16, Mitte) und dem UHPC-Abguss selbst (Bild 16, rechts) zeigen sich hier am Beispiel der Blockgeometrie A die geometrischen Möglichkeiten und Einschränkungen der Wachsschalungstechnologie. Generell lässt sich feststellen, dass mit der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie

ishing with polishing pins is regarded as critical, since, based on experience with cutting tools with a defined cutting edge, the pore space is likely to clog quickly and cutting can no longer take place.

As already described, machining under compressed air and polymer solution leads to comparable results to dry machining with regard to the achieved surface roughness at high feed rates. The main advantage of the polymer solution is the almost complete avoidance of clogging at the tool cutting edges and, if present, in the cooling channels. For machining under polymer solution, a suitable chip removal concept must be available in the machine tool to prevent agglomeration of chips in the lubricant-conveying lines and clogging of the slotted screens. For this purpose, it is advisable to first collect coarse chips directly in the machining area. Fine chips can be filtered with suitable gravity precoat filters. Another possibility is the use of a chamber filter, also called a sedimentation filter. In this case, the fine chips float on top and can be skimmed off. The last stage of the chamber filter thus pumps only cleaned cooling lubricant back into the circuit.

#### 4.4 Casting the wax formwork with UHPC

The wax formwork panels milled at the IMF were placed into a standard formwork at the ITE, coated with a thin layer of release agent and cast with UHPC (Fig. 16, left).



**Bild 16:** Herstellung der UHPC-Proben (Block A); von links nach rechts: Betonieren, CPW-Wachsschalung nach dem Ablösen des UHPC, UHPC-Abguss | **Fig. 16:** Manufacturing of UHPC samples (type A); from left to right: casting with UHPC, CPW wax formwork after demoulding, UHPC cast

auch großformatige, stark strukturierte UHPC-Bauteile detailgetreu hergestellt werden können. Besonders die robusten uni- und multidirektional gekrümmten Oberflächen, die runden und pyramidenförmigen Stümpfe sowie die abgerundeten Stege und Nuten zeigen ein sehr stabiles und detailgetreues Abformungsverhalten im UHPC. Einschränkungen gibt es hingegen bei den feingliedrigen Elementen wie der Schrift und den rechteckigen Stegen und Nuten. Die herausstehenden rechteckigen Stege auf dem Wachsblock (seitlicher Entformungswinkel von 2°) reißen ab einem Aspektverhältnis > 1 beim Entschalungsprozess ab. Bei den Nuten verhält es sich ähnlich, nur dass hier ab einem Aspektverhältnis > 4 der UHPC im Entschalungsprozess abreißt und in der Wachsschalung verbleibt. Die so aufgezeigten Grenzen sind beim Entwurf von Betonbauteilen unter Verwendung von Wachsschalungen zu berücksichtigen.

### 5 Optische Vermessung der Wachsschalungen und der Betonabgüsse

Die CFW-Wachsschalungen (Wachsschalafeln) wurden jeweils vor und nach dem UHPC-Abguss zusammen mit den UHPC-Abgüssen selbst bei der Firma GOM mbH, Braunschweig, mit einem handelsüblichen 3D-Scanner (Typ ATOS) digitalisiert. Mit der Software GOM Inspect [7] wurde eine Form- und Maßanalyse im Vergleich zu den ursprünglichen CAD-Daten durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

By visually comparing the wax moulds cast with UHPC (Fig. 16, centre) and the UHPC cast itself (Fig. 16, right), the geometric possibilities and limitations of the wax mould technology are shown here using the example of block geometry A. In general, it can be said that the non-waste wax formwork technology can also be used to produce large-format, highly structured components made of UHPC with great attention to detail. Especially the robust uni- and multidirectional curved surfaces, the round and pyramid-shaped dies as well as the rounded webs and grooves show a very stable and detailed impression behaviour in UHPC. However, there are limitations with the finely structured elements such as the lettering and the rectangular bars and grooves. It was found that the protruding rectangular bars on the wax block (lateral demoulding angle of 2°) break off during the demoulding process if the aspect ratio is greater than 1. The situation is similar with the grooves, except that from an aspect ratio greater than 4, the UHPC breaks off during the demoulding process and remains in the wax mould. The limits shown in this way must be taken into account when designing concrete components using wax formwork.

