

# 1 Einleitung

## *Introduction*

Die Verarbeitung des Werkstoffes Glas hat eine Historie, die mehrere Jahrtausende zurückreicht. Bereits vor 5000 Jahren wurde natürlich vorkommendes Glas, der Obsidian, zur Herstellung von Schneidwerkzeugen verwendet [SCHO88, S. 1]. Komplex geformte Gläser dünner Wandstärke haben nachweislich seit mehr als 2000 Jahren eine Bedeutung für die Menschheit [CUMM97, S. 25]. In Syrien wurden bereits 800 v. Chr. Schalen durch Senken hergestellt [CUMM02, S. 102]. In der Werkstatt des PHIDIAS wurden im hellenistischen Griechenland 500 v. Chr. großflächige Glasplatten in keramischen Formwerkzeugen, beispielsweise für die Darstellung der Gewänder von Götterstatuen, umgeformt – diese Formwerkzeuge werden mit hoher Sicherheit der Zeus-Statue des PHIDIAS zugeordnet [CUMM97, S. 34-35]. Bei den Römern wurden Platten aus Glas durch Schwerkraftsenken in dreidimensionale Geometrien wie zum Beispiel Teller umgeformt [CUMM97, S. 11]. Durch die Entwicklung der Glasbläserei hin zu protoindustriellen Maßstäben gelang den Römern jedoch die Fertigung von hohen Stückzahlen, wodurch das Wissen um das Schwerkraftsenken vorerst in Vergessenheit geriet [CUMM97, S. 24].

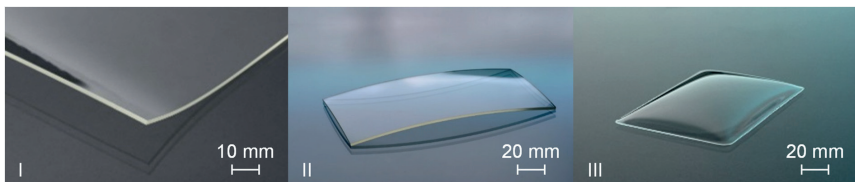
Die Herstellung farbloser Gläser wurde im 15. Jhd. möglich und war ein wesentlicher Fortschritt der Glasindustrie. Zuvor waren die in Deutschland hergestellten Gläser grünlich gefärbt, weil statt Soda die eisenreiche, aus Holz gewinnbare Pottasche als Alkalirohstoff verwendet wurde. In Folge der industriellen Revolution zu Beginn des 20. Jahrhunderts erreichte die Glasindustrie mit der maschinellen Glasherstellung ihren zweiten Höhepunkt. Während dieser Zeit erfolgte ebenfalls eine Wiederbelebung der Verformung von flachen Glasplatten. [CUMM97, S. 35; SCHO88, S. 1-2]

Im Kontext des 21. Jahrhunderts ist der Werkstoff Glas weiterhin ein Hauptbestandteil des täglichen Lebens. Besonders im Bereich der Herstellung immer dünner werdender Gläser konnten durch innovative Glasherstellungsverfahren wie dem von SCHOTT entwickelten Down-Draw Prozess in den letzten Jahren kontinuierlich Fortschritte erzielt werden. Dabei wird ein Glasband von oben über Walzen, die durch geringer werdenden Abstand zueinander kontinuierlich die Dicke des Glasbandes verringern können, durch eine Kühlstrecke nach unten gezogen. [SCHO19a, S. 1]

Durch die hohe Kratzfestigkeit und das geringe Gewicht ergeben sich stetig neue Einsatzmöglichkeiten für komplex geformte, dünne Gläser, die heutzutage zum Beispiel in kleinen und mittelgroßen Serien von Fahrzeugen und vernetzten Geräten zu finden sind. Aufgrund der damit einhergehenden, marktseitig geforderten, hohen Stückzahlen sollen nicht-isotherme Prozesse angewandt werden. Das sind Prozesse, bei denen das umzuformende Glas und das Formwerkzeug einen signifikanten Temperaturgradienten aufweisen. So können die Werkzeugbelegungszeit und somit die Taktzeit stark reduziert werden. Dabei wird Glas auf ein Formwerkzeug gelegt und beides zusammen in einen Heizraum eingebracht. Durch Wärmeaustausch stellt sich in der Regel

eine höhere Glastemperatur ein, da das Glas isoliert platziert ist, während die Temperatur des Formwerkzeugs durch Wärmeleitung reduziert wird.

