

# **Einfluss der Bauteil- und Porengeometrie auf die Thermoschock-Eigenschaften und Zyklenstabilität keramischer Hochtemperatur-Wärmespeichermaterialien**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III

(Agrar-, Geowissenschaften, Mathematik und Informatik)

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von

Jan Sebastian Hildebrand

Gutachter:

1. Dr. habil. Stefan Stöber

2. Prof. Dr. Bastian Raab

Tag der Verteidigung: 23.10.2025

## Kurzzusammenfassung

Um den Einfluss der Porengeometrie auf die Thermoschock-Eigenschaften zu untersuchen, werden Cordierit-Keramiken mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sphärischen, kubischen und zylindrischen Poren mit einem  $x_{50}$ -Wert von  $3,375 \text{ mm}^3 \pm 0,250 \text{ mm}^3$ , sowie unporosierte Referenzproben in einmaligen, nicht zyklischen Thermoschock-Versuchen auf je 350, 450, 550, 650 sowie 750 °C aufgeheizt und in einem Wasserbad mit einer Temperatur von 20 °C abgeschreckt. Anschließend werden die prozentualen Verluste der 3-Punkt-Biegefestigkeiten  $L$  ermittelt. Die Referenzprobe zeigt eine kritische Temperaturdifferenz ( $L(\Delta T_c) = 30 \%$ )  $\Delta T_c$  von 671 K, während die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% kubischen Poren kritische Temperaturdifferenzen  $\Delta T_c$  mit 651, 701, 718 und 436 K zeigen. Die Proben mit sphärischen und zylindrischen Poren erreichen jeweils  $\Delta T_c$  nicht. In einer weiteren Messreihe werden identisch hergestellte Proben mit 5 und 20 Vol.-% sphärischen, kubischen und zylindrischen Poren sowie unporosierte Referenzproben über 100 Thermoschock-Zyklen bei einer Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 650 \text{ K}$  im Wasserbad abgeschreckt. Die Proben mit 20 Vol.-% kubischen und zylindrischen Poren zeigen innerhalb der ersten Thermoschock-Zyklen Materialversagen ( $L \geq 30 \%$ ). Proben mit 5 Vol.-% kubischen Poren versagen zwischen 7 und 15 Zyklen, während die Referenzproben und Proben mit 5 Vol.-% sphärischen Poren zwischen 25 und 37 Zyklen versagen. Die Proben mit 5 Vol.-% zylindrischen Poren versagen zwischen 37 und 60 Zyklen. Die Proben mit 20 Vol.-% sphärischen Proben halten über 100 Zyklen stand und weisen mit  $13,70 \text{ N/mm}^2$  danach eine höhere 3-Punkt-Biegefestigkeit gegenüber der Referenzprobe mit  $8,75 \text{ N/mm}^2$  auf. Bei durchgeführten FEM-Simulationen und experimentellen Versuchen werden Cordierit-Proben mit quadratischen und zylindrischen Grundflächen sowie variablen volumenspezifischen Oberflächen  $S_v$ , Höhen  $h$ , Höhe-zu-Dicke-Verhältnissen  $h/d$  und Volumina  $V$  in der Simulation sowie im praktischen Experiment bei  $\Delta T = 730 \text{ K}$  in Wasser abgeschreckt und die simulierten Spannungen im Bauteil sowie der reale prozentuale Verlust der Druckfestigkeiten ermittelt. Mit sinkender Höhe  $h$ , einem abnehmenden Verhältnis von Höhe zu Dicke  $h/d$  und einem Anstieg der volumenspezifischen Oberfläche  $S_v$  zeigen die Proben bei FEM-Simulationen und im praktischen Versuch in der Mehrzahl eine verbesserte Thermoschockresistenz. Bei den

realen Proben mit zylindrischer oder quadratischer Grundfläche ist eine Verbesserung des Druckfestigkeitsverlustes von 23,61 % auf 14,59 % oder von 24,22 auf 16,92 % möglich.

## **Abstract**

To investigate the influence of the pore geometry on the thermal shock properties, cordierite ceramics with 5, 10, 15 and 20 % by volume of spherical, cubic and cylindrical pores with an  $x_{50}$  value of  $3.375 \text{ mm}^3 \pm 0.250 \text{ mm}^3$  and unporosised reference samples are heated to 350, 450, 550, 650 and 750 °C respectively in single, non-cyclic thermal shock tests and quenched in a water bath at a temperature of 20 °C. The percentage losses of the 3-point bending strength  $L$  are then determined. The reference sample shows a critical temperature difference ( $L(\Delta T_c) = 30 \%$ )  $\Delta T_c$  of 671 K, while the samples with 5, 10, 15 and 20 % by volume cubic pores show critical temperature differences  $\Delta T_c$  of 651, 701, 718 and 436 K. The samples with spherical and cylindrical pores do not reach  $\Delta T_c$  in each case. In a further series of measurements, identically produced samples with 5 and 20 vol% spherical, cubic and cylindrical pores as well as unporosised reference samples were quenched in a water bath over 100 thermal shock cycles at a temperature difference of  $\Delta T = 650 \text{ K}$ . The samples with 20 % by volume cubic and cylindrical pores show material failure within the first thermal shock cycles ( $L \geq 30 \%$ ). Samples with 5 % by volume cubic pores fail between 7 and 15 cycles, while the reference samples and samples with 5 % by volume spherical pores fail between 25 and 37 cycles. The samples with 5% by volume cylindrical pores fail between 37 and 60 cycles. The samples with 20% spherical pores by volume withstand over 100 cycles and then exhibit a higher 3-point flexural strength of  $13.70 \text{ N/mm}^2$  compared to the reference sample with  $8.75 \text{ N/mm}^2$ . In FEM simulations and experimental tests, cordierite samples with square and cylindrical bases and variable volume-specific surfaces  $S_v$ , heights  $h$ , height-to-thickness ratios  $h/d$  and volumes  $V$  are quenched in water at  $\Delta T = 730 \text{ K}$  in the simulation and in the practical experiment and the simulated stresses in the component and the real percentage loss of compressive strength are determined. With decreasing height  $h$ , a decreasing ratio of height to thickness  $h/d$  and an increase in the volume-specific surface  $S_v$ , the majority of the samples show improved thermal shock resistance in FEM simulations and in practical tests. For the real samples

with a cylindrical or square base, an improvement in the loss of compressive strength from 23.61 % to 14.59 % or from 24.22 % to 16.92 % is possible.



## Verwendete Symbole und Abkürzungen

### Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$ \sigma_3 $	Pa	Betrag der 3. Hauptspannung
A	$m^2$	Übertragungsfläche
A	$m^2$	Strahlende Fläche
A	$m^2$	Austauschfläche
A	$m^2$	Fläche
b	m	Breite
b	m	Dicke des Probestabs
c	J/(kgK)	Spezifische Wärmekapazität für inkompressible Stoffe
$C_{12}$	$W/(m^2K^4)$	Strahlungsaustauschzahl
$c_p$	J/(kgK)	Isobare spezifische Wärmekapazität
$c_v$	J/(kgK)	Isochore spezifische Wärmekapazität
d	m	Durchmesser
E	Pa	Dynamischer Elastizitätsmodul
$E_{dyn}$	Pa	Dynamischer Elastizitätsmodul
$E_r$	Pa	Resultierender Elastizitätsmodul
f	Hz	Frequenz der Impulserregung
F	N	Bruchkraft
$f_1$	-	Porenformabhängige Konstante 1
$f_2$	-	Porenformabhängige Konstante 2
h	m	Höhe
h	m	Höhe
h	m	Höhe des Probestabs
h/d	-	Höhe-zu-Dicke-Verhältnis
HWB	$m^3$	Halbwertsbreite
l	m	Dicke
l	m	Länge
L	m	Stützweite
L	%	Relativer 3-Punkt-Biegezugverlust
L	%	Relativer Druckfestigkeitsverlust
L	%	Relativer Festigkeitsverlust
$l_0$	m	Ausgangslänge
m	kg	Masse

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$m_B$	kg	Behältermasse
$m_i$	kg	Masse der Speichermasse i
$m_{Probe}$	kg	Masse der Probe / Gesamtmasse
$m_{Quarz}$	kg	Masse Quarz in der Probe
$N$	-	Zyklus bzw. Zyklenzahl
$n$	-	Zahl der intakten Probekörper
$N [L \geq 30 \%]$	-	Anzahl der Thermoschockzyklen bis zum Materialversagen
$P$	Vol.-%	Porosität
$P_e$	Vol.-%	Extrinsische Porosität
$P_g$	Vol.-%	Geschlossene Porosität
$P_i$	Vol.-%	Intrinsische Porosität
$P_o$	Vol.-%	Offene Porosität
$Q_3$	Vol.-%	Summenverteilung
$Q_m$	J/g	Ein- und ausgespeicherte spezifische Wärme beim STA-Versuch
$Q_s$	J	Sensibler Wärmeinhalt
$Q_{sp}$	J	Wärmeinhalt eines sensiblen Wärmespeichers
$\dot{Q}$	J/s	Wärmestrom
$\dot{q}$	J/(sm <sup>2</sup> )	Wärmestromdichte
$\dot{q}_{12}$	J/(sm <sup>2</sup> )	Wärmestromdichte zwischen Körper 1 und Körper 2
$R$	K	Thermoschockparameter erster Ordnung
$R'$	W/m	Thermoschockparameter zweiter Ordnung
$S$	m <sup>2</sup>	Oberfläche
$S_v$	1/m	Volumenspezifische Oberfläche
$T$	K	Temperatur
$t$	s	Zeit
$T$	-	Korrekturterm der Impulserregung
$T_1$	K	Temperatur von Körper 1
$T_2$	K	Temperatur von Körper 2
$T_F$	K	Fluidtemperatur
$T_W$	K	Wandtemperatur
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen
$V_{Kugel}$	m <sup>3</sup>	Kugelvolumen
$V_P$	m <sup>3</sup>	Einzelkornvolumen
$V_P$	m <sup>3</sup>	Einzelporenvolumen
$V_{pm}$	m <sup>3</sup>	Mittleres Volumen Porosierungsmittel

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$V_{\text{Quader}}$	$\text{m}^3$	Quadervolumen
$V_{\text{sp,m}}$	$\text{m}^3$	Arithmetisches Mittel des Einzelporenvolumens
$V_{\text{Zylinder}}$	$\text{mm}^3$	Zylindervolumen
$w$	$\text{kWh/m}^3$	Nutzbare Energiedichte pro Volumen
$x_{10}$	$\text{mm}^3$	Perzentil des Porenvolumens $\leq 10$ Vol.-% der Porosität
$x_{50}$	$\text{mm}^3$	Perzentil des Porenvolumens $\leq 50$ Vol.-% der Porosität
$x_{90}$	$\text{mm}^3$	Perzentil des Porenvolumens $\leq 90$ Vol.-% der Porosität
$X_{\text{Quarz}}$	Ma.-%	Prozentualer Massenanteil Quarz in der Probemasse
$X_{\text{Quarz}}$	-	Massenanteil Quarz in der Probemasse auf 1 normiert
$\Delta H_{\text{Hers}}$	$\text{J/mol}$	Spezifische Erstarrungsenthalpie
$\Delta H_{\text{kond}}$	$\text{J/mol}$	Spezifische Kondensationsenthalpie
$\Delta H_{\text{sm}}$	$\text{J/mol}$	Spezifische Schmelzenthalpie
$\Delta h_{\text{STA}}$	$\text{J/g}$	Bei STA gemessene spezifische Energie
$\Delta H_v$	$\text{J/mol}$	Spezifische Verdampfungsenthalpie
$\Delta h_{\alpha-\beta}$	$\text{J/g}$	Spezifische Phasenumwandlungsenthalpie von $\alpha$ - zu $\beta$ -Quarz
$\Delta H_{\alpha-\beta,\text{m}}$	$\text{J/mol}$	Spezifische Phasenumwandlungsenthalpie von $\alpha$ - zu $\beta$ -Quarz
$\Delta l$	$\text{m}$	Längenausdehnung
$\Delta Q$	$\text{J}$	Änderung der Wärmemenge
$\Delta T$	$\text{K}$	Temperaturdifferenz
$\Delta T_c$	$\text{K}$	Kritische Temperaturdifferenz nach DIN EN 820-3

## Griechische Buchstaben

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\alpha$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha$	$1/\text{K}$	Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient
$\Delta$	-	Intervall realer/messbarer Änderung
$\varepsilon$	-	Emissionskoeffizient
$\varepsilon$	$\text{F/m}$	Permittivitätszahl
$\eta$	-	Effizienz
$\vartheta$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
$\lambda$	$\text{W}/(\text{mK})$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{10,\text{tr.}}$	$\text{W}/(\text{mK})$	Scherbenwärmeleitfähigkeit nach DIN EN 12667
$\mu$	-	Poissonzahl bzw. Querkontraktionszahl
$\xi_{\text{PM}}$	Vol.-%	Porosierungsmittel-Zugabe

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Reindichte
$\rho_b$	kg/m <sup>3</sup>	Rohdichte eines Probestabs
$\rho_R$	kg/m <sup>3</sup>	Rohdichte
$\sigma$	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\sigma_{3P}$	Pa	3-Punkt-Biegefestigkeit
$\sigma_{3P,calc}$	Pa	Berechnete 3-Punkt-Biegefestigkeit
$\sigma_{DF}$	Pa	Druckfestigkeit
$\sigma_F$	Pa	Bruchfestigkeit
$\varphi$	%	Anteil der intakten Probekörper
$\phi$	Vol.-%	Volumenanteil

## Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
B	Breite
b	Breite
CaO	Calciumoxid
CFD	Computational Fluid Dynamics, Numerische Strömungsmechanik
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
d	Durchmesser
EEG 2023	Erneuerbare-Energien-Gesetz 2023
EPS	Expandiertes Polystyrol
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eisen(III)-oxid
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFP	Fehlerfortpflanzung nach Gauß
GEH	Gestaltänderungshypothese
H	Höhe
h	Höhe
HWB	Halbwertsbreite
K <sub>2</sub> O	Kaliumoxid
kub	Kubisch
KUB	Kubisch

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
L	Länge
l	Länge
M	Maßstab
MgO	Magnesiumoxid
MoSi <sub>2</sub>	Molybdändisilizid
N.P.	Nicht porosierte Probe / Referenzprobe
Na <sub>2</sub> O	Natriumoxid
NaS-Batterie	Natrium-Schwefel-Batterie
NH	Normalspannungshypothese
PA6	Polyamid 6 bzw. Polycaprolactam
PLA	Polylactid
PMMA	Polymethylmethacrylat
PS	Polystyrol
qua	Quaderförmig
QUA	Quaderförmig
s	Empirische Standardabweichung
SH	Schubspannungshypothese
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Siliziumnitrid
SiC	Siliziumcarbid
SiO <sub>2</sub>	Siliziumdioxid
sph	Sphärisch
SPH	Sphärisch
STA	Simultane Thermische Analyse
STABW	Empirische Standardabweichung
TiO <sub>2</sub>	Titan(IV)-oxid
V	Volumen
VE-Wasser	Vollentsalztes Wasser
XRD	X-ray diffraction, Röntgendiffraktometrie
ZrB <sub>2</sub>	Zirkoniumborid
zyl	Zylindrisch
ZYL	Zylindrisch
α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Korund

## Physikalische Konstanten

Stefan-Boltzmann-Konstante	$\sigma$	$5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ J}/(\text{m}^2\text{sK}^4)$
----------------------------	----------	--

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	
<b>Kurzzusammenfassung</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Verwendete Symbole und Abkürzungen</b>	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Herausforderungen der Energiewende	1
1.2 Aufgabenstellung	5
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>6</b>
2.1 Überblick Energiespeicher	6
2.2 Anforderungen an Wärmespeicher und Wärmespeichermaterial	21
2.3 Charakterisierung von Wärmespeichermaterialien	23
2.4 Poren- und Geometrieeinfluss auf Werkstoffeigenschaften	30
2.5 Einfluss von Poren auf das Thermoschockverhalten von Werkstoffen	32
2.6 Einfluss der Geometrie auf das Thermoschockverhalten	35
<b>3 Experimentelle Arbeiten</b>	<b>36</b>
3.1 Ausgangsmaterialien	36
3.2 Probenherstellung	38
3.2.1 Sieben	39
3.2.2 Filamentherstellung	39
3.2.3 Extrusion	40
3.2.4 Trocknung	41
3.2.5 Entbindern	42
3.2.6 Sintern	42
3.2.7 Sägen und Schleifen	44

<b>3.3</b>	<b>Durchführung Thermoschock-Versuche</b>	<b>47</b>
3.3.1	Einfache Thermoschockversuche	49
3.3.2	Zyklische Thermoschockversuche	50
<b>3.4</b>	<b>Charakterisierung</b>	<b>50</b>
3.4.1	Rohdichte	51
3.4.2	Reindichte	51
3.4.3	Porosität	51
3.4.4	Lichtmikroskopie	52
3.4.5	Scherbenwärmeleitfähigkeit	52
3.4.6	Elastizitätsmodul	53
3.4.7	3-Punkt-Biegefestigkeit	53
3.4.8	Druckfestigkeit	54
3.4.9	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	55
3.4.10	Simultane Thermische Analyse	56
3.4.11	Röntgendiffraktometrie	56
<b>4</b>	<b>Numerische Methoden</b>	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>Software</b>	<b>57</b>
<b>4.2</b>	<b>Geometrisches Design</b>	<b>57</b>
<b>4.3</b>	<b>Fluent</b>	<b>59</b>
<b>4.4</b>	<b>Transiente Strukturmechanik</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>63</b>
<b>5.1</b>	<b>Volumengewichtete Korngrößenverteilung der Porosierungsmittel</b>	<b>63</b>
<b>5.2</b>	<b>Zusammensetzung der Keramik</b>	<b>65</b>
<b>5.3</b>	<b>Porenorientierung</b>	<b>67</b>
<b>5.4</b>	<b>Druckfestigkeit</b>	<b>70</b>

<b>5.5</b>	<b>Rohdichte, Reindichte und Porosität</b>	<b>71</b>
<b>5.6</b>	<b>Volumengewichtete Porengrößenverteilung</b>	<b>78</b>
<b>5.7</b>	<b>Scherbenwärmeleitfähigkeit</b>	<b>85</b>
<b>5.8</b>	<b>Thermischer Ausdehnungskoeffizient</b>	<b>88</b>
<b>5.9</b>	<b>Einfache Thermoschockversuche</b>	<b>91</b>
<b>5.10</b>	<b>Zyklische Thermoschockversuche</b>	<b>101</b>
<b>5.11</b>	<b>Erster und zweiter Thermoschockparameter</b>	<b>107</b>
<b>5.12</b>	<b>Verbesserung der Thermoschockresistenz durch Porosierung</b>	<b>108</b>
<b>5.13</b>	<b>Einfluss der Bauteilgeometrie</b>	<b>109</b>
<b>6</b>	<b>Diskussion und Zusammenfassung</b>	<b>121</b>
<b>6.1</b>	<b>Güte und Vergleichbarkeit der porosierten Proben</b>	<b>121</b>
<b>6.2</b>	<b>Porosität</b>	<b>123</b>
<b>6.3</b>	<b>Einfluss der Porengeometrie auf die Thermoschockeigenschaften</b>	<b>124</b>
<b>6.4</b>	<b>Thermoschockparameter</b>	<b>126</b>
<b>6.5</b>	<b>Einfluss der Bauteilgeometrie auf die Thermoschockeigenschaften</b>	<b>127</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>133</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>144</b>
<b>9</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>147</b>
<b>10</b>	<b>Anlage / Anhang</b>	<b>152</b>
<b>10.1</b>	<b>Vorversuche</b>	<b>152</b>
<b>10.2</b>	<b>Daten</b>	<b>154</b>
	<b>Erklärung</b>	<b>251</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>252</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>253</b>