### 5 Optical measurement of milled formwork and concrete casts

The CFW wax formwork panels were each digitalised before and after the UHPC casting together with the UHPC castings themselves

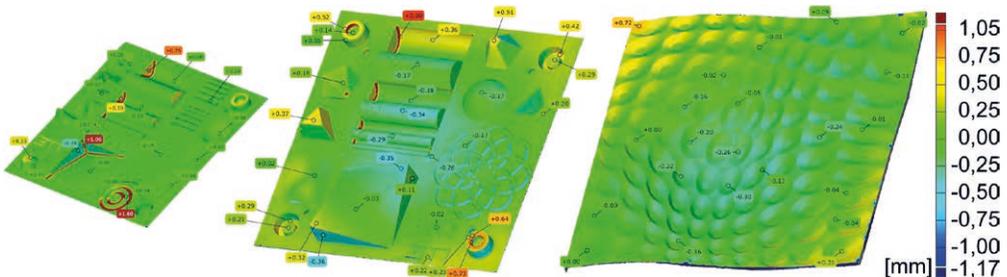


Bild 17: Vergleich zwischen Scandaten der CFW-Wachsblöcke A-C und dem CAD-Datensatz | Fig. 17: Comparison between the scan data of the CFW wax blocks A-C and the original CAD data set of formwork



**Bild 18:** Vergleich zwischen Scandaten der CFW-Wachsblöcke A–C vor und nach dem Abguss mit UHPC | **Fig. 18:** Comparison between the scan data of the CFW wax blocks A–C before and after the UHPC cast

Der erste Flächenvergleich (Bild 17) zeigt im Falschfarbenbild den senkrechten Abstand jedes einzelnen gescannten Polygonpunktes (IST des real hergestellten Wachsblockes) in Bezug zu dem originalen CAD-Wert der Zeichnung (SOLL).

Bei den Wachsschalungen der Blöcke A–C weisen die ebenen, uni- und multidirektional gekrümmten Oberflächen eine Genauigkeit im Zehntelmillimeterbereich gegenüber dem CAD-Datensatz auf. Größere Abweichungen im Millimeterbereich sind lediglich an den vertikalen bzw. 2° geneigten Flanken, an rechtwinkligen Innenkanten und in den Senken der kreisförmigen Wellengeometrie zu finden.

Durch den Vergleich der Scandaten der Wachschalungen der Blöcke A–C vor und nach dem Abguss mit UHPC (Bild 18) wird deutlich, dass diese auch nach einer Beanspruchung durch den Frischbetondruck des UHPC und die Kräfte beim Entschalen eine sehr hohe Formtreue aufweisen und ohne weiteres wiederverwendet werden könnten.

at GOM mbH, Braunschweig, using a standard 3D scanner (type ATOS). The GOM Inspect software [7] was used to perform a shape and dimensional analysis in comparison to the original CAD data. The results are presented below.

The first surface comparison (Fig. 17) shows in the false-color image the vertical distance of each scanned polygon point (ACTUAL of the actually produced wax block) in relation to the original CAD value of the drawing (NOMINAL).

In the wax moulds of blocks A–C, the plane, uni- and multidirectionally curved surfaces have an accuracy in the tenth of a millimetre range compared to the CAD data set. Larger deviations in the millimetre range are only found on the vertical or 2° inclined flanks, on right-angled inner edges and in the depressions of the circular wave geometry.

By comparing the scan data of the wax moulds of blocks A–C before and after casting with



**Bild 19:** Flächenvergleich zwischen Scandaten der hergestellten UHPC-Abgüsse und CAD-Datensätzen | **Fig. 19:** Surface comparison between the scan data of the UHPC casts and the original CAD data

In Analogie zum ersten Flächenvergleich des Wachsblockes wurden auch die Scandaten des UHPC-Abgusses mit dem CAD-Datensatz des herzustellenden Bauteils verglichen (Bild 19). Hier wurde eine für das Bauwesen sehr hohe Präzision erreicht. Wie in Bild 19 dargestellt, entstehen durch den UHPC-Abguss an den jetzt invertierten Bereichen der Formenbausteine, wie z. B. einigen Flanken, rechtwinkligen Außenkanten und in den Erhöhungen der kreisförmigen Wellengeometrie, etwas höhere Abweichungen analog zur bereits beschriebenen Abweichung der Wachsschalung.

