

CES Seminar

Cand.-Ing.: Minjie Tang

Matr.-Nr.: 270832

Kurzthema: Numerische Modellierung für den Herstellungsprozess der Optiken Linsen

Betreuender Assistent: M.Sc. Yang Wang

Aachen, den 15.05.2014

Inhalt und Ergebnis dieser Arbeit sind ausschließlich zum internen Gebrauch bestimmt. Alle Urheberrechte liegen bei der RWTH Aachen. Ohne ausdrückliche Genehmigung des betreuenden Lehrstuhls ist es nicht gestattet, diese Arbeit oder Teile daraus an Dritte weiterzugeben.

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	2
1	Einleitung	3
2	Prozess Beschreibung	4
2.1	PGM	4
2.2	NGM	5
2.3	Glasfaser Ziehprozess	5
3	Grundlage der Glasmaterial	6
3.1	Viscoelastät	6
4	Wärmübertragungsmodel bei Glass Molding	8
4.1	Wärmeübertragung bei Radiation in Glas.....	8
4.2	Raytracing.....	9
4.2.1	Rossland Methode	10
4.2.2	Bemerkung.....	11
5	Zusammenfassung und Ausblick	12
II	Literaturverzeichnis	13

1 Einleitung

Hohe Präzise Glass Molding ist heutzutage eine effektiv Fertigungsmethode für optische Linsen in Serienherstellung. Die FE-Simulation dient dazu den Prozess wirtschaftlicher zu machen und auf Basis von Prozessparametern und Materialien eine Vorhersage über das Endprodukt machen zu können. Ein Problem bei der Entwicklung einer solchen Simulation ist, dass Glas und Werkzeugmaterial während des Pressvorgangs durch hohe Temperaturen mit schnellen Temperaturänderungen und hohen Drücken ausgesetzt sind. Das Glas ändert dabei seinen Aggregatzustand vom festen in den viskoelastischen Zustand und zurück. Dabei spielen sich komplexe Vorgänge zwischen Glas und Werkzeugmaterial ab, was eine Berechnung des Prozesses und eine Vorhersage über das fertige Produkt erschwert, was sich in Abweichungen hinsichtlich Form und Eigenschaften äußert.

In dieser Arbeit wurde einige für FE-Simulation benötigte numerische Modelle diskutiert. Die Arbeit wurde von CES Seminar an Fraunhofer IPT und WZL RWTH Aachen verfasst. Das Ziel war die Untersuchung der numerischer Modell für verschiedene Glass Molding Prozess.

2 Prozess Beschreibung

2.1 PGM

PGM ist eine Abkürzung von Präzisions Glass Molding, wird auch Präzisionsblankpressen genannt, das ist ein mit dem Blankpressen verwandter Prozess, bei dem ein optisches Element aus Glas in seine gewünschte Form gepresst wird, sodass die Optik keine weiteren Prozessschritte, welche die optische Oberfläche verändern, benötigt. Dabei wird ein Glasrohling zusammen mit dem Werkzeug auf eine Temperatur zwischen Transformationstemperatur und Erweichungstemperatur erhitzt und durch das Werkzeug zu einer Linse gepresst. Das Glas nimmt dabei die Form der Werkzeuge an. Es ist keine weitere Nachbearbeitung notwendig. [1] Das Präzisionsblankpressen ist ein isothermer Prozess.

Bei herkömmlichen Methoden zur Herstellung von Glasoptiken wird aus der Schmelze eine Vorform gebildet, welche bei sehr hohen Temperaturen gepresst und sehr langsam abgekühlt wird. Dieser „Rohling“ wird daraufhin mehrfach auf eine endkonturnahe Form geschliffen und durch Polieren in die gewünschte Zielform überführt. Durch Korrekturprozesse werden dabei entstandene Fehler korrigiert. Nach dem abschließenden Reinigungsprozess ist die Linse gebrauchsfertig. [3]