### 1 Einleitung

#### 1.1 Herausforderungen der Energiewende

Das langfristige Ziel der Energiewende in Deutschland ist es, den gesamten Energiebedarf durch erneuerbare Energien zu decken. Dabei soll der Einsatz von fossilen Energieträgern schrittweise verringert und letztendlich vollständig eingestellt werden.<sup>1,2</sup> Gründe für die Energiewende sind u.a. die Minimierung des vom Menschen bewirkten Anteils an der globalen Erwärmung, das Schonen von begrenzten Energie- und Rohstoffressourcen sowie das Vermeiden von Betriebsgefahren und der Endlagerproblematik im Bereich der Kernenergie. Die Energiewende ist allerdings nicht nur von Bedeutung in Bezug auf den Klimaschutz und die Endlichkeit fossiler Energieträger. Insbesondere können auch politische und wirtschaftliche Abhängigkeiten zu Ländern verringert werden, die über große Vorkommen von fossilen Energieträgern verfügen und diese fördern und vertreiben.<sup>3,4</sup>

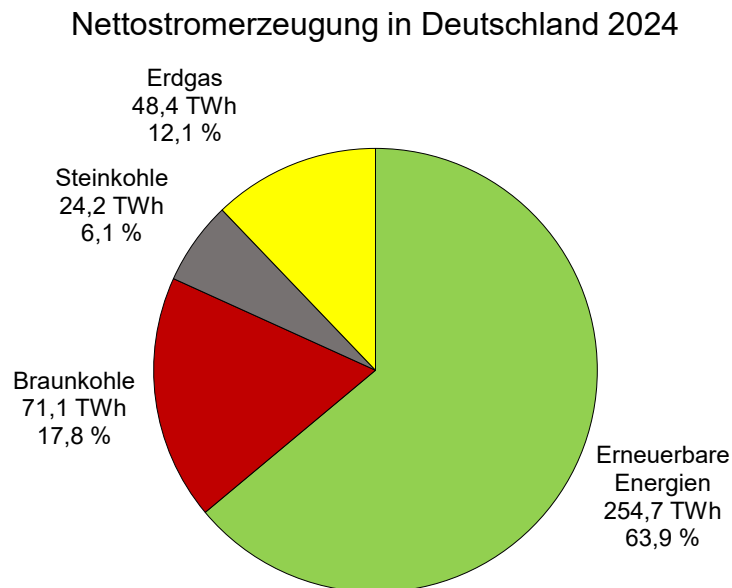


Abbildung 1: Nettostromerzeugung in Deutschland 2024 in TWh und prozentuale Verteilung.<sup>5</sup>

Aktuell erfolgt rund 64 % der Nettostromerzeugung in Deutschland aus erneuerbaren Energien (Abbildung 1). Die Nettostromerzeugung ist dabei gegenüber der Bruttostromerzeugung um den Eigenverbrauch der Kraftwerke bereinigt.<sup>5</sup> Bis zum Jahr

## Einleitung

2030 sollen nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz 2023 (EEG 2023) in Deutschland anteilig 80 Prozent des Strommix auf erneuerbaren Energien basieren.<sup>6</sup> Diese strukturelle Umgestaltung ist mit vielfältigen Herausforderungen verbunden. Ein wesentliches Ziel ist die Reduzierung des Energieverbrauchs, zu der die Verbesserung der Energieeffizienz einen wichtigen Beitrag leisten kann.<sup>7</sup> Um den Nutzen im Verhältnis zur eingesetzten Energie zu steigern, können z.B. im Gebäudesektor optimierte Wärmedämmsysteme eingesetzt werden oder der Energieverbrauch von Haushaltsgeräten durch technische Weiterentwicklungen reduziert werden.<sup>8,9</sup> Eine weitere Herausforderung ist die Finanzierung der Energiewende. Die Entwicklung und die Integration erneuerbarer Energien und damit verbundener Technologien sind mit erheblichen Investitionen verbunden. Ein essentieller Baustein zur Integration erneuerbarer Energien ist neben dem Netzausbau und der Digitalisierung, die Speicherung von Energie, um einen robusten Netzbetrieb zu gewährleisten.<sup>10–13</sup>

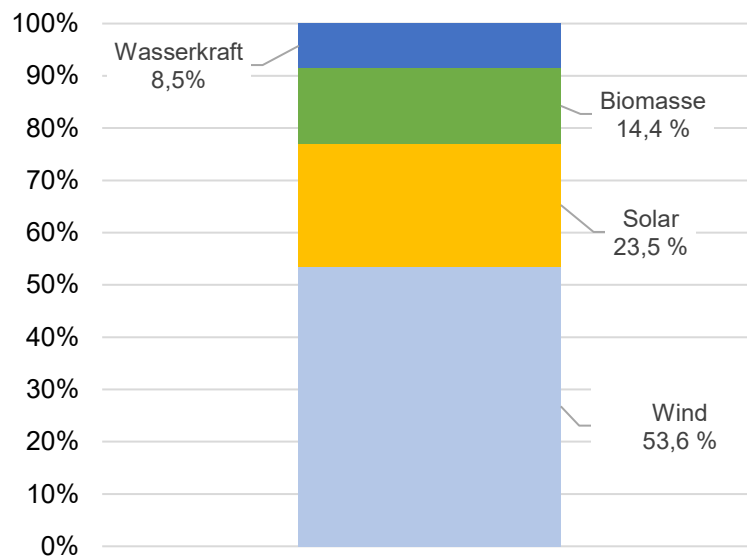


Abbildung 2: Der Anteil der einzelnen Energieträger an der Gesamtheit der erneuerbaren Energien bei der Nettostromerzeugung in Deutschland 2024.<sup>5</sup>

Da vor allem die Solarenergie und die Windkraft einen wesentlichen Anteil an der Gesamtheit der erneuerbaren Energien ausmachen, kann die Weiterentwicklung und die Integration der Energiespeichertechnologie eine zentrale Rolle in Bezug auf eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende spielen (Abbildung 2). Durch kurzzeitige und

## Einleitung

saisonale Fluktuationen der Leistungsbereitstellung sind Diskrepanzen zwischen der Leistungsangebot und der Last möglich, was sich in einer Flaute der bereitgestellten Leistung, wie z.B. im Zeitraum 10.01.22 – 13.01.22, abzeichnen kann (Abbildung 3).

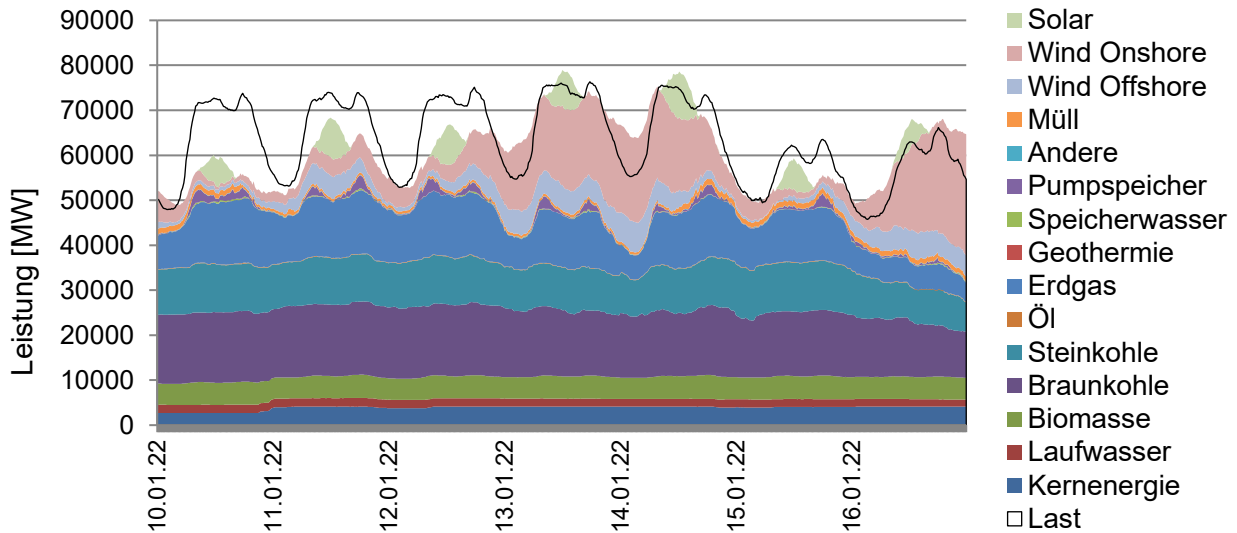


Abbildung 3: Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland in der zweiten Woche des Jahres 2022.<sup>14</sup>

Ebenso wichtig ist es, einen fluktuationsbedingten Überschussstrom wie er im Zeitraum vom 12.07.22 bis 17.07.22 vorlag, zu vermeiden, um die Netze nicht zu überlasten (Abbildung 4).

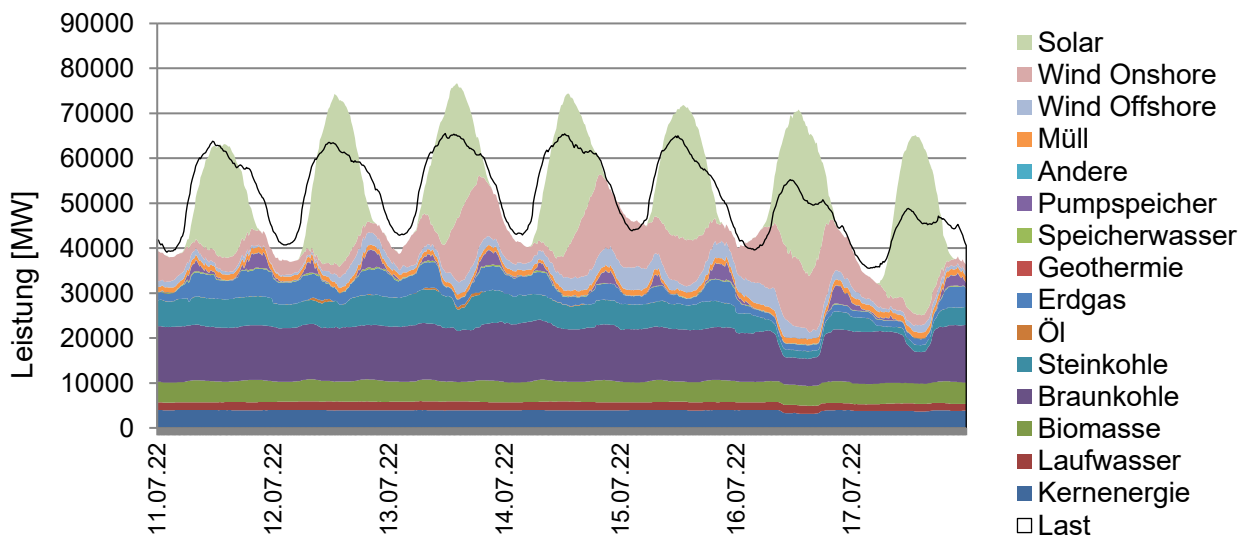


Abbildung 4: Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland in 28. Woche des Jahres 2022.<sup>15</sup>

## Einleitung

---

Durch den Einsatz von Energiespeichersystemen kann ein Ausbalancieren dieser Schwankungen ermöglicht werden.

Auch im Bereich anfallender, industrieller Abwärme weisen Energiespeichersysteme, neben der Chance auf wirtschaftliche Vorteile, ein erhebliches Potential zur effizienteren Energienutzung und zur Einsparung von CO<sub>2</sub> und somit einen Beitrag zur Energiewende auf. Industrielle Abwärme, ist Wärmeenergie, die bei industriellen Prozessen erzeugt, nicht zweckgebunden genutzt und zumeist in die Umgebung abgeleitet wird.<sup>16,17</sup>

Es gibt zahlreiche Energiespeichersysteme wie z.B. Kondensatoren, Batterien, Druckluftspeicher, Wärmespeicher, Pumpspeicherkraftwerke und Power-to-Gas-Anlagen, die sich i.d.R. in ihren Leistungs-/Energie-, Leistungsdichte-/Energiedichte- und/oder Ausspeicherdauer/Kapazitäts-Fenstern unterscheiden und somit für verschiedene Anwendungsfelder z.B. zeitlich (stündlich, täglich, saisonal), nach Art der Energieform (Strom, Wärme), der Speicherkapazität und der Höhe der benötigten Leistung geeignet sind.<sup>18</sup> Batteriesysteme und Pumpspeicherkraftwerke werden bereits dazu eingesetzt bei erneuerbaren Energien und insbesondere bei der Photovoltaik Überschuss-Strom durch Lastspitzen zu speichern und die gespeicherte Energie zeitversetzt wieder einsatzfähig zu machen.<sup>19,20</sup> Im Feld der Wärmeversorgung können thermische Speicher zur Flexibilisierung von Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung wie z.B. Blockheizkraftwerke sowie im Bereich der Photovoltaik und Power-to-Heat-Anlagen einen wertvollen Beitrag leisten.<sup>21</sup>

Die anfallende Abwärme der Industrie in Deutschland, berechnet auf der Grundlage von Daten aus 2008, zeigt branchenübergreifend Werte von 184 PJ/a im Temperaturbereich zwischen 25 – 95 °C und 252 PJ/a über den gesamten technisch relevanten Temperaturbereich bis 1400 °C.<sup>22,23</sup> Allein für die Branchen Papier, Stahl, Glas und Zement wird für Deutschland nach Daten von 2014 über den gesamten Temperaturbereich eine anfallende Abwärmeenergie von ca. 15,7 TWh/a bzw. 56,5 PJ/a analysiert.<sup>24</sup> In Relation zum Energieverbrauch der deutschen Industrie, der 3562 PJ/a im Jahr 2022 betrug, zeigen diese Werte ein erhebliches Energieeinsparpotential, das durch den Einsatz verbesserter Speichertechnologien anteilig nutzbar gemacht werden könnte.<sup>25</sup> Daraus

resultiert ein gegenwärtiger und zukünftiger Forschungsbedarf an Energiespeichern und ihren technischen Komponenten.

### 1.2 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, den Einfluss der Porengeometrie auf die thermischen und mechanischen Eigenschaften keramischer Werkstoffe zu untersuchen, die zur Anwendung als Wärmespeichermaterial in Frage kommen könnten. Im Rahmen von Vorversuchen werden dazu ein Ziegelton und eine Cordierit-Tonmasse sowie unterschiedliche, organische Porosierungsmittel als Ausgangsmaterialien zur Herstellung poröser keramischer Formkörper eingesetzt und die für die Anwendung am besten geeigneten Materialien für die Hauptversuche verwendet. Neben wichtigen Anwendungseigenschaften, wie der aufgenommenen und abgegebenen Wärmemenge, der Wärmeleitfähigkeit und insbesondere der kritischen Temperaturdifferenz bei Thermoschockversuchen, sind auch Eigenschaften bei der Probenherstellung wie die Homogenisierung der Ausgangsmaterialien, die Formgebung und das Sinterverhalten entscheidende Kriterien für die Materialauswahl.

Zur Herstellung der Proben für die Hauptversuche werden den Ansätzen vor dem Formgebungsprozess durch Extrusion in Monoporosierung 5, 10, 15 und 20 Vol.-% je eines von drei organischen Porosierungsmitteln zugesetzt, deren einzelne Körner entweder sphärische, kubische oder zylindrische Geometrien aufweisen. Während des Brennvorgangs im Kammerofen zersetzen sich in den zuvor getrockneten Probenrohlingen die Porosierungsmittel thermisch und hinterlassen Poren mit der gleichen Geometrie. Die Poren sollen im Median ( $\times 50$ ) ein Einzelporenvolumen von  $3,375 \text{ mm}^3 \pm 0,250 \text{ mm}^3$  aufweisen, so dass bei allen zu vergleichenden Proben die Porosität und das Einzelporenvolumen annähernd konstant gehalten werden, während nur die Porengeometrie variiert wird. Zu Vergleichszwecken wird in ansonsten identischer Weise eine Referenzprobe ohne Porosierungsmittel hergestellt.

Rohdichte, Scherbenrohndichte, Reindichte, volumengewichtete Porengrößenverteilung, Druckfestigkeit, 3-Punkt-Biegefestigkeit, dynamischer E-Modul, ein- und ausgespeicherte Wärme, thermischer Ausdehnungskoeffizient und mineralogische Zusammensetzung der

fertigen Probekörper werden untersucht und darüber hinaus mittels einzelnen und zyklischen Thermoschockversuchen in einem Wasserbad die Thermoschockbeständigkeit anhand der kritischen Temperaturdifferenzen und der Zyklenstabilitäten charakterisiert.

Zusätzlich soll der Einfluss der äußeren Geometrie der keramischen Formkörper auf einen transienten Wärmeübergang und die damit verbundene Thermoschockbeständigkeit bei schockartig auftretenden Temperaturgradienten mittels FEM-Simulation (FEM: Finite-Elemente-Methode) untersucht werden. Dazu werden mit der Software Ansys geeignete Probekörper durch die Extrusion von kreisförmigen und quadratischen Flächen konstruiert, an denen die Länge in Extrusionsrichtung, die Extrusionsfläche, das Höhe-zu-Dicke-Verhältnis und der Maßstab als Variationsparameter dienen. Die notwendigen Materialdaten für die Simulationen werden aus Analyseergebnissen praktischer Versuche übernommen. An den Formkörpern wird jeweils ein Thermoschock unter vergleichbaren Bedingungen wie bei den experimentellen Versuchen simuliert und die resultierenden, thermisch induzierten mechanischen Spannungen berechnet. Um die Aussagekraft der Simulationen für den praktischen Anwendungsfall zu prüfen, werden ausgewählte Formkörper im Labor extrudiert, in einem experimentellen Versuch einem Thermoschock unter den gleichen Bedingungen wie in der Simulation unterzogen und der Verlust der mechanischen Festigkeit im Vergleich zu den nicht geschockten Referenzproben bestimmt.