Anhand der durchgeführten Maßanalysen wird deutlich, dass sich das ausgewählte Wachs CFW auch bei vergleichsweise großen Bauteilabmessungen sehr präzise spanend bearbeiten lässt und die im Wachs gefertigten Geometrien eine für das Bauwesen überaus hohe Formtreue der UHPC-Abgüsse aufweisen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen im Forschungsprojekt haben gezeigt, dass sich das ausgewählte Industriegusswachs CFW für die Herstellung von präzisen Schalungen für komplexe, frei geformte Bauteile aus Beton und insbesondere UHPC eignen. Die physikalisch-technischen Eigenschaften, wie der E-Modul und die Festigkeit, liegen dabei für die Anwendung im Betonschalungsbau bei Temperaturen bis 40 °C in einem günstigen Bereich: starr genug, um hohen Frischbetondrücken standzuhalten und weich genug für eine effiziente spanende Bearbeitung. Die Bearbeitbarkeit des Industriegusses mittels CNC-gesteuerter Zerspänung konnte am IWF durch geeignete Werkzeuge und Bearbeitungsparameter nachgewiesen und effizient gestaltet werden. Hinsichtlich der eingesetzten Werkzeuge wurden der Messerkopfräser mit einer Schneidenanzahl  $z = 8$  sowie der Walzenstirnfräser als gut geeignet identifiziert, um bei moderaten Vorschubgeschwindigkeiten ( $v_f < 15 \text{ m/min}$ ) hohe Zeitspannvolumen bei guter Oberflächenqualität zu fertigen. Diese Werkzeuge eignen sich zudem sehr gut zur Schrupp-

UHPC (siehe Fig. 18), es wird deutlich, dass sie eine sehr hohe dimensionale Genauigkeit auch nach dem Fräsen mit dem frischen Beton drücken der UHPC und den Kräften beim Entformen aufweisen und wiederverwendet werden können.

In Analogie zum ersten Oberflächenvergleich des Wachsblockes, wurden die Scandaten der UHPC-Gießung ebenfalls mit dem CAD-Datensatz des zu produzierenden Bauteils verglichen (Fig. 19). Hier wurde ein sehr hohes Maß an Präzision für die Bauindustrie erreicht. Wie in Fig. 19 zu sehen ist, zeigen die UHPC-Gießungen geringfügig höhere Abweichungen an den nun invertierten Bereichen der Formblöcke, wie zum Beispiel an den Flanken, rechten Außenkanten und in den Erhöhungen der kreisförmigen Wellengeometrie, analog zur Abweichung der Wachsschalung bereits beschrieben.

Auf Basis der Dimensionalanalysen ist es klar, dass das gewählte CFW-Wachs auch bei vergleichsweise großen Bauteilabmessungen sehr präzise spanend bearbeitet werden kann, und dass die Geometrien, die in dem Wachs hergestellt werden, eine extrem hohe dimensionale Genauigkeit für UHPC-Gießungen in der Bauindustrie aufweisen.

## 6 Summary and conclusion

The investigations carried out in the research project have shown that the selected CFW industrial wax is suitable for the production of precision formwork for complex, freely formed components made of concrete and especially UHPC. The physical-technical properties, such as the modulus of elasticity and strength, are in a favourable range for use in concrete formwork construction at temperatures up to 40 °C: rigid enough to withstand high fresh concrete pressures and soft enough for efficient machining. The machinability of the industrial wax by means of CNC-controlled machining could be proven and efficiently designed at the IMF by using suitable tools and machining parameters. With regard to the tools used, the cutter head

bearbeitung ebener Bauteile, da mit hohen Zustellertiefen gefräst werden kann.

Zur Fertigung von Nuten und feinen Strukturen kamen Schafffräser zum Einsatz, deren Durchmesser der jeweiligen Strukturfeinheit angepasst wurden. Bei der Fertigung von Nuten und Stegen ist eine minimale Stegbreite zwischen den einzelnen Strukturen von 5 mm einzuhalten, um Ausbrüche und Beeinflussungen angrenzender Elemente zu vermeiden. Die einzelnen Formenbausteine wurden mit hoher Präzision gefertigt, die resultierenden Oberflächenrauheiten hatten keinen Einfluss auf die spätere Entformbarkeit des Betonabgusses. Es wurden sowohl mehrfach gekrümmte Flächen als auch Elemente mit hohen Aspektverhältnissen gefertigt, wobei sich die Spanabfuhr aus der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück als wichtiger Einfluss herausgestellt hat. Es ist zu empfehlen, die Schlichtbearbeitung gefertigter Wachsschalungen mit einer Bürstoperation abzuschließen, um so Restspäne aus den Formenbausteinen zu entfernen. Ein Verschleiß der eingesetzten Werkzeuge lag bei der Zerspannung des Wachses CFW nicht vor. Auftretende Anhaftungen an den Werkzeugen konnten durch den Einsatz von Druckluft teilweise und unter Verwendung von Kühlschmierstoff beinahe vollständig vermieden werden.