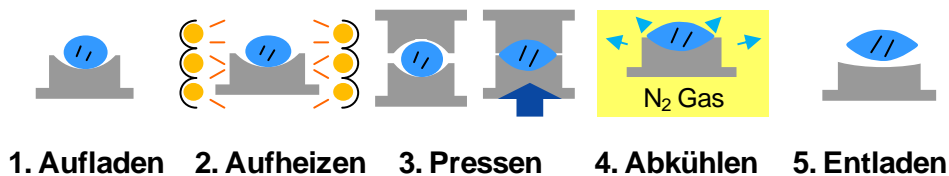


Abbildung 1 Presszyklus PGM

Beim Präzisionsblankpressprozess sind diese zeitaufwändigen materialabtragenden Prozessschritte nicht notwendig. Das Material wird als Rohling zwischen die Werkzeuge gelegt und mit diesen zusammen bis zur Presstemperatur erhitzt. Die Werkzeuge fahren daraufhin aufeinander zu und pressen das Glas mit einer vorher definierten Kraft zu einer Linse. Werkzeug und Glas werden daraufhin wieder gemeinsam abgekühlt und der Prozess kann von neuem beginnen. [2] Der Prozess kann in fünf Hauptschritte gegliedert werden. Abbildung 1 zeigt einen typischen Presszyklus.

2.2 NGM

Non-isothermer Glass Molding ist auch ein Pressprozess, bei dem eine sehr deutliche Temperaturdifferenzen zwischen Werkzeugmaterial und Glass existiert. Wegen Prozessauslegungen besitzt Glasmaterial ebenfalls non-isothermische Temperaturverteilung. Die Temperaturdifferenzen können in einigen Fällen 300 °C betragen.

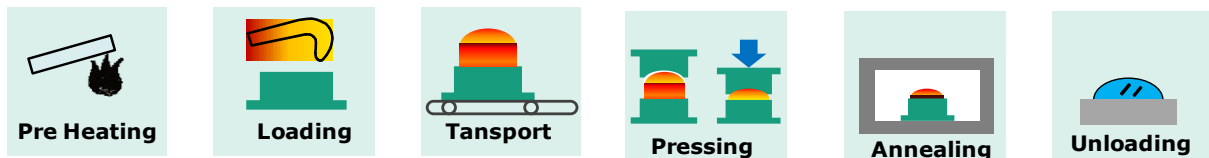


Abbildung 2 Presszyklus NGM

Abbildung 2 zeigt eine Prozessauslegung für Herstellung von Glaslinsen eines Autoscheinwerfers.

2.3 Glasfaser Ziehprozess

Im Vergleich zum obengenannt zwei Prozess, Glasfaser wird in Ziehprozess produziert. Eine Tapered Fiber ist eine Glasfaser mit einem extrem kleinen Durchmesser. Zu ihrer Herstellung nimmt man eine normale Glasfaser und erhitzt sie lokal, etwa mit einem Brenner oder mit einem Kohlendioxidlaser. Dabei wird die Faser an ihren Enden auseinandergezogen, so dass sie dünner und länger wird. Hat die ursprüngliche Faser noch einen Durchmesser von typischerweise 125 μm , liegt der Durchmesser der gezogenen Faser nur noch im Bereich von 0,5 bis 5 μm . Typische gezogene Fasern gehen dabei herstellungsbedingt über einen Übergangsbereich in die normale Faser über. Diese ermöglicht die einfache Einkopplung von Laserlicht in solche Fasern.

Bei einer gezogenen Faser gilt es die einzelnen Bereiche der Faser zu unterscheiden. Eine normale Faser besteht aus einem Kern mit hohem Brechungsindex, der von einem Mantel mit geringerem Brechungsindex umgeben ist. Der Kern mit einem Durchmesser von typischerweise 8 μm führt dabei das Licht in seinem Inneren als Lichtwellenleiter. In der gezogenen Faser ist hingegen der Durchmesser wesentlich kleiner als die Wellenlänge des Lichts. Deshalb wird das Licht nicht im Kern, sondern im Mantel geleitet.



Abbildung 3 Glasfaser Ziehprozess und Profilvariant

3 Grundlage der Glasmaterial

Als Glas kann man ein festes und nichtkristallines Schmelzprodukt bezeichnen, welches ohne Kristallisation erstarrt. Es kann demnach auch als eingefrorene unterkühlte Flüssigkeit bezeichnet werden, die sich nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Trotz dieser Definition handelt es sich um einen amorphen Festkörper ohne Gefüge, Phasengrenzen oder Versetzungen.