## **2 Stand der Technik**

In diesem Kapitel folgt zunächst ein allgemeiner Überblick über die verschiedenen Kategorien von Energiespeichern und deren Funktionsweise sowie Beispiele aus der Anwendung. Danach wird auf die Anforderungen und die Charakterisierung von keramischen Wärmespeichermaterialien eingegangen. Des Weiteren wird der Einfluss der Bauteilgeometrie und von Poren auf für die Arbeit entscheidende Werkstoffeigenschaften behandelt.

### **2.1 Überblick Energiespeicher**

Ein Energiespeicher kann über die drei grundlegenden Vorgänge Laden, Speichern und Entladen die Energieerzeugung bzw. das Anfallen von überschüssiger Energie vom

Energieverbrauch zeitlich entkoppeln.<sup>26–28</sup> Es wird zwischen primären und sekundären Energiespeichern unterschieden, wobei primäre Energiespeicher im Gegensatz zu sekundären Energiespeichern nur einmal be- und entladen werden können, weshalb unter diesen Begriff hauptsächlich fossile Energieträger wie Öl, Gas oder Kohle fallen.<sup>18</sup> Im weiteren Verlauf dieser Arbeit bezieht sich der Begriff Energiespeicher stets auf sekundäre Energiespeicher. Es gibt verschiedene Arten der Klassifizierung von Energiespeichern, um eine hinreichend genaue Auslegung des Speichersystems für den Anwendungsfall zu erleichtern. Dazu werden Energiespeicher nach zeitlichen, räumlichen und physikalisch-energetischen Aspekten kategorisiert.<sup>18</sup> Bei der zeitlichen Klassifizierung werden Energiespeicher bezüglich der Dauer ihres Entladevorgangs in die Kategorien Kurzzeit- und Langzeitspeicher eingeteilt. Bei Kurzzeitspeichern beträgt die Dauer der Entladung maximal 24 h, während Langzeitspeicher für größere Entladungszeiträume ausgelegt sind.<sup>13,18</sup> Kurzzeitspeicher decken somit Zeitintervalle von Sekunden, Minuten und Stunden bis hin zu einem Tag ab, während Langzeitspeicher auf Wochen, Monate oder saisonal auf Jahre ausgelegt sind. Räumlich wird nach zentralen und dezentralen sowie ortsfesten und mobilen Energiespeichern unterschieden.<sup>18</sup> Bei der physikalisch-energetischen Klassifizierung wird nach der Art der gespeicherten Energie in mechanische, elektrische, elektrochemische, chemische und thermische Energiespeicher unterschieden (Tabelle 1).

18,26,29,30

Tabelle 1: Energiespeicher unterteilt nach physikalisch-energetischer Klassifizierung mit Beispielen.

Energiespeicher				
Mechanisch	Elektrisch	Elektrochemisch	Chemisch	Thermisch
Pumpspeicher Schwungradspeicher Druckluftspeicher	Kondensator Spule	Li-Ionen-Batterie Redox-Flow-Batterie	Power-to-Gas Power-to-Liquid	Sensibel Latent Thermochemisch

Zu den wichtigsten mechanischen Energiespeichern zählen die Pumpspeicherkraftwerke. Pumpspeicherkraftwerke nutzen die Lageenergie bzw. potentielle Energie, indem Wasser mit einer Pumpe in ein höher gelegenes Speicherbecken gefördert wird und bei Bedarf wieder geregelt in Vorratsbecken mit tieferen Höhenniveaus geführt wird, wobei die Wasserbewegung zum Antrieb von Turbinen dient (Abbildung 5).<sup>26</sup>

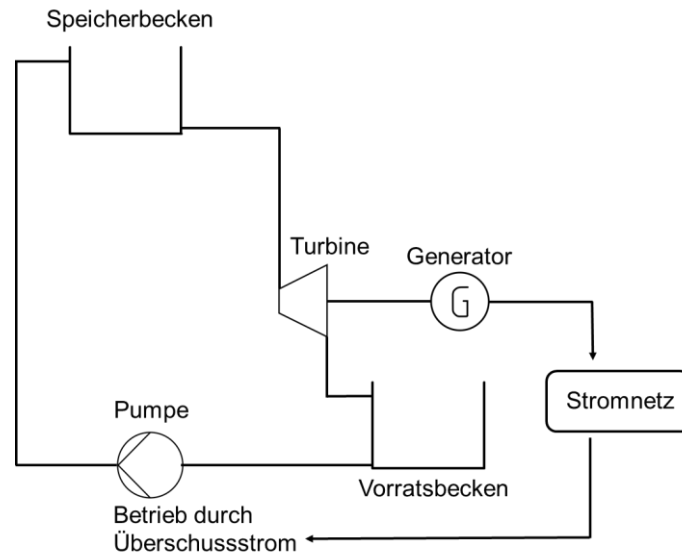


Abbildung 5: Vereinfachtes Fließschema eines Pumpspeicherkraftwerks, das zum Ausgleich bei Schwankungen der Energieversorgung dient.

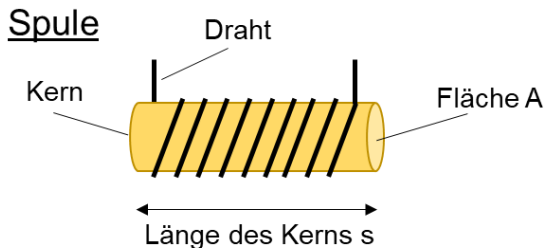
Das größte Pumpspeicherkraftwerk in Deutschland in Goldisthal (Thüringen) verfügt über eine Netto-Nennleistung von 1052 MW.<sup>31</sup> Die Gesamtleistung und die Gesamtspeicherkapazität aller Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland betragen rund 7 GW und 40 GWh.<sup>13,32</sup> Aufgrund der großen Speicherkapazität und des hohen Wirkungsgrades von 75 bis 80 % spielen Pumpspeicherkraftwerke eine wichtige Rolle für die Umsetzung der Energiewende.<sup>13</sup>

Ein Schwungradspeicher wandelt elektrische Energie in mechanisch-kinetische Energie um, d.h. die Energie wird in Form von Rotationsenergie gespeichert, die bei Bedarf durch einen Elektrogenerator wieder in elektrische Energie umgewandelt werden kann.<sup>13,26</sup> Schwungradspeicher verfügen i.d.R. über eine vergleichsweise geringere Kapazität im Bereich von 100 kWh, befinden sich jedoch in der Weiterentwicklung, so dass ein einrotoriges System bereits eine Kapazität von 500 kWh erreichen konnte.<sup>33</sup> Diese Art der Speichertechnik kommt in Deutschland gegenwärtig im Kraftwerksbereich eher selten zum Einsatz und hat den Nachteil, dass pro Stunde eine Selbstentladung von 3 – 20 % erfolgen kann.<sup>13,32</sup> Die Schwungradtechnik findet allerdings bereits in Hybridfahrzeugen Anwendung als Energiespeicher, um Kraftstoff einzusparen.<sup>18</sup> Ein Überschuss an elektrischer Energie kann auch in Form von Druckluft gespeichert werden, die z.B. in



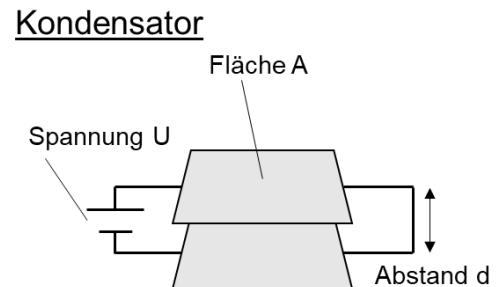
Salzkavernen gespeichert wird und bei der Entladung eine Turbine antreibt, wobei Kapazitäten im Bereich von über 2500 MWh erreicht werden können.<sup>13,18,26</sup> Die Anzahl der Druckluftspeicherkraftwerke liegt dabei weltweit deutlich unter der von Pumpspeicherkraftwerken, jedoch steigt diese Zahl seit den 1960er Jahren an.<sup>18</sup> Alle drei genannten, mechanischen Energiespeicher zählen zu den Kurzzeitspeichern, jedoch können Pumpspeicherkraftwerke auch zur Langzeitspeicherung eingesetzt werden.<sup>18,34</sup>

Als elektrotechnische Bauteile zur Kurzzeitspeicherung von Energie sind Spulen und Kondensatoren weit verbreitet. Die Spule ist ein elektrischer Energiespeicher, der über die Induktivität, d.h. das Erzeugen eines Magnetfeldes bei Änderung der Stromstärke in Abhängigkeit der Windungszahl, Energie als magnetische Feldenergie aufnehmen und abgeben kann (Abbildung 6).<sup>18,26,35</sup>



I: Stromstärke  
N: Anzahl der Windungen  
L: Induktivität  
E: Gespeicherte Energie

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad \text{mit } L \sim N^2 \cdot \frac{A}{s}$$



E: Gespeicherte Energie

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad \text{mit } C \sim \frac{A}{d}$$

Abbildung 6: Schematischer prinzipieller Aufbau einer Spule (l) und eines Kondensators (r) als Beispiele für elektrische Energiespeicher.<sup>18,26,35</sup>

Kondensatoren bestehen in ihrer grundsätzlichen Anordnung aus zwei, durch ein Dielektrikum getrennte, gegenüberliegende Elektroden und können aufgrund der Aufrechterhaltung des elektrischen Feldes elektrische Energie beim Anlegen einer Spannung als elektrische Feldenergie speichern (Abbildung 6).<sup>13,18,26</sup> Über die gängigen elektrotechnischen Anwendungen hinaus sind Spulen und Kondensatoren als Energiespeicher derzeit weniger von Bedeutung, da Spulen durch den elektrischen Widerstand in ihrer technischen Anwendung und Kondensatoren insbesondere durch hohe Investitionskosten und ihre vergleichsweise geringe Energiedichte begrenzt sind.<sup>13,26,36</sup>

Batterien sind ein klassisches Beispiel für elektrochemische Energiespeicher. Ebenso wie bei Energiespeichern allgemein, wird auch bei Batterien zwischen primären und sekundären Batterien unterschieden. Primäre Batterien können nach einmaliger Entladung nicht wieder aufgeladen werden, während sekundäre Batterien, auch Akkumulatoren genannt, wieder aufladbar sind.<sup>26,37</sup> Im weiteren Textverlauf werden mit Batterien stets sekundäre Batterien bezeichnet. Eine Batteriezelle besteht aus zwei galvanischen Halbzellen, die den Anoden- und den Kathodenraum bilden. An der Anode findet eine Oxidation statt, bei der Elektronen freigesetzt werden, die über eine elektrisch leitende Komponente durch den Verbraucher (Last) zur Kathode wandern, an der eine Reduktion erfolgt.<sup>37,38</sup> Die Reaktion läuft aufgrund des Redoxpotential-Unterschieds zwischen Anode und Kathode ab, d.h. das Aktivmaterial der Anode muss in der elektrochemischen Spannungsreihe unterhalb des Aktivmaterials der Kathode stehen. Zum Aufladen muss gegen diesen Potentialunterschied gearbeitet werden, weshalb dazu Energie benötigt und auf diese Weise gespeichert wird.<sup>18,37,38</sup> Die Begriffe Anode und Kathode werden bei Batterien zur Vereinfachung häufig gemäß ihrer Funktion beim Entladevorgang verwendet, da strenggenommen die Elektroden beim Aufladen ihre Funktionen tauschen.<sup>13,18,39</sup>

Bei Li-Ionen-Zellen werden Li-Ionen durch Interkalation in positiven und negativen Elektrodenfestkörpermaterialeinlagen eingelagert, d.h. es wird dazu kein elementares bzw. metallisches Lithium als Aktivmaterial für die Anode verwendet.<sup>18</sup> Das Festkörpermaterialeinlage ist dazu auf einer elektrisch leitenden Folie angebracht, die als Stromkollektor und Leiter für die Elektronen dient (Abbildung 7). Obwohl Lithium unter Standardbedingungen das leichteste, feste Element ist und mit -3,04 V das niedrigste Spannungspotential in der elektrochemischen Spannungsreihe aufweist und damit in der Theorie herausragende Eigenschaften als Anodenmaterial besitzt, kommt es bei wiederholten Auflade-Vorgängen durch die Abscheidung von metallischem Lithium zu einem Dendritenwachstum.<sup>40</sup> Die nadelförmigen Dendriten können den Separator durchdringen, der die beiden Halbzellen trennt, was zu einem Kurzschluss führen würde. In Deutschland werden Li-Ionen-Batteriespeicherkraftwerke mit Kraftwerkskapazitäten im Bereich von 5 bis 13,5 MWh zur Speicherung überschüssiger Wind- und Solarenergie eingesetzt.<sup>13</sup>

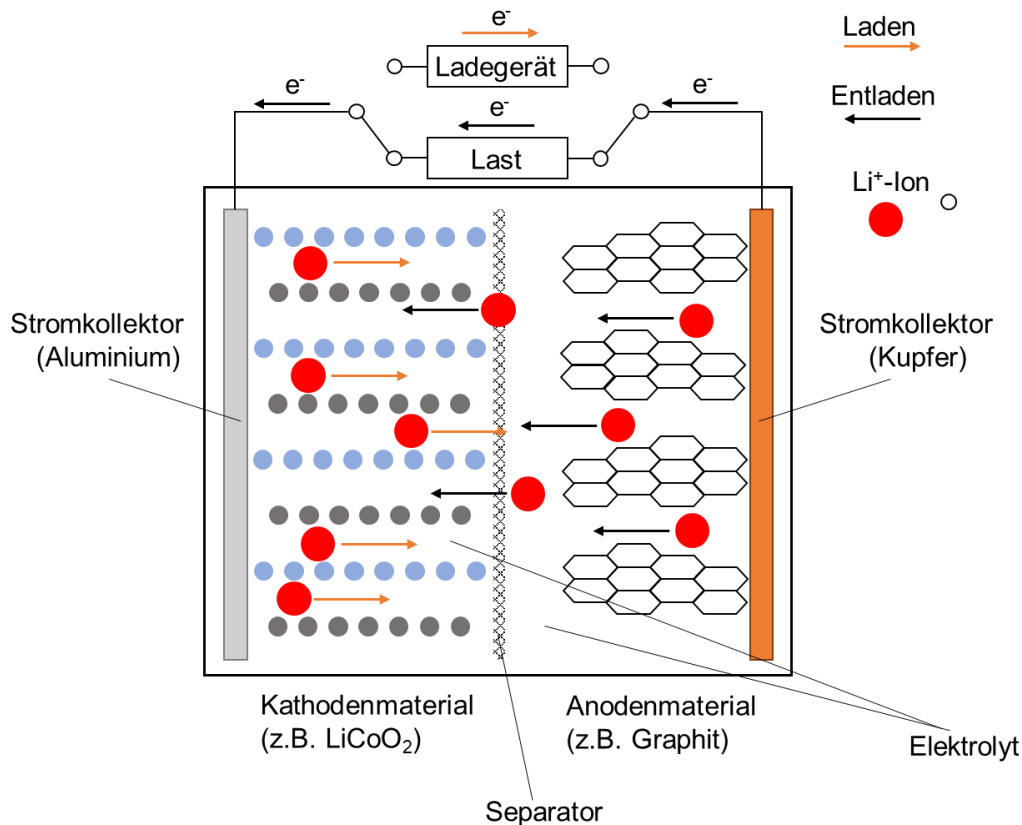


Abbildung 7: Schematischer Aufbau einer Li-Ionen-Batterie. Beim Entladen werden die  $\text{Li}^+$ -Ionen in das Kathodenmaterial und analog umgekehrt beim Laden in das Anodenmaterial interkaliert.<sup>18</sup>

Im Gegensatz zu Li-Ionen-Batterien und zu anderen Batteriesystemen wie Nickel-basierten oder NaS-Batterien, liegt bei Redox-Flow-Batterien das Aktivmaterial nicht fest mit der Elektrode verbunden oder als Elektrodenmaterial selbst, sondern als Suspension oder in gelöster Form in einem Lösemittel bzw. Elektrolyt vor.<sup>18,26,39</sup> Die energiespeichernden Elektrolyte (Anolyt, Katholyt), können auf diese Weise räumlich getrennt in externen Speichertanks gelagert werden, die je nach benötigtem Energieinhalt dimensionierbar sind.<sup>18</sup> Die Elektrolyte werden in zwei getrennten Kreisläufen mittels Pumpen in einer Reaktionskammer zusammengeführt, in der beide Flüssigkeiten durch eine Membran getrennt werden. Die Membran verhindert ein Mischen der Elektrolyte, aber ermöglicht einen Ionen- bzw. Ladungsaustausch, so dass die Redoxreaktion stattfinden kann (Abbildung 8).<sup>13,18,26</sup> Verwendet werden dazu Vanadiumoxid-, Polysulfid-Bromid und Zink-Chlor-Systeme.<sup>26</sup> An einzelnen internationalen Standorten wie bei dem japanischen Energieversorger Kansai Electric Power Corporation und einem Windpark in Irland findet

die Redox-Flow-Technik Anwendung mit Kapazitäten bis zu 12 MWh.<sup>18</sup> Im Rahmen des Forschungsprojekts „brine4power“ soll in Jena ein Redox-Flow-Speicher mit einer Kapazität von 700 MWh umgesetzt werden.<sup>13</sup> Die Redox-Flow-Technik ist somit noch nicht auf breiter Fläche etabliert. Batterien zählen grundsätzlich zu den Kurzzeitspeichersystemen.<sup>18</sup>

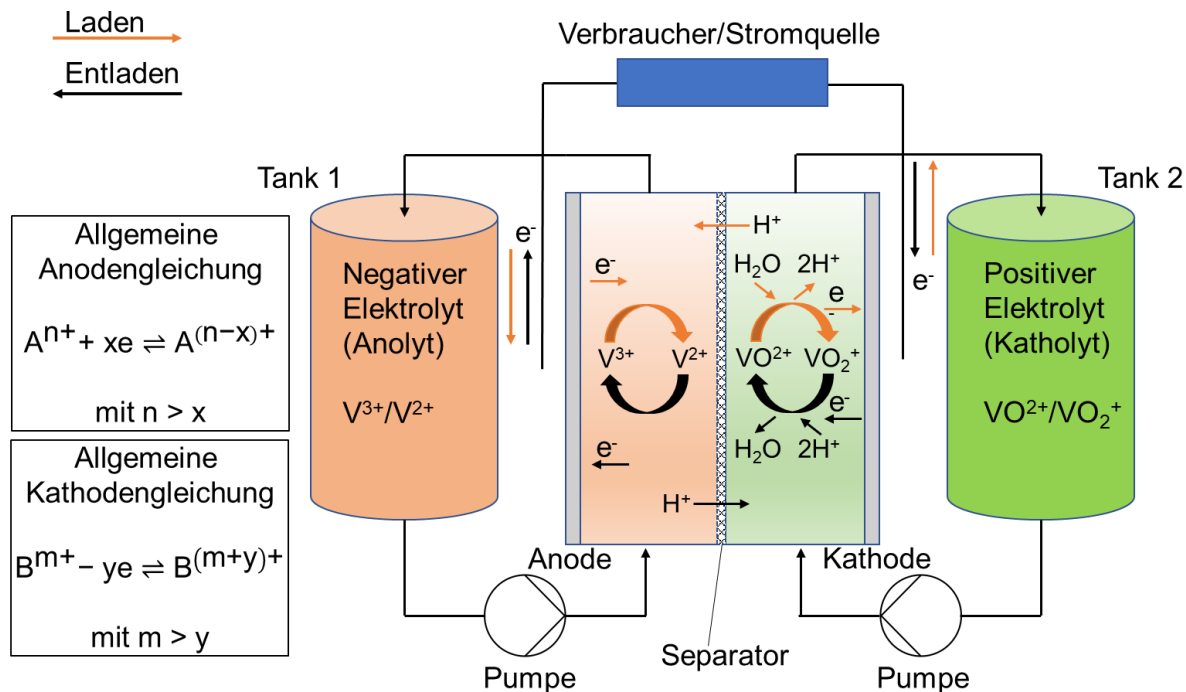


Abbildung 8: Schematischer Aufbau einer Redox-Flow-Batterie am Beispiel eines Vanadiumoxid-Systems und den allgemeinen Gleichungen für die Anoden- und Kathodenseite.<sup>26</sup>