Es wurde gezeigt, dass nicht nur die Wachsschalungen, sondern auch die damit hergestellten Betonbauteile eine für das Bauwesen sehr hohe Präzision aufweisen. Vornehmlich einiger punktueller fertigungsbedingter Abweichungen liegen die gemessenen Herstellungstoleranzen lediglich im Zehntelmillimeterbereich.

Durch die Möglichkeit, die erzeugte Wachsspäne sowie die ausgedienten Wachsschalungselemente durch Einschmelzen vollständig wiederzuverwenden (*Closed Loop Recycling*), stellt die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie eine ökologisch und ökonomisch effiziente Alternative zu den heutigen Freiformschalungen dar. Durch das Einschmelzen des Wachses können die Materialkosten dabei je Einsatz auf ein vergleichbares Kostenniveau von E-PS und X-PS gesenkt

with a number of cutting edges  $z = 8$  and the shell end mill were identified as being well suited to produce high metal removal rates with good surface quality at moderate feed rates ( $v_f < 15$  m/min). These tools are also very well suited for roughing flat components, since milling can be carried out with high infeed depths. For the production of grooves and fine structures, end mills were used whose diameters were adapted to the respective structural fineness. When manufacturing grooves and webs, a minimum web width between the individual structures of 5 mm must be maintained in order to avoid chipping and influencing adjacent elements. The individual mould modules were manufactured with high precision, the resulting surface roughness had no influence on the later demoldability of the concrete cast. Both multi-curved surfaces and elements with high aspect ratios were manufactured, whereby the chip removal from the contact zone between tool and workpiece proved to be an important influence. It is recommended to finish the finishing of manufactured wax moulds with a brushing operation to remove residual chips from the mould components. There was no wear of the tools used when machining the CFW wax. Adhesions on the tools could be partly avoided by using compressed air and almost completely by using cooling lubricant.

It was shown that not only the wax formwork, but also the concrete components produced with it exhibit a very high precision for the construction industry. Mainly some punctual production-related deviations, the measured production tolerances are only in the range of a tenth of a millimetre.

Due to the possibility of completely reusing the produced wax chips as well as the used wax formwork elements by melting them down (closed loop recycling), the non-waste wax formwork technology represents an ecologically and economically efficient alternative to today's open-face formwork. By melting down the wax, the material costs per application can be reduced to a comparable cost level of E-PS and X-PS, while significantly better material prop-

werden, wohingegen aber deutlich bessere Materialeigenschaften – vergleichbar mit denen von Polyurethan (Dichte: 700 kg/m<sup>3</sup>) – erreicht werden. Als Ergebnis des Forschungsprojektes ist das Industriewachs CFW unter der Bezeichnung „ConFormWax“ (*Concrete Formwork Wax*) jetzt als Schalungswachs auf dem Markt erhältlich.

Basierend auf diesen guten grundlegenden Ergebnissen und dem Bedürfnis der Industrie nach nachhaltigen Freiformschalungen soll die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie zukünftig in industriellen Anwendungen umgesetzt werden. In zwei Forschungsprojekten wird derzeit am ITE gemeinsam mit Industriepartnern die Weiterentwicklung und damit Übertragbarkeit der Technologie in die Industrie erarbeitet.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 257109752 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

erties – comparable to those of polyurethane (density: 700 kg/m<sup>3</sup>) – are achieved. As a result of the research project, the CFW industrial wax is now available on the market as formwork wax under the name “ConFormWax” (Concrete Formwork Wax).

Based on these good basic results and the industry's need for sustainable open-ended formwork, the non-waste wax formwork technology is to be implemented in industrial applications in the future. Two research projects are currently being carried out at the ITE together with industrial partners to further develop the technology and thus make it transferable to industry.

## Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (number 257109752) within the Priority Programme SPP 1542.