Neben vielen Eingeschränkten von Glasmaterial wird in dieser Arbeit nur Viscoelastität diskutiert.

3.1 Viscoelastität

Der für den Glass-Molding-prozess wesentliche Temperaturbereich liegt zwischen dem Erweichungspunkt und dem Transformationspunkt. Während sich das Glas bei niedrigen Temperaturen unter dem Transformationspunkt elastisch und bei hohen Temperaturen über dem Erweichungspunkt als Newtonsche Flüssigkeit verhält, so verhält sich das Glas in diesem Bereich viskoelastisch. Viskoelastizität ist eine bei Deformation beobachtbare Kombination viskoser und elastischer Charakteristiken. Das Material kann in diesem Temperaturbereich nicht eindeutig als fest oder flüssig angesehen werden, sondern besitzt vielmehr einen intermediären Zustand.

Legt man bei einem viskoelastischen Material eine Belastung an, so erhält man eine sofortige elastische Deformation. Zusätzlich stellt sich in Abhängigkeit der Zeit eine weitere viskose Deformation ein. Die viskoelastische Eigenschaft führt zu einem Abklingen der aufgebrachten Belastung, was auch Spannungsrelaxation genannt wird. [5] Die Zeit, nach welcher die zu Beginn aufgebrachte Spannung σ_0 auf einen Wert von $\sigma_0 \cdot e^{-1}$ relaxiert, wird Relaxationszeit genannt.

Die Beschreibung viskoelastischen Verhaltens ist schwierig und erfordert komplexe Gleichungssysteme. Um das viskoelastische Verhalten vereinfacht beschreiben zu können bedient man sich mechanischer Modelle, welche aus Federn und Dämpfungszyklindern bestehen. Die Feder als elastisches Element wird mittels des Hookeschen Gesetzes beschrieben. Der Dämpfungszyklinder als viskoses Element wird als Newtonsches Fluid angesehen, was mit der Formel dargestellt werden kann. Mit den Modellen ist es möglich das Kriechen und die Spannungsrelaxation der viskoelastischen Deformation zu beschreiben.[4]

Um die Spannungsrelaxation zu beschreiben kann man auf verschiedene Modelle zur Beschreibung der Viskoelastizität zurückgreifen. Diese viskoelastischen Modelle sind notwendig, um die zeitabhängigen Kriecheigenschaften und die Schubspannungsrelaxation von Gläsern bei hohen Temperaturen zu analysieren.

Es gibt fünf grundlegende Modelle, um die Viskoelastizität eines Materials zu beschreiben: Das Maxwell-Modell, das Kelvin-Modell, das Burgers-Modell, das Zener-Modell und das Maxwell-Wiechert-Modell. Diese Modelle erlauben es, die inelastische Verformung als Funk-

tion der Belastung darzustellen. Sie sind vor allem für die Berechnung des Materialverhaltens mittels der FEM-Simulation unerlässlich.

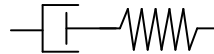


Abbildung 4 Maxwell-Modell

Das Maxwell-Modell wird dargestellt als Feder, die mit einem viskosen Element in Reihe geschaltet ist. Das Modell beschreibt eine Flüssigkeit mit zusätzlichen reversiblen elastischen Deformationen.

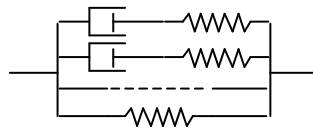


Abbildung 5 Maxwell-Wiechert-Modell

Die Relaxationskurve bei Benutzung des Maxwell-Modells mit nur einem Element weicht stark von realen Werten ab. Aus diesem Grund wurde das Maxwell-Wiechert-Modell entwickelt.

Es wird als beliebig viele parallel geschaltete Maxwell-Modelle dargestellt, welche unterschiedlichen Eigenschaften besitzen können. Dies ermöglicht eine Anpassung des Materialverhaltens durch Variation der Elementanzahl und der Elementeigenschaften. [4]

Der zeitliche Verlauf kann mit der Exponentialfunktion

$$G(t) = G_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

dargestellt werden.