Im Bereich der chemischen Energiespeicher können mit dem Power-to-Gas-Konzept aus überschüssiger Energie Wasserstoff oder Methan hergestellt, in Gaslagerstätten gespeichert und anschließend zum Betrieb von Gasturbinen, Blockheizkraftwerken oder Brennstoffzellen genutzt werden (Abbildung 9).<sup>13,18</sup> Wasserstoff kann durch alkalische Elektrolyse, Membran-Elektrolyse oder Hochtemperatur-Elektrolyse erzeugt werden. Bei der alkalischen Elektrolyse wird Wasser zur Erhöhung des Wirkungsgrads durch die Zugabe von 20 – 40 Ma.-% Kaliumhydroxid in einen alkalischen Bereich gebracht. Das alkalische Wasser wird anschließend durch einen Reaktionsraum aus zwei Halbzellen geführt, die mittels einer ionenleitenden Membran getrennt sind. Durch das Anlegen einer Spannung, die über der Zersetzungsspannung des Wassers liegt, werden im

Kathodenraum gasförmiger Wasserstoff und im Anodenraum gasförmiger Sauerstoff erzeugt, die an je einem Gasaustritt an den Halbzellen das System verlassen.<sup>18</sup> Bei der Membran-Elektrolyse sind die beiden Elektroden mit jeweils einem festen, hochporösen Polymerelektrolyt und mittig über eine protonenleitenden Membran verbunden. Der Polymerelektrolyt ermöglicht den Stromfluss von angelegten, bipolaren Platten, die die elektrolytische Reaktion auslösen, hin zu den Elektroden und sorgt zugleich für den Abtransport der gasförmigen Produkte weg von der Elektrode. In diesem System ist nur die Anodenseite von Wasser umspült und es kann auf den Einsatz von Kaliumhydroxid verzichtet werden.<sup>18,26</sup>

## Power-to-Gas

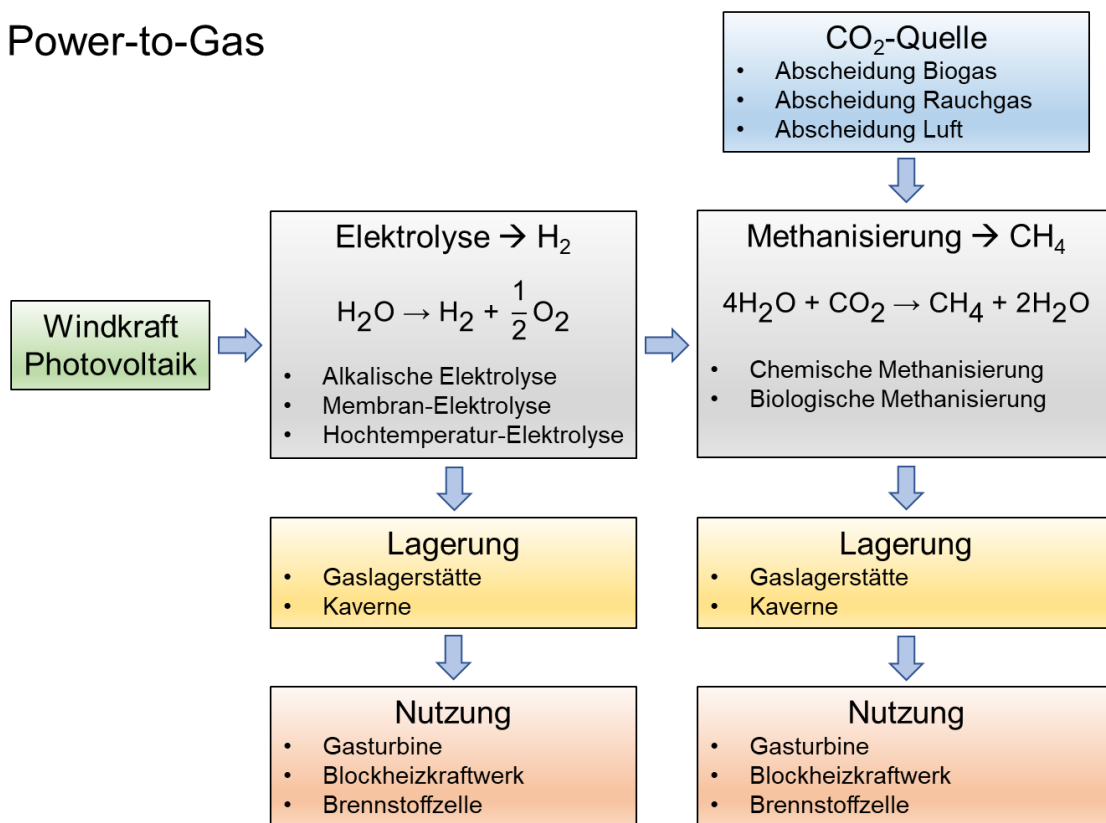


Abbildung 9: Energetische Nutzungsmöglichkeiten der chemischen Speicherung mittels Power-to-Gas-Systemen zur Erzeugung von Wasserstoff und Methan.

Bei der Hochtemperatur-Elektrolyse wird Wasserdampf bei Temperaturen im Bereich von 850 – 1000 °C gespalten, um auf diese Weise mit einer niedrigeren Zellspannung arbeiten zu können und höhere, strombezogene Wirkungsgrade zu erreichen. Die Verdampfung

des Wassers findet in einem vorgelagerten Prozessschritt statt und kann beispielsweise durch industrielle Abwärme erfolgen.<sup>18</sup> Aufgrund der volumetrisch höheren Energiedichte von Methan im Vergleich zu Wasserstoff, der sicherheitstechnischen Herausforderungen im Umgang mit Wasserstoff und der bereits breit etablierten Infrastruktur für Erdgas bzw. Methan, kann eine biologische oder chemische Methanisierung des Wasserstoffs sinnvoll sein, auch wenn aufgrund der Methanisierung der Wirkungsgrad als Energiespeicher für Methan-basierte Systeme mit 35 % unter dem Wirkungsgrad für Wasserstoffsysteme mit 42 % liegt.<sup>13,18</sup> Gemäß dem Sabatier-Prozess kann aus Kohlendioxid und Wasser in einer stark exothermen, katalysierten Reaktion Methan erzeugt werden. Als Katalysator können Nickel, Ruthenium, Rhodium, Eisen, Platin oder Cobalt dienen. Die Reaktion wird in der Praxis häufig in einem Festbettreaktor in einem Temperaturbereich von 250 – 700 °C und bei einem Druck von bis zu 30 bar durchgeführt. Eine biologische Methanisierung kann mithilfe von Archaeobakterien bei Prozesstemperaturen von 40 – 60 °C in einem Druckbereich von 1 – 3 bar in Reaktoren mit Rein – oder Mischkulturen erfolgen. Dem Vorteil des niedrigeren Druck- und Temperaturbereichs bei der biologischen Methanisierung stehen eine notwendige Fütterung der Bakterien, Abwasseraufbereitung und Schwierigkeiten im Up-scaling als Nachteile gegenüber. Für die chemische und die biologische Methanisierung kann Kohlendioxid aus der Abscheidung von Biogas oder Rauchgasen sowie aus der Luft abgeschiedenes Kohlendioxid als Quelle dienen (Abbildung 10). Power-to-Gas-Systeme dienen vor allem zur Langzeitspeicherung von Energie.<sup>18</sup>

Für die chemische Energiespeicherung werden außerdem Power-to-Liquid-Prozesse eingesetzt. Mittels der Fischer-Tropsch-Synthese können Benzin und Diesel synthetisiert werden. Methanol kann durch den Einsatz der Methanolsynthese erzeugt werden. Beide Prozesse sind stark exotherm. Bei der Fischer-Tropsch-Synthese werden Kohlenmonoxid und Wasserstoff in Abhängigkeit von der Temperatur, des Drucks und der Art des Katalysators zu Kohlenwasserstoffen wie z.B. Benzin, Diesel oder Wachsen umgesetzt. Zur Herstellung synthetischen Kraftstoffs findet die Fischer-Tropsch-Synthese in einem Temperaturbereich von 120 – 350 °C bei Drücken von 1 – 70 bar statt, wobei Cobalt, Eisen oder Ruthenium als Katalysator dienen (Abbildung 10).<sup>18,38</sup> Das nötige Kohlenmonoxid wird zuvor aus Kohlendioxid über die Wassergas-Shift-Reaktion erzeugt. Technisch kann

die Fischer-Tropsch-Synthese in Rohrbündel- oder Wirbelschichtreaktoren durchgeführt werden. Die Niederdruck-, Mitteldruck- und Hochdrucksynthese sind drei typische Verfahren zur Herstellung von Methanol aus Kohlendioxid und/oder Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Die Niederdrucksynthese findet bei Drücken zwischen 50 und 100 bar und Temperaturen im Bereich von 220 - 280 °C mithilfe von Katalysatoren auf Basis von Kupfer, Zink und Aluminiumoxid statt. Die Mitteldrucksynthese erfolgt bei 300 °C und 100 - 250 bar mit Katalysatoren auf Basis von Chrom(III)-oxid und Zink.

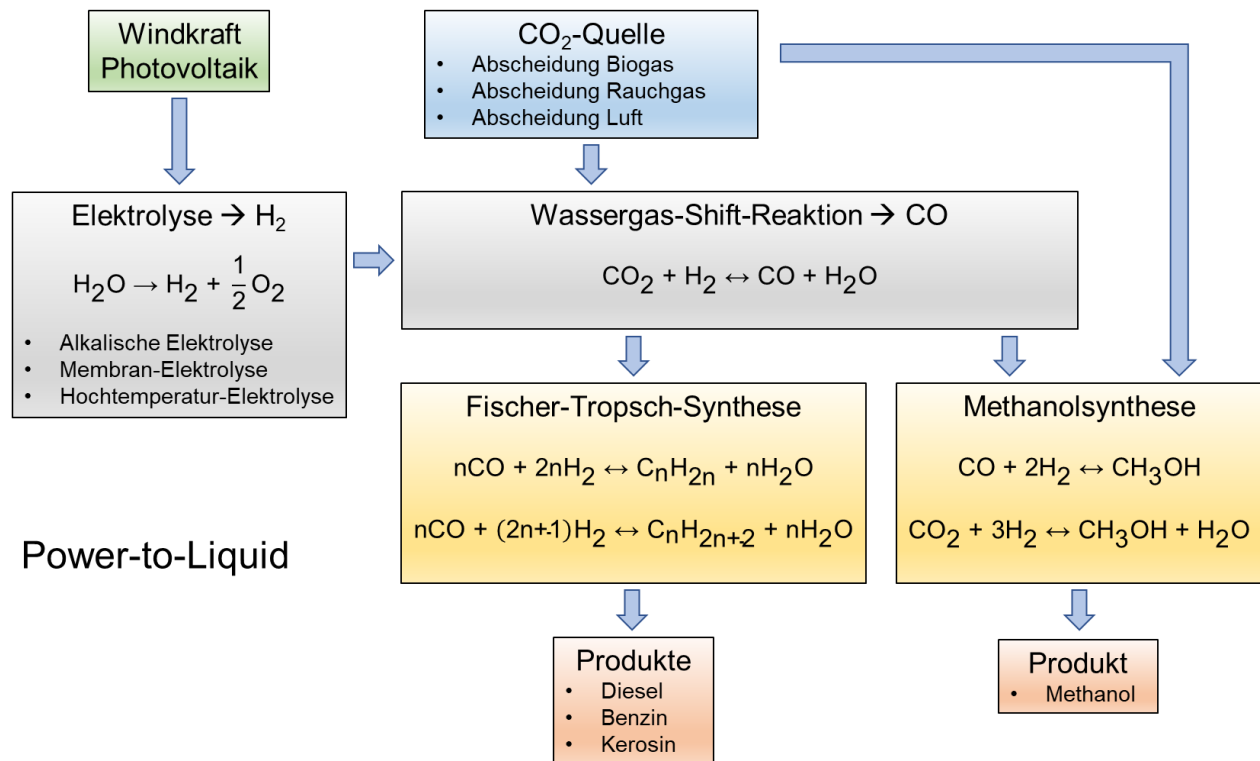


Abbildung 10: Routen von Power-to-Liquid-Prozessen zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen mittels Fischer-Tropsch- und Methanolsynthese.<sup>18,38</sup>

Die Hochdrucksynthese verläuft in einem Druckbereich von 250 – 350 bar bei Temperaturen von 320 – 380 °C mit einem Katalysator auf Basis von Chrom(III)-oxid und Zink, sie wird aber aufgrund der geringen Ausbeute und des Temperaturführung kaum in der Praxis angewendet. Erreichbare Wirkungsgrade liegen bei Fischer-Tropsch-Synthese im Bereich von 65 – 70 % und bei der Methanolsynthese bei 75 – 80 %.<sup>18</sup>

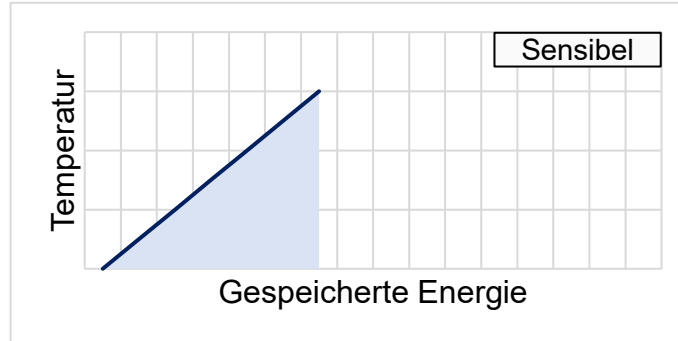
Da rund 50 % des Endenergieverbrauchs in Europa auf den Wärme- und Kältesektor fallen, können thermische Energiespeichersysteme bzw. Wärmespeicher ein wichtiger Baustein der Energiewende bei der Realisierung der Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien sein. Bei thermischen Energiespeichern wird grundsätzlich zwischen sensiblen, latenten und thermochemischen Energiespeichern unterschieden. Sensible Wärmespeicher speichern in Abhängigkeit ihrer spezifischen Wärmekapazität durch die Erhöhung und Erniedrigung ihrer Temperatur Wärmeenergie ein- und aus, ohne dabei einen Phasenübergang zu vollziehen. Der Phasenübergang beim Wechsel der Aggregatzustände und die damit verbundene Enthalpieänderung wird von latenten Wärmespeichern genutzt.<sup>13,18</sup> Für das System fest-flüssig/flüssig-fest ist dies beim Einspeichern die Schmelzenthalpie  $\Delta H_{sm}$  und beim Ausspeichern die zugehörige, vom Energibetrag gleich große, Erstarrungsenthalpie  $\Delta H_{ers}$  und analog für das System flüssig-gasförmig/gasförmig-flüssig die Verdampfungsenthalpie  $\Delta H_v$  und die Kondensationsenthalpie  $\Delta H_{kond}$ .<sup>41</sup> Da es insbesondere beim Phasenübergang von flüssig zu gasförmig zu einer deutlichen Volumenzunahme des Speichermaterials kommt, ist die technische Handhabung anspruchsvoller als bei sensiblen Wärmespeichern, allerdings kann durch die Nutzung der Enthalpie eine deutlich höhere Energiespeicherichte erreicht werden. Sehr hohe Energiespeicherichten können mit thermochemischen Wärmespeichern erreicht werden. Beim thermochemischen Speicherprinzip wird die Reaktionsenthalpie einer reversiblen chemischen Reaktion genutzt, um bei einer endothermen Hinreaktion Energie einzuspeichern, die infolge der exothermen Rückreaktion wieder ausgespeichert werden kann.<sup>18,26</sup> Der Sorptionsspeicher wird den thermochemischen Wärmespeichern zugeordnet, auch wenn bei seinem Funktionsprinzip der Phasenübergang von Wasserdampf genutzt wird, der bei der Entladung an einem geeigneten Substrat kondensiert und das entstandene Wasser beim Laden durch Wärme wieder verdampft und desorbiert. Die Energiespeicherichte steigt vom sensiblen über den latenten zum thermochemischen Wärmespeicher, jedoch sinkt umgekehrt proportional dazu der bisherige technische Entwicklungsstand, da insbesondere sensible Wärmespeicher technisch und kommerziell bereits breiter etabliert sind und thermochemische Wärmespeicher sich bezüglich ihrer Technologie im Status der Grundlagenforschung befinden (Abbildung 11).<sup>18,42</sup>



### Sensibler Wärmespeicher

Kein Phasenübergang,  
Temperaturerhöhung bei der  
Speicherung von Wärme:  
 $\Delta T \sim \Delta Q$

*Spezifische Wärme*

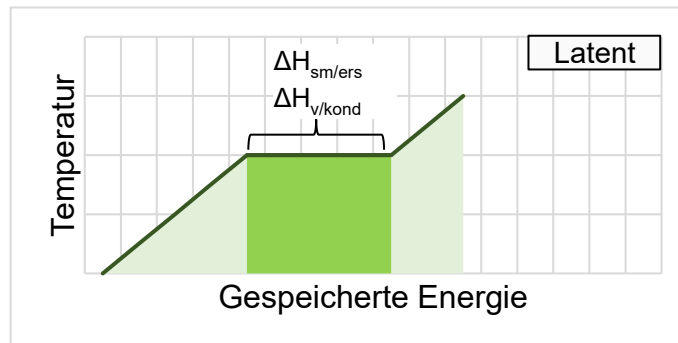


### Latenter Wärmespeicher

Enthalpie beim  
Phasenübergang wird ein- und  
ausgespeichert:  
 $\Delta T = 0$

$$\Delta Q = \Delta H_{sm}/\Delta H_{ers}, \Delta H_v/\Delta H_{kond}$$

*Phasenumwandlungsenthalpie*



### Thermochemischer Wärmespeicher

Energie wird als  
Reaktionswärme endotherm  
gespeichert und exotherm  
freigesetzt:  
 $\Delta T = 0, \Delta Q = \Delta H_R$

*Reaktionsenthalpie*

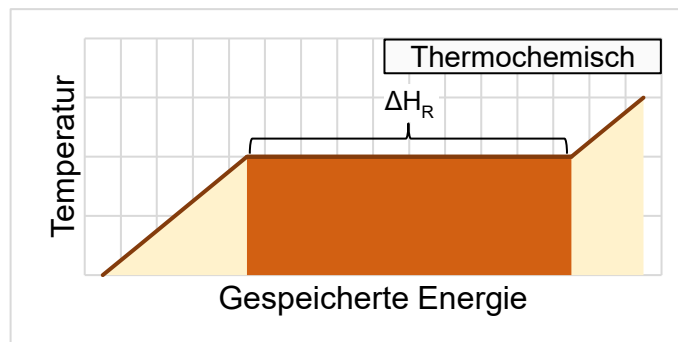


Abbildung 11: Die energetischen Grundlagen sensibler, latenter und thermochemischer Wärmespeicher.