## Literatur | References

- [1] Kloft, H.; Mainka, J.; Ledderose, L.; Neudecker, S.; Petri, J.: Hochleistungswerkstoff – Bauen mit Beton im Zeitalter digitaler Planung und Fertigung. DBZ – Deutsche Bauzeitschrift (2016) 2, S. 60–64
- [2] Mainka, J.; Kloft, H.; Baron, S.; Hoffmeister, H.-W.; Dröder, K.: Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisionsschalungen aus recycelbaren Industriewachsen. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 784–793
- [3] Mainka, J.; Heinemann, T.; Kloft, H.: A novel recyclable wax formwork-system for high-precision free-form UHPC members and joints. In: Brasil, R.; Pauletti, R. (Hrsg.): Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints – Proc. of the IASS-SLTE 2014 Symp., 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 2014, 8 S.
- [4] Mainka, J.; Kloft, H.; Stein, E.: A novel precise formwork technology based on CNC milled recyclable industrial wax for the casting of geometrically complex concrete elements. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Symp. 2015 & ISOFF Symp., 17.–20.08. & 16./17.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-517423, publiziert auf USB-Stick: 12 S.
- [5] Mainka, J.; Kloft, H.; Stein, E.; Wirth, F.: Non-Waste wax formwork-technology: Innovative precision formwork for concrete members made of recyclable industrial waxes. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, Beitrag Nr. 9575, Book of Abstracts: S. 180, Langfassung digital: 10 S.
- [6] Mainka, J. L. C.: Non-Waste-Wachsschalungen – Entwicklung einer Wachsschalungstechnologie für geometrisch komplexe Betonbauteile (Non-Waste-Wax-Formwork technology). Diss., TU Braunschweig, 2019 – <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201906111155-0>
- [7] GOM Inspect – Auswertesoftware für 3D-Messdaten. Download: <http://www.gom.com/de/3d-software/gom-inspect.html> [Zugriff: 02.08.2016]

## Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures: 1, 2, 11, 12, 14, 16–19: Jeldrick Mainka, ITE TU Braunschweig
- Bilder | Pictures: 3–10, 13, 15: Sarah Baron

## Projektdaten | Project data

### Allgemeine Angaben | General information

Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisions-Schalungen aus 100 % recycelbaren Industrie-Wachsen zur Herstellung von geometrisch komplexen Beton-Bauteilen | Non-Waste-Wax-Formwork: Novel precise formwork-technology on basis of 100% recyclable industrial wax for the fabrication of geometrically complex concrete elements

Antragsteller 1   Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder Institutsleiter   Institute's director
DFG-Geschäftszeichen   DFG reference number:	DR 973/3-1 (Projektnummer   Project number: 257109752)
Adresse   Address:	TU Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), Langer Kamp 19b, 38106 Braunschweig
Kontakt   Contact:	+49 531 391 7600   k.droeder@tu-braunschweig.de   <a href="https://www.tu-braunschweig.de/iwf/fup">https://www.tu-braunschweig.de/iwf/fup</a>
Antragsteller 2   Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft Institutsdirektor   Institute's director
DFG-Geschäftszeichen   DFG reference number:	KL 2119/2-1 (Projektnummer   Project number: 257109752)
Adresse   Address:	TU Braunschweig, Institut für Tragwerksentwurf (ITE), Pockelsstraße 4, 38106 Braunschweig
Kontakt   Contact:	+49 531 391 3571   h.kloft@tu-braunschweig.de   <a href="http://www.ite.tu-bs.de">www.ite.tu-bs.de</a>
Berichts-/Förderzeitraum   Reporting/funding period:	01.12.2014–29.11.2016
Team   Team:	IWF: Sarah Baron, Hans Werner Hoffmeister ITE: Jeldrik Mainka

### Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Mainka, J.; Heinemann, T.; Kloft, H.: A novel recyclable wax formwork-system for high-precision free-form UHPC members and joints. In: Brasil, R.; Pauletti, R. (Hrsg.): Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints – Proc. of the IASS-SLTE 2014 Symp., 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 2014, 8 S.
- Mainka, J.; Kloft, H.; Stein, E.: A novel precise formwork technology based on CNC milled recyclable industrial wax for the casting of geometrically complex concrete elements. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Symp. 2015 & ISOFF Symp., 17.–20.08. & 16./17.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-517423, publ. auf USB-Stick: 12 S.
- Kloft, H.; Mainka, J.; Ledderose, L.; Neudecker, S.; Petri, J.: Hochleistungswerkstoff – Bauen mit Beton im Zeitalter digitaler Planung und Fertigung. DBZ – Deutsche Bauzeitschrift (2016) 2, S. 60–64
- Mainka, J.; Kloft, H.; Baron, S.; Hoffmeister, H.-W.; Dröder, K.: Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisionsschalungen aus recycelbaren Industriewachsen. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 784–793
- Mainka, J.; Kloft, H.; Stein, E.; Wirth, F.: Non-Waste wax formwork-technology: Innovative precision formwork for concrete members made of recyclable industrial waxes. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, Beitrag Nr. 9575, Book of Abstracts: S. 180, Langfassung digital: 10 S.
- Hermann, E.; Mainka, J. L. C.; Lindemann, H.; Wirth, F.; Kloft, H.: Digitally Fabricated Innovative Concrete Structures. In: Teizer, J.; König, M. (Hrsg.): Proc. of the 35<sup>th</sup> Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2018), 20.–25.07.2018 in Berlin, 2018, Beitrag Nr. 127, S. 553–560 (publ. digital), 8 pages – <https://doi.org/10.22260/ISARC2018/0077>
- Mainka, J.; Wirth, F.; Herrmann, E.; Kloft, H.: INDUSTRIALIZING THE NON-WASTE-WAX-FORMWORK TECHNOLOGY. In: Proc. of the 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete (ICCDF) 2018, 10.–12.09.2018 in Zürich (Schweiz), 2018, S. 153–154 (published digitally)

## Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

### Dissertationen | Dissertations

- Mainka, J. L. C.: Non-Waste-Wachsschalungen – Entwicklung einer Wachsschalungstechnologie für geometrisch komplexe Betonbauteile (Non-Waste-Wax-Formwork technology). ITE, 2019 – <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201906111155-0>
- Wirth, F. W.: Untersuchungen zur Eignung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen. ITE, 2020 – [https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs\\_mods\\_00068999](https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs_mods_00068999)

### Folgeprojekte | Follow-up projects

- Modulares und vollautomatisiertes Fertigungsverfahren für frei geformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von technischen Wachsen | Development of a modular and fully automatic production process for freeform concrete formwork in building construction based on technical wax

Antragsteller   Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Förderer   Funding:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), ZIM
Laufzeit   Period:	01.04.2017–31.03.2019
Partner   Partner:	B+S Engineering, Rheine
Web:	<a href="https://www.tu-braunschweig.de/ite/forschung/modularewachsschalung">https://www.tu-braunschweig.de/ite/forschung/modularewachsschalung</a>

- Innovative Non-Waste-Wachsschalungen für die Herstellung von hochpräzisen Maschinengestellen aus UHPC | Innovative Non-Waste-Wax-Formwork for the fabrication of high-precision machine frames made by UHPC

Antragsteller   Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Mitverantwortliche   Co-Investigators:	Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann (TU Braunschweig), Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder, Prof. Dr. Henning Menzel (TU Braunschweig)
Förderer   Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt   Knowledge Transfer Project
Laufzeit   Period:	01.01.2018–31.12.2019
Partner   Partners:	Sudholt-Wasemann GmbH, Herzebrock-Clarholz Dyckerhoff GmbH, Wiesbaden
Web:	<a href="https://www.tu-braunschweig.de/ite/forschung/innovativewachsschalungen">https://www.tu-braunschweig.de/ite/forschung/innovativewachsschalungen</a>

- SFB/Transregio 277: Additive Fertigung im Bauwesen – Die Herausforderung des großen Maßstabs | CRC/Transregio 277: Additive manufacturing in construction – The challenge of large scale

Sprecher   Speaker:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Förderer   Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 277
Laufzeit   Period:	seit   since 01.01.2020
Partner   Partner:	TU München
Web:	<a href="https://www.tu-braunschweig.de/trr277">https://www.tu-braunschweig.de/trr277</a>

### Sonstige Aktivitäten | Special activities

- 14.02.2017, 61. Ulmer BetonTage: Innovationspreis 2017 der Zulieferindustrie Betonbauteile für die Entwicklung von Non-Waste-Präzisionsschalungen aus 100 % recycelbaren Industriewachsen | Innovation Prize of the Supplier Industry for Structural Concrete Products 2017 for the development of non-waste precision formwork made of 100% recyclable industrial waxes
- Jeldrik Mainka: Matthäi-Preis der Fakultät 3 Architektur, Bau- und Umweltwissenschaften der TU Braunschweig für die Dissertation, Braunschweig 2020 | Matthäi-Prize of the Faculty 3 Architecture, Building and Environmental Sciences of the TU Braunschweig for the dissertation, Braunschweig 2020