Durch Wärmeströme stellt sich in der Regel (bis auf den Kontaktbereich) eine heißere Glastemperatur ein. Danach können unterschiedliche Heißformgebungsprozesse angewandt werden, deren Erzeugnisse in Abbildung 1.1 beispielhaft dargestellt sind. Bei dem Schwerkraftsenken formt sich das Glas allein durch sein Eigengewicht um (Bild I). Beim vakuumunterstützten Senken wird zusätzlich zur vorliegenden Schwerkraft ein Unterdruck appliziert, der für eine höhere Umformung sorgen kann (Bild II). Wird darüber hinaus ein Niederhalter verwendet, der die Kanten des Glases eingespannt, liegt ein Tiefziehprozess vor (Bild III). Weitreichendes Potential dieser drei Verfahren liegt in einer deutlichen Zeit- und Temperaturreduzierung, die das Umformen mit Formwerkstoffen niedriger Temperaturbeständigkeiten ermöglicht. In dieser Arbeit wird das vakuumunterstützte Senken fokussiert. [VOGE19a]



**Abbildung 1.1: Erzeugnisse replikativer Glasheißformgebungstechnologien (I Ausschnitt einer Mittelkonsole; II Spiegelsubstrat eines Head-up-Display (HUD); III Smartphone Abdeckglas)**

*Products of replicative glass hot forming technologies (I Section of a Center Console; II Mirror substrate of a Head-up-Display (HUD); III Smartphone Coverglass)*

Das begrenzte Prozessverständnis des vakuumunterstützten Senkens stellt das bedeutendste Problem dar. Mangelnde Kenntnis über Grenzen des Prozesses und fehlende Expertise signifikanter Einflussfaktoren für eine beschreibbare Ausformung resultieren in einem derzeit begrenzten Einsatz des Verfahrens. Durch unterschiedliche Randbedingungen besteht eine geringe Übertragbarkeit von Prozessmodellen anderer Umformverfahren, insbesondere in Bezug auf die nicht-isotherme Temperaturführung und die vielschichtigen Wärmeübergangsmechanismen.

Daher liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Entwicklung eines empirischen Prozessmodells, welches das vakuumunterstützte Senken quantitativ hinreichend genau beschreibt und auf dessen Basis eine gezielte Prädiktion der Formgenauigkeit erfolgen kann. Das empirische Modell dieser Arbeit wird durch die Auswertung von Versuchsdaten entwickelt. Mittels Wärmetransportgleichungen kann ein analytischer Ansatz der Temperaturverteilung gebildet werden. Des Weiteren wird eine analytische Beschreibung des Drucks in der Formwerkzeugkavität entwickelt. Das empirische und analytisch erweiterte Modell wird durch ein FEM-Modell ergänzt, mit dessen Hilfe Ursache- und Wirkungszusammenhänge der Erwärmung und Umformung beschrieben und erklärt werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse werden auf Demonstratoren zur Validierung übertragen und angewandt.

# Introduction

## Einleitung

The processing of glass has a long history that goes back several millennia. Already 5000 years ago naturally occurring glass, the obsidian, was used for the production of cutting tools [SCHO88, S. 1].

Complexly shaped glasses with thin walls have been of proven importance to mankind for more than 2000 years [CUMM97, S. 25]. In Syria already 800 B.C. bowls were produced by slumping [CUMM02, S. 102]. In the workshop of PHIDIAS in Hellenistic Greece 500 B.C. large glass sheets were formed in ceramic forming tools, for example for the representation of the robes of statues of gods – these forming tools are assigned with a high degree of certainty to the Zeus statue of PHIDIAS [CUMM97, S. 34-35].