Aufgrund der einfacheren technischen Bauweise sind sensible Wärmespeicher daher auch meist kostengünstiger als latente oder thermochemische Systeme.<sup>18,43</sup> Sensible, latente und thermochemische Wärmespeichersystem können nach den Aggregatzuständen ihrer Bestandteile sowie auch der Art des Prozesses genauer klassifiziert werden (Abbildung 12).<sup>44</sup>

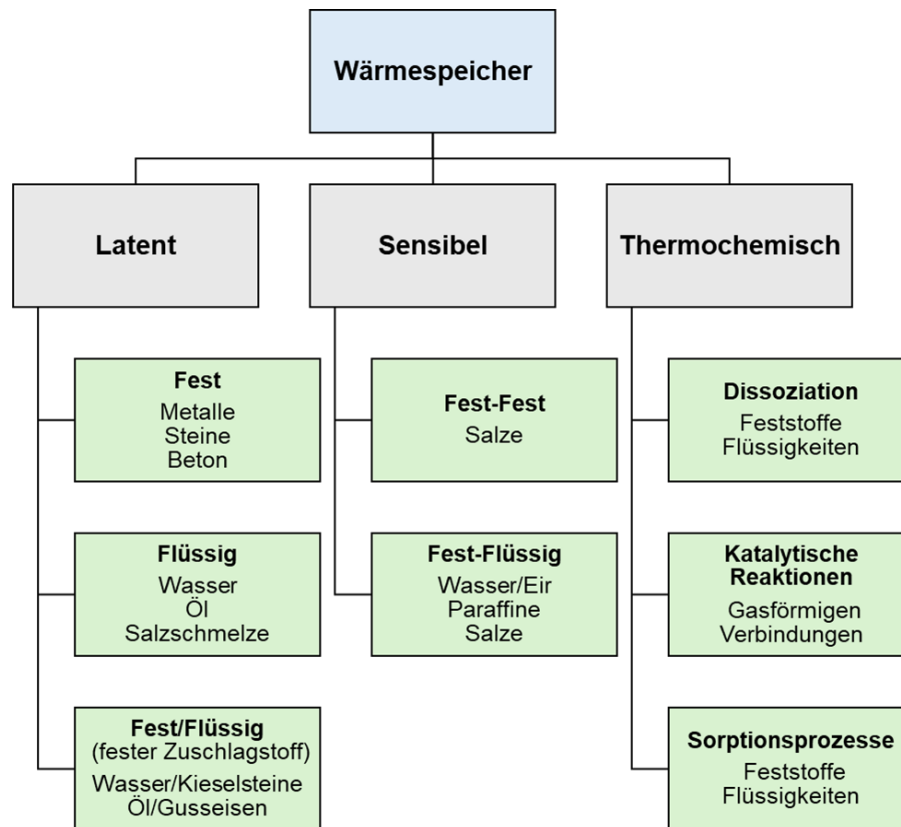


Abbildung 12: Sensible, latente und thermochemische Wärmespeicher, kategorisiert nach den Aggregatzuständen ihrer Bestandteile sowie nach Art des Prozesses.<sup>44</sup>

Neben dem physikalisch-chemischen Prinzip der Energiespeicherung ist das Temperaturniveau, bei dem ein Wärmespeicher eingesetzt wird, ein wesentliches Kriterium. Grundsätzlich wird zwischen Nieder- und Hochtemperatur-Wärmespeichern unterschieden. Die Grenze zwischen Nieder- und Hochtemperatur ist je nach Literatur unterschiedlich definiert, auch im Hinblick darauf, ob ein gesonderter Mitteltemperaturbereich festgelegt ist oder nicht. So wird ein Temperaturbereich unter 100 °C als Niedertemperaturbereich für Wärmespeicher festgelegt, während ab 300 °C<sup>18</sup>, ab einem Übergangsbereich von 300 – 400 °C<sup>45</sup> oder ab 500 °C<sup>46</sup> der Hochtemperaturbereich beginnt und damit der resultierende übrige Bereich dazwischen als Mitteltemperaturbereich gilt. Bei einer ausschließlichen Unterteilung in Nieder- und Hochtemperaturbereich wird auch die Temperatur von 200 °C<sup>47</sup> als Grenze definiert (Tabelle 2).

Tabelle 2: Definitionen der Temperaturbereiche für Wärmespeicher aus der Fachliteratur.

Niedertemperatur	Mitteltemperatur	Hochtemperatur	Quelle
100 °C <	100 °C – 300 °C	> 300 °C	Sterner und Stadler <sup>18</sup>
100 °C <	100 °C – 300 bis 400 °C	> 300 bis 400 °C	Steinmann <sup>45</sup>
100 °C <	100 °C – 500 °C	> 500 °C	Herwig und Moschallski <sup>46</sup>
Niedertemperatur		Hochtemperatur	Quelle
200 °C <		> 200 °C	Ali et al. <sup>47</sup>

Aus Sicht der Werkstofftechnik werden Temperaturen oberhalb von 500 °C, denen Werkstoffe bzw. daraus erzeugte Bauteile im Rahmen ihrer Anwendung standhalten müssen, als Hochtemperaturbereich betrachtet.<sup>48</sup> Wärmespeicher können je nach Bautyp und Auslegung den gesamten Bereich von Kurzzeit- bis Langzeitspeicherung abdecken<sup>49</sup> und sowohl zentral/dezentral als auch stationär/mobil zum Einsatz kommen<sup>18</sup>.

Sensible Wärmespeicher, die mit einem festen Wärmespeichermaterial betrieben werden, haben den Vorteil eines sehr breiten Einsatztemperatur-Spektrums, das in vergleichbarer Weise sonst nur bei thermochemischen Wärmespeichern vorliegt (Tabelle 3).<sup>44</sup>

Tabelle 3: Typische Einsatztemperaturbereiche von sensiblen, latenten und thermochemischen Wärmespeichern.<sup>44</sup>

Speichertyp	Speichermaterial/Reaktionstyp	Einsatztemperaturbereich [°C]
<b>Sensibel</b>	Fest	0 bis 1000
	Flüssig	-25 bis >500
<b>Latent</b>	Alle Typen	-50 bis ca. 500 °C
<b>Thermochemisch</b>	Sorptionsspeicher	ca. 30 bis >500
	Chemische Reaktion	ca. 70 bis 1000

Sensible Wärmespeicher werden technisch als großvolumige Warmwasserspeicher in Größenordnungen von 8.000 – 50.000 m<sup>3</sup> und mit Leistungen im GWh-Bereich zur Unterstützung von Heizkraftwerken eingesetzt.<sup>13</sup> Ein solcher Großwarmwasserspeicher kann zur Erhöhung der Flexibilität bei der Kraft-Wärme-Kopplung stromgeführter Blockheizkraftwerke dienen, um durch Nah- und Fernwärme Diskrepanzen zwischen Erzeugung und Bedarf bei der Wärmeversorgung von Quartieren auszugleichen. Bei

stromgeführten Blockheizkraftwerke wird die Betriebsweise nach dem Strombedarf geregelt, während bei der wärmegeführten Betriebsweise nach dem Wärmebedarf geregelt wird. Daher kann beim stromgeführten Betrieb Wärme anfallen, die zum Zeitpunkt der Erzeugung nicht benötigt wird und analog umgekehrt Strom beim wärmegeführten Betrieb anfallen, der oberhalb des aktuellen Bedarfs liegt. Die überschüssige Wärme beim stromgeführten Betrieb kann durch das Wärmespeichersystem zeitlich gepuffert werden (Abbildung 13). Zur Nah- und Fernwärmenutzung kann ebenso anfallende Abwärme z.B. bei der Müllverbrennung oder von Industrieanlagen durch Großwarmwasserspeicher an den Bedarf angepasst werden.<sup>49</sup>

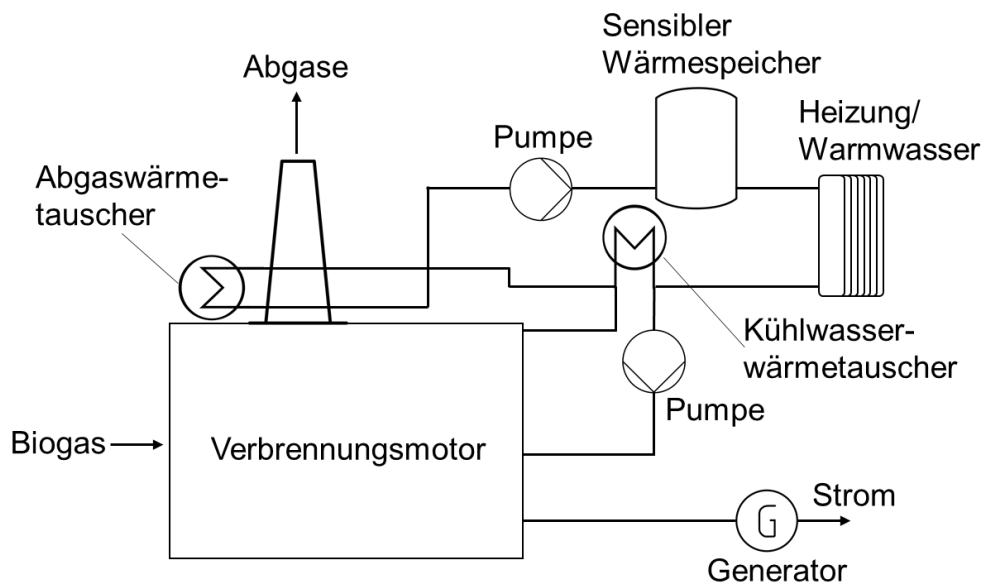


Abbildung 13: Vereinfachtes Schema eines biogasbetriebenen, stromgeführten Blockheizkraftwerks mit Betriebsoptimierung der Wärmeversorgung durch einen sensiblen Wärmespeicher.

Feste Speichermedien wie z.B. Eisenoxidsteine dienen in Speicherheizungen zur sensiblen Wärmespeicherung. Dazu wird die Speichermasse durch eine elektrische Widerstandsheizung geladen und gibt die Wärme über einen zeitlich ausgedehnten Bereich wieder an die Umgebung ab.<sup>18</sup>

Zur latenten Wärmespeicherung wird häufig die Schmelzwärme von Phasenwechselmaterialien (Phase Change Materials) wie Salze, Paraffine oder metallische Legierungen genutzt.<sup>13</sup> In Gebieten ohne Nah- oder Fernwärmeanbindung

können transportierbare Container als mobile Latentwärmespeicher im Straßen- und Schienenverkehr eingesetzt werden, um Quartiere mit Wärmeenergie zu versorgen. Als Phasenwechselmaterial wird dazu das Salz Natriumacetat-Trihydrat eingesetzt.<sup>49</sup> Eine kleiner dimensionierte Anwendung besteht im Einsatz von Latentwärmespeichern mittels Salzen oder Paraffinen zum Speichern der Motorwärme von Kraftfahrzeugen, um durch eine zeitversetzte Wärmeabgabe beim Kaltstart die nötige elektronische Last der Autobatterie zu minimieren.<sup>13</sup> Im Bereich der thermochemischen Wärmespeicher stehen vor allem das Reaktordesign, die Entwicklung neuer Speichermaterialien und die Untersuchung von Alterungsmechanismen der eingesetzten Speichermaterialien im Mittelpunkt. Im Bereich der chemisch reversiblen Reaktionen werden u.a. die Dampfreformierung, der technische Kalkkreislauf oder die Hydroxidbildung für Speicherprozesse eingesetzt. Im Gebiet der Sorptionsspeicher sind Systeme auf der Basis von Zeolithen oder Silicagel mit Wasser/Wasserdampf verbreitet. Ein Zeolith-basiertes Sorptionsspeichersystem wird kommerziell bereits in Geschirrspülern beim Trocknungsprozess angewendet. Wärmespeicher können als technische Komponente dazu dienen, die Prozessführung anderer Energiespeichersysteme zu optimieren. Die bei den stark exothermen Reaktionen im Bereich von Power-to-Gas und Power-to-Liquid erzeugte Reaktionswärme, kann mittels Wärmespeichertechnik zeitlich versetzt zur Wasserverdampfung bei der vorgeschalteten Hochtemperaturelektrolyse eingesetzt werden. Bei Biogasanlagen können Wärmespeicher dazu dienen gespeicherte Abwärme zur Hygienisierung von Abfällen oder zur Beheizung von Fermentern zu nutzen. Insbesondere zur Kopplung der Energiesektoren Strom und Wärme können Wärmespeicher mittels Kraft-Wärmekopplung, Elektrowärmepumpen und Power-to-Heat-Systeme einen wichtigen Beitrag beim Ausbau der erneuerbaren Energien liefern.<sup>18</sup> Wärmespeicher können somit direkt als Energiespeicher fungieren oder zur Optimierung anderer Speichersysteme beitragen und sind daher ein bedeutender Bestandteil zur praktischen Umsetzung der Energiewende.

## **2.2 Anforderungen an Wärmespeicher und Wärmespeichermaterial**

Das System Wärmespeicher, auch Thermischer Energiespeicher genannt, besteht aus den drei Hauptkomponenten Speichermaterial, Wärmeübertragungsmedium und Behälter

bzw. Container.<sup>50</sup> Gemäß *González-Roubaud et al.* bestehen für das Wärmespeichersystem 5 entscheidende quantitativen Kriterien Speicherkapazität, Leistung, Effizienz, Lade- /Entladezeit und Kosten (Tabelle 4).<sup>50</sup>

Tabelle 4: Wichtige Kriterien zur Beurteilung von Wärmespeichersystemen.<sup>50</sup>

<b>Kenngroße</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
Speicherkapazität	[kWh] oder [kJ]	Maß für die Kapazität der speicherbaren Energie; kann auch in das Verhältnis zur Größe des Speichers gesetzt werden
Leistung	[kW]	Maß dafür, wie schnell Energie pro Zeit geladen und entladen werden kann
Effizienz	[%]	Verhältnis von bereitgestellter Energie beim Entladen zu benötigter Energie beim Laden
Lade-/Entladezeit	[h]	Zeitliche Dauer zum Laden oder Entladen
Kosten	[\$/kWh] oder [\$ /kW]	Kosten des Speichersystems im Verhältnis zur Energie oder zur Leistung

Das Wärmespeichermaterial selbst sollte laut *Gasia et al.* eine langfristige chemische Stabilität aufweisen und keine chemische Zersetzung oder eine Phasentrennung zeigen. Es sollte sowohl mit dem Behältermaterial als auch mit dem Wärmeübertragungsmedium verträglich und darüber hinaus ungiftig und nicht entflammbar sein.

Auch soll das Wärmespeichermaterial nach wiederholten Heiz- und Kühlzyklen chemisch stabil bleiben und über die Zyklen hinweg seine thermochemischen Eigenschaften näherungsweise beibehalten.<sup>51</sup>

*Fernández et al.* haben erwünschte Anforderungskriterien an Wärmespeichermaterialien den Kategorien „Thermophysikalisch“, „Chemisch“, „Ökonomisch“, „Mechanisch“ und „Ökologisch“ zugeordnet (Tabelle 5).<sup>52</sup>

Tabelle 5: Wichtige Kriterien und die erwünschte Eigenschaften für die Beurteilung von Wärmespeichersystemen.<sup>52</sup>

Kategorie	Beschreibung
Thermophysikalisch	Hohe Energiedichte (bezogen auf Masse oder Volumen), hohe Wärmeleitfähigkeit, hohe Wärmekapazität, hohe Dichte, Langzeit-Zyklenstabilität
Chemisch	Chemisch langzeitstabil ohne chemische Zersetzung, ungiftig, nicht explosiv, geringe Korrosionsneigung oder Reaktivität mit dem Wärmeübertragungsfluid, Kompatibilität mit den für das Wärmespeichersystem verwendeten Werkstoffen
Ökonomisch	Günstiges, gut verfügbares Material mit geringen Verarbeitungskosten bei der Formgebung
Mechanisch	Gute mechanische Stabilität, geringer Wärmeausdehnungskoeffizient, hohe Bruchzähigkeit, hohe Druckfestigkeit
Ökologisch	Geringer Energiebedarf und CO <sub>2</sub> -Fußabdruck bei der Herstellung

### 2.3 Charakterisierung von Wärmespeichermaterialien

Zur Charakterisierung von Energiespeichersystemen und -materialien dienen zahlreiche Eigenschaften, die auch von der Art der Anwendung abhängig sein können (Tabelle 6).

Tabelle 6: Eigenschaften zur Charakterisierung von Energiespeichersystemen.