$G(t)$ = Relaxationsmodul in Abhängigkeit der Zeit

G_0 = maximales Relaxationsmodul

t = Zeit

τ = Relaxationszeit

Das zeitabhängige Relaxationsmodul kann auch als Quotient der zeitabhängigen Spannung $\sigma(t)$ und der Dehnung ε definiert werden:

$$G(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon}$$

Die Relaxation des Glases ist stark temperaturabhängig. Bei hoher Temperatur steigen auch der Einfluss des viskosen Elements und somit auch die Relaxation. Das heißt bei hohen Temperaturen sind geringere Relaxationszeiten zu erwarten, als bei niedrigen. Es ist ebenso möglich, dass sich Spannungen bei geringeren Temperaturen nicht vollständig entspannen und somit im Werkstoff bleiben.[7]

4 Wärmübertragungsmodell bei Glass Molding

Bezüglich der Gesamtenergie erfolgt die Wärmeübertragung immer von "warm" zu "kalt" auf drei unterschiedliche Arten. Sie sind Wärmeleitung, Wärmestrahlung, und Konvektion. Bei der Wärmeleitung oder Konduktion wird kinetische Energie zwischen benachbarten Atomen oder Molekülen ohne Materialtransport übertragen. Die Wärmestrahlung nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ist ein Teil der elektromagnetischen Wellen. Meist wird die Energie durch infrarote Wellen, die ein Teil des elektromagnetischen Spektrums sind, transportiert. Bei der Konvektion oder Wärmeströmung wird Wärme von einem strömenden Fluid als innere Energie oder Enthalpie mitgeführt. Konvektion tritt immer dann auf, wenn ein strömendes Fluid Wärme von einer Oberfläche aufnimmt oder an sie abgibt.

Bei FE-Simulation von Glass Molding Prozess wurde Wärmeleitung, Wärmestrahlung, und Konvektionen bei jeweils unterschiedlicher Anwendung modelliert. Die für Glass Molding Prozess benötigte Parametern wurde entweder durch Experimental gesammelt oder durch andere Simulation herausbekommen. In diesen Kapiteln wird auf Wärmestrahlungsmodell für semi-transparent Material bzw. Wärmedurchlässige Material fokussiert, sowie auf die eventuelle Lösungsmethode.

4.1 Wärmeübertragung bei Radiation in Glas

In den bekannteren Probleme findet Strahlungswärmeübertragung, strahlende Austausch zwischen undurchsichtigen Körpern, die mit Strahlung wechselwirken nur an ihren Oberflächen statt. Im Gegensatz dazu, bei semi-transparente Material findet Wärmeübertragung nicht nur an ihren Oberfläche sondern auch in der Tiefe. Der Grad der Absorption hängt von dem Dicken des Materials ab. Glas ist ein typisches semi-transparent Material.

Absorption und Wärmedurchlässigkeit

Die Fähigkeit, die Radiationsenergie zu absorbieren, eines Glass ist durch ihre Absorptionskoeffizienten γ gekennzeichnet. Sie ist durch die bekannte Lambert-Bouguer Gesetz definiert.

$$I_x = I_0 e^{-\gamma x}$$

wobei I_x ist die Intensität der monochromatischen Strahlung, die senkrecht zu der Oberfläche des transparenten Körper. I_x ist die resten Intensität der Strahlung nach eindringung des Körpers im Abhängigkeit von streck x .

Viele der gegenwärtigen Überlegungen wurden durch die experimentellen Arbeiten ausgelöst. Grove und Jellyman in Großbritannien, Genzel und Neuroth in Deutschland haben die Koeffizient unterschiedlicher Glass in Abhängigkeit von Temperatur und Wellenlänge gemessen. Im fall von Fensterglas, es wurde gezeigt, dass Glas mehr oder wenige wärmedurchlässig ist, wenn Strahlungswellenlänge zwischen 1 bis 2.75um ist. Fensterglas ist etwa

niedriger wärmdurchlässig wenn Strahlungswellenlänge im Bereich zwischen 2.75 bis 4.5µm liegen. Und es ist total undurchsichtig bei langer Strahlung.