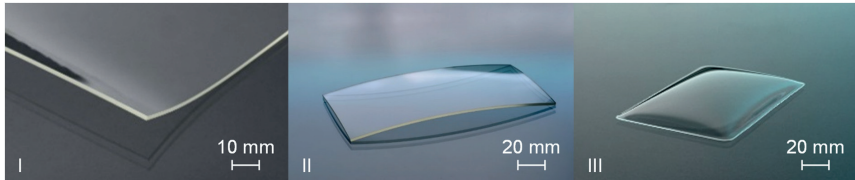
The Romans also used to form glass disks into three-dimensional geometries such as plates by means of gravity slumping [CUMM97, S. 11]. However, the development of glassblowing towards proto-industrial standards enabled the Romans to produce large quantities, which meant that the knowledge of gravity slumping was forgotten for the time being [CUMM97, S. 24].

The production of colorless glass was made possible in the 15th century and was an essential step in the development of the glass industry. Previously, the glasses produced in Germany were greenish in color, because instead of soda ash, the iron-rich potash, which can be extracted from wood, was used as an alkaline raw material. In the course of the industrial revolution around 1900, the glass industry reached its second peak with the mechanical production of glass. During this time the deformation of flat glass plates was also revived. [CUMM97, S. 35; SCHO88, S. 1-2]

In the context of the 21st century the material glass is still a main component of daily life. Particularly in the area of manufacturing of ever thinner glass, innovative glass manufacturing processes such as the down-draw process developed by SCHOTT have made continuous progress in recent years. In this process, a glass ribbon is drawn downwards through a cooling section from above over various rollers, which can continuously reduce the thickness of the glass ribbon by decreasing the distance between them. [SCHO19a, S. 1]

The comparatively high scratch resistance and low weight constantly opens up new applications for complexly shaped, thin glasses, which can already be found today, for example, in small and medium-sized series of vehicles and networked devices. Due to the associated high production volumes demanded by the market, the fastest possible processes should be applied. So-called non-isothermal processes, in which the glass to be formed and the forming tool have a significant temperature gradient, can greatly reduce the tool occupancy time and thus the cycle time. The glass is placed on a forming tool and both are transported together into a furnace room. Complex heat flows usually result (except for the contact area) in a hotter glass temperature. Different hot forming processes can then be applied, the products of which are shown in Figure 1.2.

In the gravity slumping process, the glass is transformed by its own weight alone (Fig. I). In vacuum-assisted slumping, a vacuum is applied in addition to the existing force of gravity, which can ensure a higher degree of forming (Fig. II). If a hold-down device is also used for this additional application, a deep-drawing process is applied (Fig. III). The far-reaching potential of these three processes lies in a significant reduction in time and temperature, which reduces forming tool wear and enables forming with forming tool materials of lower temperature resistance. In this thesis, vacuum-assisted slumping is focused. [VOGE19a]



**Figure 1.2: Products of replicative glass hot forming technologies (I Section of a Center Console; II Mirror substrate of a Head-up-Display (HUD); III Smartphone Cover-glass)**

*Erzeugnisse replikativer Glasheißformgebungstechnologien (I Ausschnitt einer Mittelkonsole; II Spiegelsubstrat eines Head-up-Display (HUD); III Smartphone Abdeckglas)*

The limited process understanding of vacuum-assisted slumping is the most significant problem, which is further complicated by resource intensive test series and high reject rates. A lack of knowledge about the limits of the process and a lack of expertise in significant factors for a describable design result in a currently limited use of the process. Due to different boundary conditions, there is still a low transferability of process models of other forming processes, especially with regard to non-isothermal temperature control and complex heat transfer mechanisms.

Thus, the focus of this thesis is on the development of an empirical and analytical extended process model, which describes vacuum-assisted slumping qualitatively and quantitatively with sufficient accuracy and on the basis of which a targeted prediction of the shape accuracy can be made.

The empirical model of this work is developed by evaluating experimental data. By means of heat transport equations an analytical approach can be formed. Furthermore, an analytical approach for the time dependent pressure in the forming tool cavity is developed. The empirical and analytically extended model is supplemented by an FEM model, which can be used to describe and explain cause-and-effect relationships between heating and forming.

The knowledge gained will be transferred and applied to demonstrators.