Physikalisch	Energetisch	Zeitlich	Räumlich	Ökonomisch	Temperatur
Elektrisch	Leistung	Kurzzeit	Zentral	Märkte	Niedertemperatur
Elektrochemisch/Chemisch	Energie	Langzeit	Dezentral	Kapitalkosten	Mitteltemperatur
Mechanisch			Ortsfest	Betriebskosten	Hochtemperatur
Thermisch			Mobil		

Bei der Charakterisierung von Wärmespeichermaterialien sind wichtige physikalisch Kenngrößen häufig mit deren Wärmeinhalt und/oder der Wärmestromdichte verknüpft. Der sensible Wärmeinhalt  $Q_s$  einer homogenen Speichermasse hängt von seiner Masse, der spezifischen Wärmekapazität und der Temperaturänderung ab (Gleichung 1).<sup>18,26,49</sup>

$$Q_s = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Gleichung 1

 $Q_s$ : Wärmeinhalt [J] $m$ : Masse [kg] $c_p$ : Spezifische Wärmekapazität [J/(kgK)] $\Delta T$ : Temperaturdifferenz [K]

Bei der Gleichung ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der Wärmekapazität grundsätzlich um eine temperaturabhängige Größe handelt. In der Gleichung ist die isobare spezifische Wärmekapazität zu finden. Für Feststoffe und viele Flüssigkeiten kann zur Vereinfachung die Annahme  $c_p = c_v = c$  getroffen werden, da im Gegensatz zu Gas die Arbeit bei der Volumenausdehnung gegen den Außendruck vernachlässigbar ist und sie aufgrund der geringen thermischen Ausdehnung als inkompressibel angenommen werden können.<sup>26,53</sup> Da ein Wärmespeicher mit mehr als einer Art von Speichermasse bestückt sein kann und auch der Behälter der Speichermassen und die Einbauten Wärme aufnehmen, kann die Gleichung für den Wärmeinhalt  $Q_{sp}$  eines sensiblen Wärmespeichers durch Aufsummierung der einzelnen Speichermassen sowie der Behälter und Einbauten erweitert werden (Gleichung 2).

$$Q_{sp} = \sum m_i \cdot c_{p,i} \cdot \Delta T + m_B \cdot c_{p,B}$$

Gleichung 2

 $Q_{sp}$ : Wärmeinhalt [J]

Indizes

 $m$ : Masse [kg] $i$ : Speichermasse  $i$  $c_p$ : Spezifische Wärmekapazität [J/(kgK)] $B$ : Behälter $\Delta T$ : Temperaturdifferenz [K]

Neben der Fähigkeit Wärme zu speichern ist der Transport von Wärme bei der Anwendung eines Wärmespeichers essenziell, um die Wärme beim Ladevorgang zur Speichermasse und beim Entladen von der Speichermasse zur Wärmesenke zu führen, aber auch um die unerwünschte Abfuhr von Wärme aus dem Behälter durch geeignete Wärmeisolation zu verhindern. Die wichtigsten Arten der Wärmeübertragung hinsichtlich sensibler Wärmespeicher sind Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion.



Die Wärmeleitung beschreibt den Mechanismus des Wärmetransports durch die Übertragung kinetischer Energie zwischen Atomen und Molekülen, verursacht durch Gitterschwingungen, Stöße und Elektronendiffusion, wenn freie Elektronen im Material vorhanden sind. Dieser Vorgang ist temperatur- und materialabhängig und findet im molekularen Bereich statt, ohne makroskopische Transportvorgänge.<sup>18,54</sup> Die mathematische Grundlage zur Berechnung der Wärmeleitung ist die Differentialgleichung von Fourier, die durch auf den Anwendungsfall bezogene Randbedingungen vereinfacht und gelöst werden kann.<sup>49,54</sup> Der eindimensionale, stationäre Fall einer ebenen Wand oder Platte ohne innere Wärmequelle beschreibt die funktionelle Abhängigkeit eines stationären Wärmestroms  $\dot{Q}$ , d.h. die Menge an Wärme  $Q$ , die pro Zeit übertragen wird, in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz, der Übertragungsfläche  $A$ , der Dicke der Wand bzw. Platte  $l$  und der material- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  (Gleichung 3).<sup>54</sup> Dieser Zusammenhang findet messtechnisch im Einplattenverfahren bzw. in der Methode der Guarded Hot Plate Anwendung, um die Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln. Mit dieser Methode kann nach DIN EN 12667 die Scherbenwärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, tr.}$  eines rückgetrockneten keramischen Scherbens bei einer Mitteltemperatur von 10 °C bestimmt werden.<sup>55</sup>

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{\delta t} = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{l} \rightarrow \lambda = \frac{\dot{Q} \cdot l}{A \cdot \Delta T} \quad \text{Gleichung 3}$$

$$\text{mit } \frac{\delta \dot{Q}}{\delta t} = 0 \text{ (stationär)}$$

$\dot{Q}$ : Wärmestrom [J/s]

$\lambda$ : Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]

$A$ : Übertragungsfläche [m<sup>2</sup>]

$\Delta T$ : Temperaturdifferenz [K]

$l$ : Dicke [m]

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine wichtige Kenngröße für sensible Wärmespeicher, da sie als Proportionalitätsfaktor die material- und temperaturabhängige Fähigkeit Wärme zu transportieren repräsentiert. Das ist entscheidend bei der Wahl des Materials für Wärmespeichermassen und Materialien für Behälter und Einbauten, da z.B. eine höhere

Wärmeleitfähigkeit von festen Wärmespeichermassen bei schnellen Aufheiz- und Abkühlprozessen zu weniger thermisch induzierten Spannungen führt und eine niedrige Wärmeleitfähigkeit des Behältermaterials einer besseren Wärmeisolierung dient.

Die Wärmeübertragung durch Strahlung ist ebenfalls von Bedeutung für die Wärmeisolierung des Behälters, da Wärme an die Umgebung abgestrahlt werden kann, was zu Wärmeverlusten führt. Die Wärmespeichermasse kann außerdem durch eine Strahlungsheizung beladen werden, die beispielsweise mittels Überschussstrom betrieben wird. Bei der Wärmeübertragung durch Strahlung wird Energie von einem Körper in Form von elektromagnetischen Wellen emittiert, d.h. diese Form der Energieübertragung ist nicht an Materie gekoppelt. Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz gibt jeder Körper, dessen Temperatur größer 0 K ist, proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur und mit der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$  als Proportionalitätsfaktor Energie in Form von Strahlung ab (Gleichung 4), ausgedrückt durch die Wärmestromdichte  $\dot{q}$  bzw. den Wärmestrom dividiert durch die strahlende Fläche A. Je nach Material und der Oberflächenbeschaffenheit weist der strahlende Körper einen Emissionskoeffizienten bzw. einen Emissionsgrad  $\varepsilon$  auf, dessen Wert zwischen 0 und 1 liegt.<sup>18,26,41,56</sup>

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{Gleichung 4}$$

mit  $\varepsilon = 1$  für schwarze Körper

$\dot{q}$ : Wärmestromdichte [J/(sm<sup>2</sup>)]

$\dot{Q}$ : Wärmestrom [J/s]

A: Strahlende Fläche [m<sup>2</sup>]

$\varepsilon$ : Emissionskoeffizient [-]

$\sigma$ : Stefan-Boltzmann-Konstante =  $5,670 \cdot 10^{-8}$  [W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)]

T: Temperatur [K]

Der Emissionskoeffizient beschreibt den Umfang, in dem ein Körper Strahlung emittieren kann. Ein idealer schwarzer Körper absorbiert sämtliche auftreffende Wärmestrahlung und hat die Fähigkeit Strahlung nur in Abhängigkeit der Temperatur zu emittieren, d.h. sein Emissionskoeffizient ist gleich 1. Für einen realen Körper ist  $\varepsilon \leq 1$  und kann neben der Temperatur auch von der Strahlungsrichtung und der Wellenlänge abhängig sein. Wenn

zwei Körper 1 und 2 unterschiedlicher Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  gegenseitig Strahlung emittieren und absorbieren, ergibt sich bezogen auf die Austauschfläche eine Netto-Wärmestromdichte  $\dot{q}_{12}$  (Gleichung 5).<sup>54,56</sup> Die Strahlungsaustauschzahl  $C_{12}$  berücksichtigt dabei die Abhängigkeit von den Oberflächen und den Emissionskoeffizienten der strahlenden Körper sowie die räumliche Anordnung der Oberflächen zueinander.<sup>54</sup>

$$\dot{q}_{12} = C_{12} (T_1^4 - T_2^4)$$

Gleichung 5

$\dot{q}$ : Wärmestromdichte [J/(sm<sup>2</sup>)]

$C_{12}$ : Strahlungsaustauschzahl [W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)]

$T_1$ : Temperatur 1 [K]

$T_2$ : Temperatur 2 [K]

In sensiblen Wärmespeichern können Fluide als Wärmespeichermasse, Wärmeträgermedium oder auch als beides zugleich dienen, wie es z.B. bei wasserbetriebenen, sensiblen Wärmespeichern der Fall ist.<sup>18</sup> Der Wärmeenergietransport, der durch die makroskopische Bewegung eines Fluids entsteht, wird Konvektion, konvektiver Wärmeübergang oder auch Wärmeströmung genannt. Da in diesem Fall ein Stoffstrom zwischen zwei Systemen den Wärmetransport verursacht, ist ein offenes System notwendig. Dabei nimmt ein gasförmiges oder flüssiges Medium thermische Energie an einer Oberfläche höherer Temperatur auf, führt eine makroskopische Strömungsbewegung aus und gibt die thermische Energie an einer Oberfläche niedrigerer Temperatur ab.<sup>18,54,56</sup>

Bei der natürlichen Konvektion erfolgt die makroskopische Fluidbewegung allein durch den Auftrieb aufgrund temperaturabhängiger Dichteunterschiede, während bei der erzwungenen Konvektion die Strömung maßgeblich durch technische Fördersysteme wie Pumpen oder Ventilatoren erzeugt wird. Der technisch wichtige Vorgang des konvektiven Wärmeübergangs zwischen einem strömenden Fluid und einer ebenen Wand wird durch den empirischen Ansatz des Newtonschen Abkühlungsgesetz (Gleichung 6) vereinfacht zusammengefasst.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \alpha (T_W - T_F)$$

Gleichung 6

 $\dot{q}$ : Wärmestromdichte [J/(sm<sup>2</sup>)] $\dot{Q}$ : Wärmestrom [J/s]A: Austauschfläche [m<sup>2</sup>] $\alpha$ : Wärmeübergangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup>K)] $T_W$ : Wandtemperatur [K] $T_F$ : Fluidtemperatur [K]

Dabei gilt die Wärmestromdichte  $\dot{q}$  als direkt proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Temperatur der Wand  $T_W$  und der Temperatur des Fluids  $T_F$  in hinreichend weitem Abstand zur Wand, der als thermische Grenzschicht bezeichnet wird. Als Proportionalitätsfaktor dient der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$ , in dem die komplexen Abhängigkeiten des Prozesses von temperaturabhängigen Stoffgrößen des Fluids, Prozessparameter der Strömung wie Strömungsgeschwindigkeit und Turbulenzgrad sowie Geometrie und Oberflächenrauigkeit der Wand zusammengefasst sind. Daher ist der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  keine Materialkonstante bzw. Stoffeigenschaft, sondern ein empirischer Faktor, der meistens experimentell bestimmt wird.<sup>53,54,56</sup> Für  $T_W > T_F$  wird durch diesen Zusammenhang eine Abkühlung der Wand und analog umgekehrt durch  $T_W < T_F$  das Erwärmen der Wand beschrieben.

In der überwiegenden Zahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen sind  $c_p$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$  wichtige Kenngrößen zur Charakterisierung von Wärmespeichern bzw. Wärmespeichermaterialien.<sup>42,57–77</sup> Darüber hinaus werden auch der thermische Ausdehnungskoeffizient<sup>70,75,76</sup> und die Zyklenstabilität<sup>42,69,72</sup> zur Charakterisierung berücksichtigt. Häufig wird die lineare Näherung des temperaturabhängigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten verwendet, die über einen Temperaturbereich gemittelt ist (Gleichung 7).<sup>78,79</sup>

Die Zyklenstabilität bzw. Zyklenfestigkeit beschreibt die mechanische, chemische Widerstandsfähigkeit sowie die Konstanz der Kapazität über eine Anzahl definierter Zyklen hinweg, d.h. die Effizienz und Lebensdauer in Abhängigkeit der Zyklenzahl wird betrachtet.<sup>18,80,81</sup> Die Zyklenstabilität kann anhand unterschiedlicher Kennwerte

charakterisiert werden. So kann der Verlust der Speicherkapazität oder auch die Veränderung der strukturellen oder mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Zyklenzahl als Maßstab für die Zyklenstabilität dienen, wobei ein möglichst geringer Verlust bzw. eine möglichst geringe Veränderung über viele Zyklen angestrebt wird, um eine hohe Lebensdauer des Wärmespeichermaterials zu erreichen.<sup>51</sup>

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T}$$

Gleichung 7

$\alpha$ : Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient [1/K]

$\Delta l$ : Ausdehnung [m]

$l_0$ : Ausgangslänge [m]

$\Delta T$ : Temperaturdifferenz [K]

Als empirische Kenngrößen zur Bewertung der Thermoschockstabilität dienen die Thermoschockparameter, die sich je nach Abschreckbedingungen unterscheiden.<sup>82</sup> Der Thermoschockparameter erster Ordnung R gilt für sehr drastische Abschreckbedingungen mit instationärer Änderung der Oberflächentemperatur des Wärmespeichermaterials (Gleichung 8).<sup>83</sup> Dieser Thermoschockparameter ist geeignet, die Thermoschockresistenz, für das schlagartige unregulierte Abschrecken eines erhitzten Körpers in einem Wasserbad zu bewerten.

$$R = \frac{\sigma_f \cdot (1 - \mu)}{E \cdot \alpha}$$

Gleichung 8

R: Thermoschockparameter erster Ordnung [K]

$\sigma_f$ : Eine Bruchfestigkeit (meist zweiachsig), z.B. Biegefestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$\mu$ : Poissonzahl bzw. Querkontraktionszahl [-]

E: Dynamischer E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]

$\alpha$ : Thermischer Ausdehnungskoeffizient [1/K]

Ein weniger schlagartig auftretender Thermoschock, der eine konstante Wärmeübergangsrate zwischen Probekörper und dem Abschreckmedium aufweist, kann mit dem Thermoschockparameter zweiter Ordnung R' beurteilt werden (Gleichung 9).<sup>83</sup> Dies kann bei einem regelungstechnisch geführten Betrieb wie z.B. in einem Wärmespeichersystem gelten.

$$R' = \frac{\sigma_f \cdot (1 - \mu) \cdot \lambda}{E \cdot \alpha}$$

Gleichung 9

- R: Thermoschockparameter zweiter Ordnung [W/m]  
 $\sigma_f$ : Eine Bruchfestigkeit (meist zweiachsig), z.B. Biegefestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\mu$ : Poissonzahl bzw. Querkontraktionszahl [-]  
 $\lambda$ : Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]  
E: Dynamischer E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\alpha$ : Thermischer Ausdehnungskoeffizient [1/K]

Als Maß für das Materialversagen durch einen Thermoschock dient gemäß DIN EN 820-3 die kritische Temperaturdifferenz  $\Delta T_c$ . Sie entspricht bei einem Thermoschockversuch der Temperaturdifferenz zwischen Probekörper und dem Abschreckmedium Wasser, bei der im Vergleich zu einer nicht geschockten Probe die Festigkeit (Ausgangsfestigkeit) um 30 % abfällt. Die Festigkeit kann dabei entweder mit einem 3- oder 4-Punkt-Biegeverfahren untersucht werden.<sup>83</sup>

## 2.4 Poren- und Geometrieeinfluss auf Werkstoffeigenschaften

Das mechanische Verhalten von Keramiken wie z.B. Cordierit, die kristalline Phasen mit anisotropen Wärmeausdehnungskoeffizienten enthalten<sup>84</sup> sowie das Verhalten von porösen Keramiken<sup>85</sup> wird als quasi-spröde beschrieben. Bei Keramiken allgemein und bei quasi-spröden Materialien wie Beton ist ein Größeneffekt beobachtbar, der besagt, dass Probekörper kleinerer Größe höhere Festigkeiten aufweisen als entsprechende Probekörper mit größeren Abmessungen.<sup>78,86,87</sup>

Auch die Form der Probekörper kann Auswirkungen auf die Druckfestigkeit haben. Das zeigt eine Studie von *Del Viso et al.* an hochfesten Betonproben, wobei zylinderförmige Proben eine um rund 10 % geringere Druckfestigkeit als vergleichbare würfelförmige Proben aufweisen.<sup>87</sup> *Abasi et al.* konnten bei einem Vergleich experimenteller und FEM-gestützter Untersuchungen an Betonproben bei konstanter Probendicke für eine steigende Probenhöhe bis zu einem Höhe/Dicke-Verhältnis von 5 eine Abnahme der Druckfestigkeit beobachten, aber nicht darüber hinaus. Zugleich wurde ein deutlicher Anstieg der

Druckfestigkeit für ein steigendes Verhältnis von Probenlänge bzw. Probenbreite zu Probendicke festgestellt.<sup>88</sup>

Poren bzw. die Porosität können einen Einfluss auf elektrische, magnetische, thermische und mechanische Werkstoffeigenschaften haben (Tabelle 7). Die Einflüsse werden meistens durch empirische Gleichungen und Modelle beschrieben. Mit steigendem Porenanteil verringert sich z.B. die Permittivitätszahl  $\epsilon$ , d.h. die dielektrische Leitfähigkeit sinkt mit steigendem Porenanteil. Im Bereich der magnetischen Eigenschaften sinkt die Anfangspermeabilität und die Remanenz mit steigender Porosität.<sup>78</sup>

Die thermische Eigenschaft der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  nimmt grundsätzlich linear mit steigender Porosität ab. In diesem Fall wirken sich jedoch auch die Porengeometrie sowie eine mögliche Vorzugsorientierung der Poren aus. Besonders längliche Poren, die mit ihrer längsten Abmessung in Richtung des Wärmestroms ausgerichtet sind, können die Wärmeleitfähigkeit in besonderen Fällen im Vergleich zu dichten, nicht porösen Körpern sogar erhöhen, da sich die Wärmeübertragung durch Strahlung effektiver auf den gesamten Wärmetransport auswirkt. Dieser Effekt nimmt mit steigender Porengröße zu. Durch die Porosität des Wärmespeichermaterials werden außerdem mehrere mechanische Eigenschaften beeinflusst.

$$E_r = E \cdot (1 - f_1 \cdot P + f_2 \cdot P^2)$$

Gleichung 10

$E_r$ : Resultierender Elastizitätsmodul des porösen Werkstoffs [N/mm<sup>2</sup>]

$E$ : Elastizitätsmodul des dichten Werkstoffs [N/mm<sup>2</sup>]

$f_1$ : Porenformabhängige Konstante 1 [-]

$f_2$ : Porenformabhängige Konstante 2 [-]

$P$ : Porenanteil bzw. Porosität [-]

Der resultierende Elastizitätsmodul  $E_r$  sinkt prinzipiell mit steigendem Porenanteil im Vergleich zum Elastizitätsmodul  $E$  des identischen, dichten Werkstoffs. Auch hier hat die Porengeometrie einen Einfluss, was in empirischen Gleichungen durch Porenformabhängige Konstanten berücksichtigt wird (Gleichung 10). Die Verteilung der Poren im betrachteten Werkstück kann ebenfalls einen Einfluss auf den Elastizitätsmodul haben. Mit steigendem Porenanteil  $P$  steigt die Kriechgeschwindigkeit des Werkstoffs da die effektive

Spannung beim Erhöhen von  $P$  auf entsprechend weniger Materie trifft. Die Festigkeit eines Werkstoffs sinkt ebenfalls mit steigender Porosität, wobei der Effekt ebenfalls von der Porengröße abhängig ist. Bei gleichbleibender Porosität sinkt die Festigkeit im Vergleich zum dichten Werkstoff bei größeren Poren stärker als bei kleineren Poren. Bei geringen Porositäten im Bereich von 0,1 – 1,0 Vol.-% kann es zu einer Steigerung der Festigkeit kommen, da in den Poren Kerbspannungen abgebaut werden können.