Emission bei wärmdurchlässige Material

Von Betrachtungen ist die Tatsache, dass, wie Absorption, ist die Emission von Strahlung durch wärmdurchlässige Materialien eine Volum, kein Fläche Phänomen. Die Fähigkeit eines Materials, um Strahlung zu emittieren, ist durch sein Volumen Emissionsvermögen gekennzeichnet. Dies ist der Grad, mit der die Strahlung in alle Richtungen von einer Volumeneinheit des Materials emittiert. Für eine ideale grau Material wird das Volumen Emissionsvermögen gegeben durch

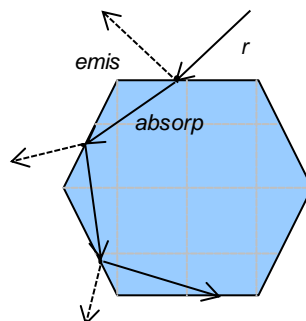
$$j = 4\gamma n^2 \sigma T^4$$

Wobei n ist die Refraktionsindex des Materials, γ ist Absorptionskoeffizient, T ist die absolute Temperatur, σ ist die Stefan-Blotzmann konstant.

Alle intern Strahlung wird nicht nur in das umgebende Medium emittiert. Sondern ein Teil wird auf dem Weg in Richtung der Oberfläche absorbiert, während ein teil wird intern an der Oberfläche reflektiert, und ein Teil wird über Oberfläche gebrochen.

4.2 Raytracing

Die Raytracing Methode wurde oft in 3D Bild Rendering benutzt. Die Methode ist sehr nahe zu physikalischer Fortpflanzung des Lichtes, ein Strahl kann repräsentieren den weg eines Photons. Sie ist ein auf der Aussendung von Strahlen basierender Algorithmus zur Verdeckungsrechnung, also zur Ermittlung der Sichtbarkeit von dreidimensionalen Objekten von einem bestimmten Punkt im Raum aus. Ebenfalls mit Raytracing bezeichnet man mehrere Erweiterungen dieses grundlegenden Verfahrens, die den weiteren Weg von Strahlen nach dem Auftreffen auf Oberflächen berechnen. Somit sie ermöglicht die Simulation verschiedener optischem Phänomen, wie Reflektion, Refraktion, und Absorption.



$$W_r = W_{absorp} + W_{emis}$$

Abbildung 6 Raytracing und Energiebrillanz

Abbildung 6 zeigt die Energiebrillanz von Quellestrahlung, Absorption und Emission.

4.2.1 Rossland Methode

Bei großen optischen Tiefen ist die mittlere freie Stecklänge von Photonen in der Regel sehr klein im Vergleich zu allen Skalenlängen von Gradienten der Temperatur oder Dichte. In einer solchen Situation, Material und Photon erfüllen die Bedingungen der lokalen thermodynamischen Gleichgewichtsfunktion (LTE). Eine sehr effektive Lösungsmethode ist die Diffusion Approximation. Die Berechnung mit diesen Verfahren sehr schnell und sie können leicht in Programmiersprache umgesetzt werden. Eine der ersten Näherungsmethoden wurde 1924 von Rosseland entwickelt.

Bei der Verwendung der formalen Lösung der Strahlungstransportgleichung kann die Rosseland Approximation abgeleitet werden. Sei \vec{r}_g der Randpunkt von dem Punkt \vec{r} in Richtung $\vec{\Omega}$.

$$I^{(k)}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = I^{(k)}(\vec{r}_g, \vec{\Omega}) e^{-k_k |\vec{r} - \vec{r}_g|} + \kappa_k \int_0^{|\vec{r} - \vec{r}_g|} B^{(k)}(\vec{r} - s\vec{\Omega}) e^{-k_k s} ds$$

Der erste Term auf der rechten Seite ist die Abschwächung der Strahlungsintensität an der Grenzfläche aufgrund der Absorption. Der zweite integrale Term beschreibt die Emission entlang des Weges zwischen den zwei Punkten \vec{r}_g und \vec{r} in der Richtung $\vec{\Omega}$, welche durch Absorption entsprechend dem Abstand s zu dem Grenzpunkt gedämpft \vec{r}_g .