Tabelle 7: Zusammenfassung des Einflusses der Porosität auf elektrische, magnetische, thermische und mechanische Werkstoffeigenschaften.

Grundsätzlicher Einfluss steigender Porosität auf verschiedene Werkstoffeigenschaften			
Elektrisch	Magnetisch	Thermisch	Mechanisch
Permittivität ↓	Anfangspermeabilität ↓ Remanenz ↓	Wärmeleitfähigkeit ↓ Wärmeleitfähigkeit ↑ (Sonderfall)	Festigkeit ↓ Festigkeit ↑ ( $P < 01$ , - 1,0 %)

Für das Thermoschockverhalten bzw. die Temperaturwechselbeständigkeit sind insbesondere die thermischen und mechanischen Werkstoffeigenschaften entscheidend, die durch die Porosität des Werkstoffs beeinflusst werden.

## 2.5 Einfluss von Poren auf das Thermoschockverhalten von Werkstoffen

Ein messbarer Einfluss der Porosität auf das Thermoschock-Verhalten von Keramik ist bereits seit längerer Zeit in der Literatur bekannt und bis heute Ziel von Forschungsarbeiten.<sup>78,82,89–100</sup> Dabei wurden insbesondere die Auswirkungen der Porosität und der Porengröße auf das Thermoschock-Verhalten (z.B. Schwächung mechanischer Festigkeiten, Rissbildung) beobachtet sowie wissenschaftliche Modelle zur Beschreibung im Experiment beobachteter Zusammenhänge entwickelt.<sup>93,95,101–104</sup> Obwohl eine Porosierung vereinzelt auch zu einer Verschlechterung der Thermoschock-Eigenschaften führen kann oder keinen deutlichen Einfluss zeigt<sup>92,104</sup>, wird in vielen empirischen Versuchen, eine Verbesserung der Thermoschock-Resistenz durch Porositäten im Bereich von ca. 20 Vol.-% erreicht.<sup>89,93,94,103,105</sup>

*Maochang et al.* untersuchten poröse  $Al_2O_3$ -Keramiken bei denen Polymethylmethacrylat (PMMA) als Porosierungsmittel diente, um Porositäten von 24,42 – 41,10 Vol.-% mit



Porengrößen im Bereich von 11 – 72  $\mu\text{m}$  Porendurchmesser und sphärischer Geometrie zu erzeugen. Entsprechend der Erwartungen verringerte ein steigender Porenanteil die 3-Punkt-Biegefestigkeit, den Elastizitätsmodul und die Wärmeleitfähigkeit. Die kritische Temperaturdifferenz  $\Delta T_c$  konnte bei Abschreckversuchen im Wasserbad mit steigender Porosität  $P$  von 24,42 bis 33,45 Vol.-% gegenüber der Referenzprobe ohne Porosierungsmittel erhöht werden. Bei weiterer Erhöhung der Porosität sank  $\Delta T_c$  wieder gegenüber diesem Maximalwert von 386 K bei  $P = 33,45$  Vol.-%.<sup>92</sup>

*Li et al.* nutzten Stärke und Agarose mit einer Partikelgröße im Bereich von 5 – 18  $\mu\text{m}$  als Porosierungsmittel zur Herstellung von porösen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramiken mit Porositäten von 30 – 69 Vol.-%. Die sphärischen Poren führten bei steigender Porosität ebenfalls zum Anstieg der kritischen Temperaturdifferenz  $\Delta T_c$  und verlangsamten auch den relativen Festigkeitsverlust  $L$  gegenüber der zunehmenden Temperaturdifferenz  $\Delta T$  bei den Thermoschockversuchen mittels Wasserbad.<sup>96</sup>

*Shao et al.* konnten an ihren mit PMMA-Partikeln mit einem mittleren Durchmesser von 15  $\mu\text{m}$  porosierten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramiken bei Abschreckversuchen im Wasserbad lediglich eine sehr geringfügige Erhöhung der kritischen Temperaturdifferenz  $\Delta T_c$  von 230 K bei  $P = 1,2$  und 10,5 Vol.-% auf 240 K bei  $P = 21,3$  Vol.-% feststellen und stufen dieses Ergebnis als nicht signifikant ein.<sup>104</sup>

*Lu et al.* untersuchten an  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Keramiken den Einfluss der Porosität auf die kritische Temperaturdifferenz  $\Delta T_c$  und die Zyklenstabilität. Die Probekörper wurden ohne Porosierungsmittel hergestellt. Für niedrige und mittlere Porositäten wurde ein Drucksinterverfahren eingesetzt, für die Proben mit hohen Porositäten folgte auf ein Gel-Casting ein Gasdruck-Sinterverfahren. Die Thermoschockversuche wurden durch Abschrecken im Wasserbad durchgeführt. Hier zeigten die Probekörper mit niedrigerer Porosierung von 32 und 37 Vol.-% höhere kritische Temperaturdifferenzen ( $> 700$  K) als die Probekörper mit einem Porenanteil von 42 Vol.-% ( $< 700$  K). Bei den Zyklenversuchen zeigten die Proben mit dem höheren Porenanteil von 42 Vol.-% einen deutlich geringeren Festigkeitsverlust. Während die Proben mit 32 und 37 Vol.-% Porenanteil bis zum Zyklus  $N = 10$  nur noch 50 % ihrer ursprünglichen Festigkeit aufwiesen, verfügten die Proben mit

einer Porosität von 42 Vol.-% nach 20 Zyklen noch rund 70 % der ursprünglichen Festigkeit.<sup>94</sup>

Im Gegensatz zu Lu et al. konnten Chen et al. an den von ihnen durch Niederdruckverguss und drucklosem Sintern hergestellten, untersuchten  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Keramiken eine Steigerung der kritischen Temperaturdifferenz durch eine Erhöhung der Porosität verzeichnen. Die kritische Temperaturdifferenz der Proben mit einem Porenanteil von 32 und 45 Vol.-% lag jeweils etwas über 700 K, während die Proben mit einer Porosität von 57 Vol.-% auch bei Abschreckversuchen im Wasserbad mit einer Temperaturdifferenz von deutlich über 700 K noch keine kritischen Temperaturdifferenzen aufwiesen.<sup>97</sup>

Shyam et al. konnten bei Abschreckversuchen im Wasserbad an unterschiedlichen Cordierit-Proben mit Porenanteilen im Bereich von 0 – 70 Vol.-% keine Abhängigkeit des ersten Thermoschock-Parameters von der Porosität feststellen. Erwartungsgemäß sanken mit steigender Porosität der Elastizitätsmodul und die Biegefestigkeit.<sup>99</sup>

*Jin et al.* haben in einer Studie an einem Komposit aus Zirkondiborid und Siliziumcarbid, einer  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ -Keramik, den Einfluss der Porosität und der Porengröße (Porendurchmesser 1,4 – 5,5  $\mu\text{m}$ ) auf das Thermoschockverhalten untersucht. Die dichten Referenzproben wurden durch Heißpressen hergestellt. Für die porösen Probekörper gab es zwei Herstellungsrouten. Eine Charge wurde mit dem Verfahren des partiellen Heißpressens erzeugt, während die andere Charge kaltisostatisch gepresst und anschließend drucklos gesintert wurden. Die Biegefestigkeit der Proben sank mit steigender Porosität und steigender Porengröße. Bei Abschreckversuchen im Wasserbad konnte kein eindeutiger Einfluss der Porengröße auf die kritische Temperaturdifferenz festgestellt werden, jedoch stieg die kritische Temperaturdifferenz mit steigender Porosität.<sup>106</sup>

In einer weiteren Untersuchung konnten *Jin et al.* jedoch einen Einfluss der Porengröße auf die kritische Temperaturdifferenz bei  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ -Keramiken feststellen. Die durch partielles Heißpressen hergestellten Probekörper mit Porositäten von 8,7 – 27,3 Vol.-% und Porendurchmessern im Bereich von 2,06 – 4,23  $\mu\text{m}$  zeigten ein Absinken der Wärmeleitfähigkeit und der Biegefestigkeit sowohl bei steigender Porosität als auch bei

einer Erhöhung der Porendurchmesser. Der Einfluss der Porosität und der Porendurchmesser auf den thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  ist sehr gering, jedoch sinkt  $\alpha$  für steigende Porositäten und steigt mit einer Vergrößerung des Porendurchmessers. Der Elastizitätsmodul sinkt mit steigender Porosität. Der Einfluss des Porendurchmessers auf den Elastizitätsmodul ist gering, jedoch zeigte sich dessen Erhöhung bei steigenden Porendurchmessern. Bei Abschreckversuchen im Wasserbad zeigte die kritische Temperaturdifferenz eine Erhöhung für steigende Porositäten und eine Verminderung für größer werdende Porendurchmesser, was zu dem Schluss führt, dass eine Optimierung der Thermoschockresistenz durch eine geeignete Wahl von Porosität und Porengröße bei  $\text{ZrB}_2$ -SiC-Keramiken realisierbar ist.<sup>93</sup>

## 2.6 Einfluss der Geometrie auf das Thermoschockverhalten

Die Geometrie umfasst sowohl die Größe bzw. den Maßstab als auch die Form eines Körpers. *Cheng et al.* konnten bei ihrer simulationsbasierten Arbeit mit  $\text{ZrB}_2$ -Keramiken keine Abhängigkeit der Thermoschockbeständigkeit von der Probenform feststellen, außer wenn die Proben eingespannt oder auf andere Weise fixiert vorlagen.<sup>107</sup> *Zeng et al.* haben in ihrer simulationsbasierten Studie für  $\text{ZrB}_2$ -Keramiken mit einer  $\text{ZrO}_2$ -Schicht an der Oberfläche keine Abhängigkeit der Thermoschockbeständigkeit von der Probenform jedoch einen Größeneffekt festgestellt.<sup>108</sup>

An  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Keramiken wurde von *Glandus und Boch* der Einfluss der Größe der Probekörper sowie die Geometrie prismen- und scheibenförmiger sowie kurzer und langer zylinderförmiger Proben auf deren Thermoschockbeständigkeit untersucht worden. Dazu wurden die erhitzten Proben in einem Wasserbad von 20 °C abgeschreckt und die kritische Temperaturdifferenz ermittelt. Bei steigender Probengröße sank die Thermoschockbeständigkeit, charakterisiert durch die kritische Temperaturdifferenz  $\Delta T_c$ , während kein signifikanter Einfluss der Probengeometrie auf die Thermoschockbeständigkeit nachweisbar war.<sup>109</sup>

*Swain* charakterisierte mittels FEM-Simulationen das Thermoschockverhalten von Aluminiumoxid-Zirkoniumoxid-Keramiken und prognostizierte eine deutliche Verringerung

der kritischen Temperaturdifferenz und damit der Thermoschockbeständigkeit mit steigender Probengröße.<sup>110</sup>

*Ding et al.* haben den Einfluss der Probendicke, der Probekörpertemperatur bzw. der Temperaturdifferenz zwischen Probekörper und Abschreckmedium sowie den Einfluss der Anzahl der Abschreckzyklen auf poröse SiC-Keramiken untersucht. Der durch den Thermoschock erhitzter Probekörper in einem auf 20 °C temperierten Wasserbad verursachte Festigkeitsverlust wurde mittels 3-Punkt-Biegeversuch bestimmt. Der Verlust der Biegefestigkeit nahm dabei sowohl für eine Erhöhung der Probekörpertemperatur, eine Erhöhung der Probendicke als auch eine Erhöhung der Zyklenzahl zu, wobei der Einfluss der Zyklenzahl deutlich geringer ausfiel.<sup>111</sup>

### 3 Experimentelle Arbeiten

In diesem Kapitel werden die Ausgangsmaterialien dargestellt und die Probenherstellung, sowie die Durchführung der Thermoschockversuche beschrieben. Des Weiteren wird die Charakterisierung der Proben vor und nach den Thermoschockversuchen erläutert.

#### 3.1 Ausgangsmaterialien

Eine, vor allem wegen ihres geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ( $\alpha_{\text{Cordierit}} \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )<sup>105</sup> sehr thermoschockbeständige Keramik stellt Cordierit dar, ein feuerfestes Erdalkali-Alumosilikat, das natürlich vorkommt und durch geeignete Sinterbedingungen aus dem Dreistoffsystem  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  gebildet werden kann.<sup>112</sup> Insbesondere die Eigenschaft des niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten macht Cordierit, Cordierit-Glaskeramiken und zahlreiche Cordierit-Komposite zu adäquaten Materialien für zahlreiche technische Anwendungen (z.B. im Bereich der thermischen Energiespeicher), selbst beim Einsatz im Hochtemperaturbereich  $> 500 \text{ °C}$ .<sup>48,113–125</sup> In Vorversuchen (Kap. 10.1) wurde zum Vergleich ein handelsüblicher Ziegelton eingesetzt. Aufgrund der zu geringen kritischen Temperaturdifferenz der Ziegelkeramik bei den Ergebnissen der Vorversuche, wurde ausschließlich die Cordierit-Keramik für alle Versuchsreihen eingesetzt. Für die Herstellung der Cordierit-Keramikproben wurde eine extrusionsfähige, plastische Rohmasse mit stets gleicher Zusammensetzung als Ausgangsmaterial verwendet (Tabelle 8Tabelle 1).

## Experimentelle Arbeiten

Tabelle 8: Zusammensetzung der plastischen Ausgangsmasse zur Herstellung der Cordierit-Keramikproben.

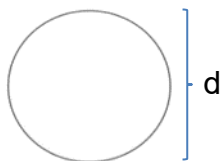
Verbindung	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Anteil [Ma.-%]	50,1	34,6	13,2	0,8	0,6	0,5	0,2	0,2

Für die Erzeugung der unterschiedlichen Porengeometrien wurden drei verschiedene organische Porosierungsmittel eingesetzt (Abbildung 14). Dabei wurde jeweils ein Sollwert der Einzelporenvolumina von 3,375 mm<sup>3</sup> im Median angestrebt. Um sphärische Poren zu erzeugen, wurde aus einem Haufwerk expandierter Kügelchen aus Polystyrol (EPS) die Siebfraktion zwischen 2,0 mm bis 2,5 mm Maschenweite verwendet.



Abbildung 14: Verwendete organische Porosierungsmittel zur Erzeugung von Poren mit einfachen Geometrien in Cordierit-Keramik. Siebfraktion von EPS-Kügelchen zwischen 2,0 mm und 2,5 mm Maschenweite (l). PLA-Zylinder mit einer Höhe von 5,3 mm und einem Durchmesser von 0,9 mm (m). Kubisches PA6-Granulat mit einer Kantenlänge von 1,5 mm (r).

Die EPS-Kügelchen verhalten sich unter dem Einfluss des Extruder-Drucks kompressibel und werden verdichtet und verkleinert. Um nach dem Sintervorgang der Cordierit-Keramik Poren mit einem mittleren Durchmesser von 1,861 mm zu hinterlassen und somit das gewünschte Einzelporenvolumen zu gewährleisten, wurden die EPS-Kügelchen in der erforderlichen, größeren Abmessung eingesetzt (Gleichung 11).

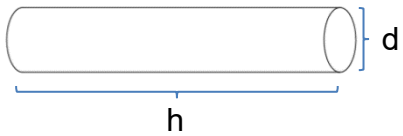


$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3$$

Gleichung 11

Für das Generieren der zylindrischen Poren diente ein Granulat aus Polylactid (PLA), das mit Hilfe eines Polymerextruders zu einem Filamentstrang mit einem Durchmesser von

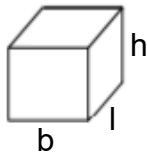
0,9 mm verarbeitet und mittels Filamentpelletizer in Stücke mit einer Soll-Höhe von 5,3 mm geschnitten wurde (Gleichung 12).



$$V = \frac{1}{4} \pi \cdot d^2 \cdot h$$

Gleichung 12

Zur Erzeugung der kubischen Poren wurde ein kommerziell erhältliches Granulat aus Polyamid 6 (PA6) mit einer einheitlichen Kantenlänge von 1,5 mm verwendet (Gleichung 13).



$$V = l \cdot b \cdot h = a^3$$

Gleichung 13

Die Porosierungsmittel aus PLA und PA6 verhielten sich während des Formgebungsverfahrens inkompressibel. Durch die thermische Zersetzung beim Vorbrand bzw. bei der Entbinderung (Kap. 3.2.5) werden die organischen Porosierungsmittel thermisch zersetzt und hinterlassen Poren entsprechend ihrer Geometrie (Tabelle 9).

Tabelle 9: Zersetzungstemperaturen der eingesetzten Porosierungsmittel.

Porosierungsmittel	Zersetzungstemperatur [°C]
Polylactid (PLA)	250 <sup>126</sup>
Polystyrol (PS)	> 100 <sup>127</sup>
Polyamid 6 (PA6)	> 300 <sup>128</sup>

### 3.2 Probenherstellung

In den folgenden Kapiteln werden die Aufbereitung und Herstellung der Porosierungsmittel durch Sieben und Filamentextrusion sowie sämtliche Formgebungs-, Trocknungs-, Sinterungs- und Nachbehandlungsschritte zur Herstellung der verschiedenen Probekörper erläutert.

### 3.2.1 Sieben

Aus einem Haufwerk aus EPS-Kugeln mit einem Durchmesser im Bereich von 2,5 – 4,0 mm wurde mit einer Siebmaschine vom Typ Fritsch Analysette 3 und Sieben mit den Maschenweiten 2,0 und 2,5 mm die entsprechende Siebfraktion gewonnen. Die Siebung fand mit einer Amplitude von 1,5 statt.

### 3.2.2 Filamentherstellung

Zur Herstellung der zylinderförmigen Porosierungsmittel-Teilchen, wurde Polylactid-Granulat mit einem Filamentextruder (Abbildung 15) vom Typ 3devo NEXT der Firma 3devo extrudiert, um Endlosstränge mit einem Durchmesser von 0,9 mm zu erzeugen. Diese Filamentstränge wurden im nächsten Schritt mit einem Filamentpelletizer auf eine Länge von 5,3 mm geschnitten, um zylindrische Körper mit dem angestrebten Volumen von  $3,357 \text{ mm}^3$  Volumen zu erhalten



Abbildung 15: Extruder 3devo NEXT der Firma 3devo

### 3.2.3 Extrusion

Die Ansätze der Cordierit-Rohmasse ohne Porosierungsmittel und mit jeweils 5, 10, 15 und 20 Vol.-% eines der drei eingesetzten Porosierungsmittel wurden mittels Doppelschnecken-Extruder der Firma Shimpo homogenisiert und extrudiert. Zur Formgebung dient ein rechteckiges Mundstück ohne Lochanteil mit den Öffnungsmaßen (B x H) 120 mm x 35 mm.