Erweiterung der Schwarzkörperstrahlung Funktion $B^{(k)}(\vec{r} - s\vec{\Omega})$ in eine Taylorreihe und Einsetzen dieses Ausdrucks führt zu:

$$I^{(k)}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \approx I^{(k)}(\vec{r}_g, \vec{\Omega}) e^{-k_k |\vec{r} - \vec{r}_g|} + B^{(k)}(\vec{r}) + B^{(k)}(\vec{r}_g) e^{-k_k |\vec{r} - \vec{r}_g|} - \frac{1}{\kappa_k} \frac{dB^{(k)}}{dT}(\vec{r}) \vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} T(\vec{r}) (e^{-k_k |\vec{r} - \vec{r}_g|})$$

Wenn wir davon ausgehen, dass das Material optisch dick, oder $k_k |\vec{r} - \vec{r}_g| \gg 1$ ist, erhalten wir die Rosseland Approximation:

$$I^{(k)}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \approx B^{(k)}(\vec{r}) - \frac{1}{\kappa_k} \frac{dB^{(k)}}{dT}(\vec{r}) \vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} T(\vec{r}) (e^{-k_k |\vec{r} - \vec{r}_g|})$$

Hier ist die Strahlungsintensität nur schwach abhängig von dem Raumwinkel $\vec{\Omega}$. Die Divergenz des Strahlungsvektors hat die gleiche Form wie der Ausdruck für die Wärmefluss:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{q}^k(\vec{r}) = -\vec{\nabla} \cdot \left(\frac{4\pi}{3\kappa_k} \frac{dB^{(k)}}{dT} (T(\vec{r}) \cdot \vec{\nabla} T) \right)$$

Deshalb charakterisiert die Rosseland Approximation den Transport von Strahlung als Diffusionsprozess.

Aus der numerischen Sicht der Rosseland Approximation ist sehr wirksame. Für jeden Gitterpunkt in dem Diskretisierungsschema können ein Korrektur κ_{rad} (die Leitfähigkeit der Strahlung) auf die Wärmeleitfähigkeit κ_h zuaddiert werden.

4.2.2 Bemerkung

Bei Glasfaser Ziehprozess werden Durchmesser einer Faser von 125 μm langsam nach 0.5 μm verkleinert. Aber die Wellenlänge einer Strahlungsquelle wird im Bereich von 2 μm bis 4 μm bleiben. Von daher ist die Rosseland Approximation nicht immer gültig, wenn der Durchmesser nicht größer genug als Wellenlänge ist. In diesen Fall sollen Mie Modelle und Rayleigh Modelle zum Einsatz kommen. Das heißt, bei Modellierung der Wärmestrahlung für Glasfaser Ziehprozess sollt ein Kombinationsmodell aus Rosseland, Mie und Rayleigh gewählt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das beim IPT bereits vorhandene numerische Modell von PGM und NGM zusammengefasst, und Simulation wurde mittels SimPGM durchgeführt. Die Simulationsergebnisse von PGM sowie NGM haben eine sehr gute Approximation zur Realität. Das numerische Modell für Fiberlinsen als vorläufiges Forschungsobjekt wurde auch untersucht. Dabei wurde ein Fokus auf die Wärmeübertragungsmodell mittels Raytracing Methode gelegt. In der Zukunft wird Wärmeübertragungsmodell weiter entwickelt, insbesondere für FE-Simulation des Herstellungsprozess der Fiberlinsen.

II Literaturverzeichnis

- [1] Firestone, G.; Jain, A.; Ji, A. (2005): Precision laboratory apparatus for high temperature compression molding of glass lenses. In: *American Institute of Physics*, 2005.
- [2] Nölle, Günther (1997): Technik der Glasherstellung. 3. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.
- [3] Zhou, Tianfeng; Yan, Jiwang; Masuda, Jun; Oowada, Takashi; Kuriyagawa, Tsunemoto (2011): Investigation on shape transferability in ultraprecision glass molding press for microgrooves. In: *Precision Engineering* 35 (2), S. 214–220.
- [4] Lakes, R. (1998): *Viscoelastic Solids*. 1. Aufl. Boca Raton: CRC Press.
- [5] Matzenmiller, A. (1999): *Viskoelastizität und Viskoplastizität – Relaxationsvorgänge in Glas*. Universität Kassel. Kassel.
- [6] Büchler, Stephan (2010): *Rheologisches Modell zur Beschreibung des Kälteverhaltens von Asphalten*. Techn. Univ, Braunschweig, Braunschweig.
- [7] Matzenmiller, A. (1999): *Viskoelastizität und Viskoplastizität – Relaxationsvorgänge in Glas*. Universität Kassel. Kassel.