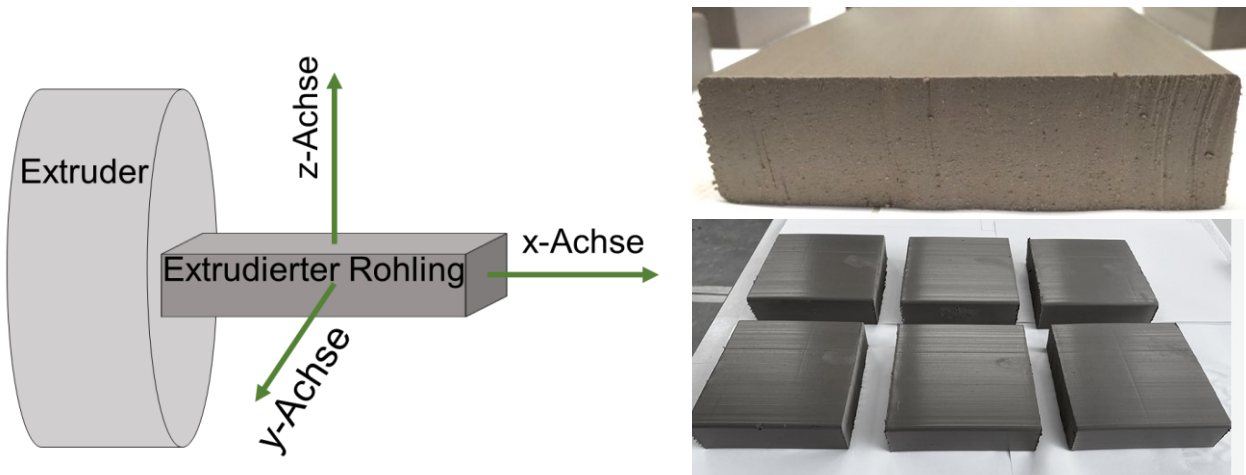


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Extrudiervorgangs (l). Festlegung der drei Raumachsen für die Zuordnung richtungsabhängiger Messgrößen. Die Länge des Tonrohlings wird entlang der x-Achse abgemessen. Fertig extrudierte Tonrohlinge (r).

Die Extrusion findet unter Einhaltung eines Teilvakuums von 0,8 bar statt. Mittels Schneiddraht werden die extrudierten Stränge jeweils auf eine Länge von 150 mm gekürzt. Anhand der Extrusion wurden die Raumachsen x, y und z der Proben definiert, die später zur Betrachtung richtungsabhängiger Eigenschaften der Probekörper dienten (Abbildung 16).

Außerdem wurden Probekörper mit quadratischem und kreisförmigem Querschnitt, für die Untersuchung des Einflusses der äußeren Geometrie (Form und Größe) auf die Thermoschockeigenschaften mit einem manuellen Extruder und entsprechenden Mundstücken aus der Rohmasse extrudiert (Abbildung 17).



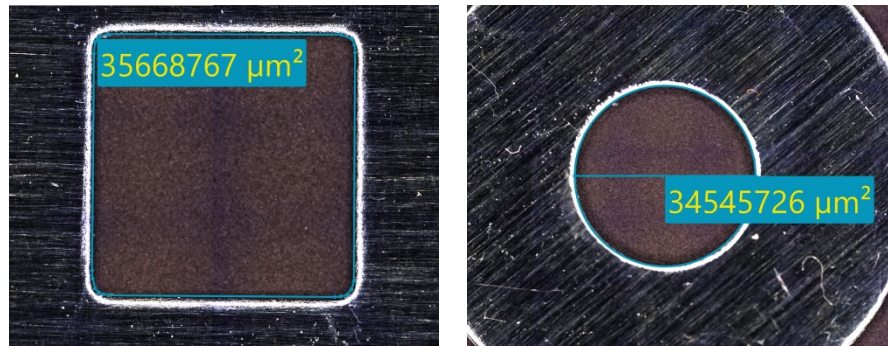


Abbildung 17: Mundstücke für den manuellen Extruder zur Herstellung von Probekörpern mit quadratischen und kreisförmigen Grundflächen.

Für die Herstellung der Probekörper mit quadratischer Grundfläche wurde ein Mundstück mit einer Querschnittsfläche von  $35,7 \text{ mm}^2$  verwendet, während für die Proben mit kreisförmigen Grundflächen ein Mundstück mit einer Querschnittsflächen von  $34,6 \text{ mm}^2$  eingesetzt wurde. Die jeweiligen Flächen der Mundstücks-Öffnungen wurden mittels Lichtmikroskopie (Kap. 3.4.4) bestimmt.

### 3.2.4 Trocknung

Da die Proben während der Formgebung einen Wassergehalt von 8,4 Ma.-% aufwiesen, war eine möglichst langsame und schonende Trocknung unerlässlich, um Spannungen und Rissbildungen während der Trocknung zu vermeiden.

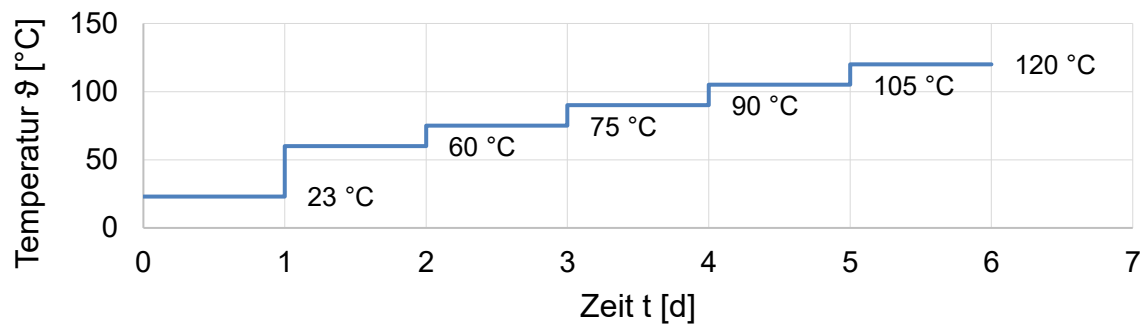


Abbildung 18: Temperatur-Zeit-Programm zur Trocknung. Die Rohlinge werden unmittelbar nach der Formgebung durch Extrusion für je 24 h bei Raumtemperatur (23 °C) und danach stufenweise ebenfalls für je 24 h bei den Temperaturen 60, 75, 90, 105 und 120 °C getrocknet.

Deshalb erfolgte die Trocknung zunächst bei Raumtemperatur über einen Zeitraum von 24 h. Anschließend erfolgte über einen Zeitraum von weiteren 5 Tagen eine stufenweise Trocknung in Intervallschritten mit je einer Steigerung um 15 °C von 60 °C bis auf 120 °C und einer Verweilzeit pro Temperaturstufe von jeweils 24 h (Abbildung 18).

### 3.2.5 Entbindern

Bevor die Proben gesintert werden können, müssen die ausbrennbaren Porosierungsmittel durch einen Entbinderungsprozess entfernt werden. Dafür werden sowohl die porosierten Proben als auch die unporosierten Referenzproben demselben Entbinderungsprozess unterzogen. Zunächst werden die getrockneten Formkörper während der ersten 0,5 Stunden auf zunächst 200 °C aufgeheizt. Im Anschluss wird die Heizrate gedrosselt und die Proben innerhalb von 7,5 h auf 600 °C aufgeheizt, um ein schlagartiges Verbrennen und eine damit verbundene, zu rasche Freisetzung der austretenden Schwelgase zu umgehen. Die maximale Entbinderungstemperatur von 600 °C wird über einen Zeitraum von 2 h konstant gehalten (Abbildung 19).

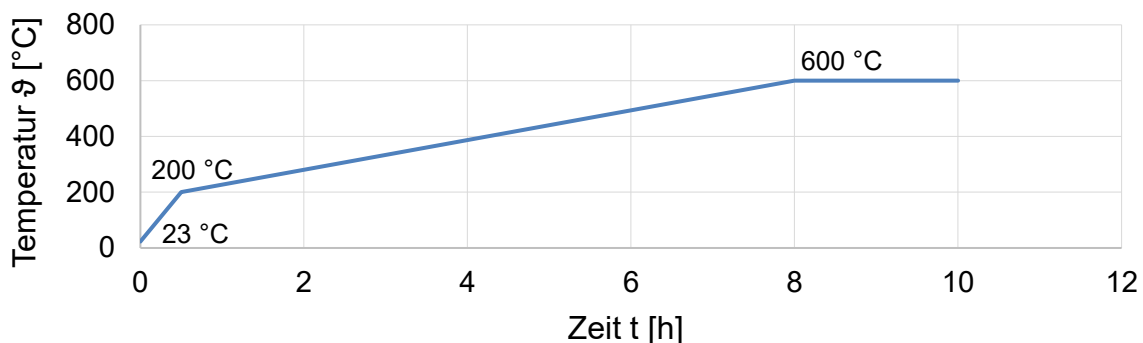


Abbildung 19: Temperatur-Zeit-Programm des Entbinderungsbrands zum schonenden thermischen Zersetzen der organischen Porosierungsmittel in den Rohlingen.

### 3.2.6 Sintern

Nach der Entbinderung erfolgte der eigentliche Sinterbrand. Dazu wurden die bereits entbinderten, porosierten Formkörper in einem erdgasbeheizten Hochtemperatur-Kammerofen der Firma L. Riedhammer (Abbildung 20) mit einer Heizrate von 195,81 °C/h innerhalb von 5,5 h von 23 °C auf eine Temperatur von 1100 °C aufgeheizt.



Abbildung 20: Sintern der Formkörper in einem Erdgas-befeuerten Hochtemperatur-Kammerofen der Firma L. Riedhammer.

Danach wurde die Heizrate auf  $41,81\text{ °C/h}$  reduziert und das Brenngut in weiteren  $5,5\text{ h}$  auf eine Temperatur von  $1330\text{ °C}$  erhitzt, die für  $6\text{ h}$  gehalten wurde. Das ist notwendig, da ein sehr enges Brennintervall im Bereich von  $1300$  bis  $1330\text{ °C}$  eingehalten werden muss, um Cordierit zu bilden und dabei die Entstehung von Glasphase zu verhindern (Abbildung 21). Der unerwünschte Glasphasenanteil kann die Thermoschockresistenz des Cordierits bei der Anwendung als Wärmespeichermaterial negativ beeinflussen.

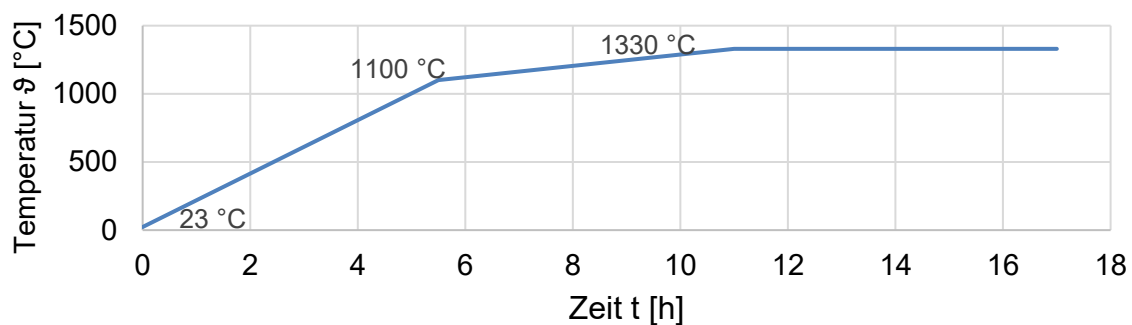


Abbildung 21: Temperatur-Zeit-Programm des Sinterbrandes. In einem Gasofen werden die porisierten Formkörper zunächst mit einer Heizrate von  $195,81\text{ °C/h}$  in  $5,5\text{ h}$  von Raumtemperatur ( $23\text{ °C}$ ) auf  $1100\text{ °C}$  erhitzt. Die Heizrate wird auf  $41,81\text{ °C/h}$  verringert, um in weiteren  $5,5\text{ h}$  die Zieltemperatur von  $1330\text{ °C}$  zu erreichen.

Die manuell extrudierten Rohlinge werden nach der Trocknung ohne den in Kap. 3.2.5 erläuterten Entbinderungsbrand direkt gesintert. Die Sinterung wurde ohne zusätzliches Spülgas in einem elektrisch betriebenen Hochtemperaturofen mit  $\text{MoSi}_2$ -Heizelementen durchgeführt (Abbildung 22). Die Sinterung der manuell extrudierten Probekörper erfolgte gemäß einem identischen Temperaturprogramm, das auch für die Sinterung im Erdgas-betriebenen Gasofen verwendet wurde (Abbildung 21 und Abbildung 20). Dabei kühlten die Proben nach der Sinterung ungeregelt auf Raumtemperatur ab.



Abbildung 22: Elektrisch betriebener Hochtemperaturofen der Firma Nabertherm vom Typ LHT 08/16 für die Sinterung der manuell extrudierten Probekörper.

Sämtliche in diesem Kapitel erwähnten Probekörper wurden nach dem Sintern mittels Sägen und Schleifen (Kap. 3.2.7) auf ihre endgültigen, für die jeweiligen Analysen festgelegten, Maße gebracht.

### 3.2.7 Sägen und Schleifen

Die fertig gesinterten Cordierit-Körper wurden anschließend mit einer Kappsäge und Wasserspülung auf die Maße 100 mm x 100 mm (Länge x Breite) gesägt und mittels einer Oberflächen-Schleifmaschine auf eine Höhe von 25 mm plangeschleift. Nach dem Trocknen wurden die so fertiggestellten Cordierit-Platten für die Messungen der Scherben-Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, \text{tr}}$  eingesetzt (Abbildung 23).

Für die Bestimmung der dynamischen E-Moduln und der 3-Punkt-Biegefestigkeiten wurden Probekörper mit den Abmessungen 20 mm x 120 mm x 25 mm (Höhe x Länge x Breite) hergestellt. Aufgrund technischer Limitierungen hinsichtlich der möglichen Abmessungen der Proben bei der Formgebung durch Extrusion weisen alle stabförmigen Proben ihre längste laterale Ausdehnung von 120 mm entlang der Extrusionsrichtung auf. Diese Probekörper werden in ausreichender Zahl sowohl für die einzelnen als auch für die zyklischen Thermoschockversuche (Kap. 3.3) hergestellt (Abbildung 24). Die Druckfestigkeitsprüfungen wurden entlang aller 3 in Kap 3.2.3 definierten Achsrichtungen durchgeführt, d.h. die Proben wurden bei der Messung je mit ihrer x-, y- oder z-Achse in Achsrichtung der Bewegung des Druckstempels platziert. Zur Bestimmung des thermischen Wärmeausdehnungskoeffizienten wurden mit einer speziell für kleinere Proben geeigneten Säge kleinere, stabförmige Proben mit den Abmessungen 25 mm x 5 mm x 5 mm zurecht gesägt (Abbildung 25).



Abbildung 23: Kappsäge der Firma HeDia (o.l.), Oberflächenschleifmaschine der Firma G&N (o.m.) und fertig nachbehandelte Proben zur Bestimmung der Scherbenwärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, tr.}$  mittels der Guarded Hot Plate Methode mit dem Maßen 100 mm x 100 mm x 25 mm (u).



Außerdem wurden Cordierit-Probekörper mit der längsten lateralen Ausdehnung von 25 mm in allen 3 in Kap. 3.2.3 festgelegten Achsrichtungen hergestellt. Die Probekörper zur Untersuchung des Einflusses von Form und Größe auf die Thermoschockeigenschaften wurden ebenfalls mit einer geeigneten, kleineren Säge auf ihre endgültigen Maße gebracht (Abbildung 25).

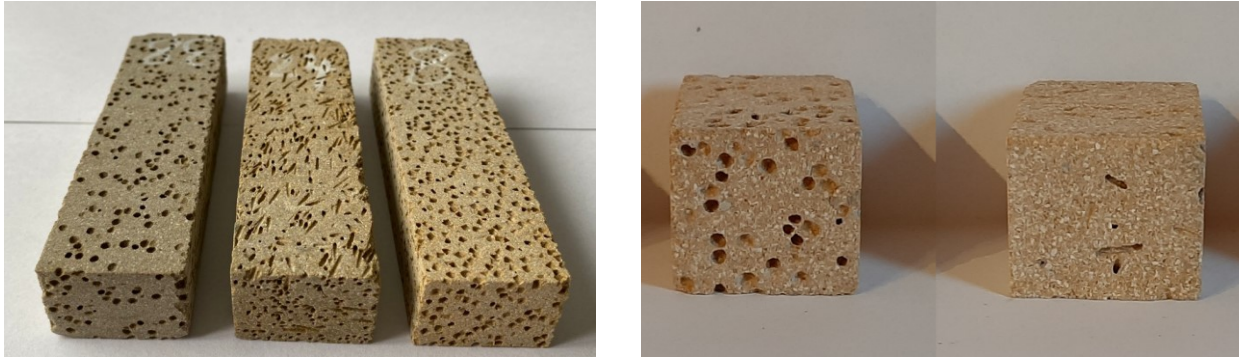


Abbildung 24: Probekörper mit den Maßen 20 mm x 120 mm x 25 mm zur Messung der dynamischen E-Moduln und der 3-Punkt-Biegefestigkeiten (l) und würfelförmige Proben mit der Kantenlänge 20 mm zur Bestimmung der Druckfestigkeit (r).

Bei diesen Probekörpern sollten zu Vergleichszwecken bei der Parametervariation entweder die Volumina bei 400 oder 1600 mm<sup>3</sup> oder die Länge der Körper bei 10 oder 40 mm näherungsweise konstant gehalten werden.

Tabelle 10: Sollmaße für Extrusionsflächen A, Volumina V und Höhen h der gesinterten Probekörper mit quadratischen und kreisförmigen Grundflächen zur Untersuchung des Einflusses von Form und Größe auf die Thermoschockeigenschaften

Form der Extrusionsfläche		
Grundfläche	kreisförmig groß	quadratisch
A [µm <sup>2</sup> ]	34545726	35668767
A [mm <sup>2</sup> ]	34,55	35,67
V <sub>1</sub> [mm <sup>3</sup> ]	400	400
h <sub>1</sub> [mm]	11,58	11,21
V <sub>2</sub> [mm <sup>3</sup> ]	1600	1600
h <sub>2</sub> [mm]	46,32	44,86
V <sub>3</sub> [mm <sup>3</sup> ]	345,46	356,69
h <sub>3</sub> [mm]	10,00	10,00
V <sub>4</sub> [mm <sup>3</sup> ]	1381,83	1426,75
h <sub>4</sub> [mm]	40,00	40,00

Alle Soll-Maße für die fertig gesinterten Probekörper sind in Tabelle 10 aufgeführt. Die so hergestellten Probekörper wurden dazu verwendet, die Ergebnisse der FEM-Simulation mittels der Software Ansys durch experimentelle Thermoschockversuche abzugleichen.

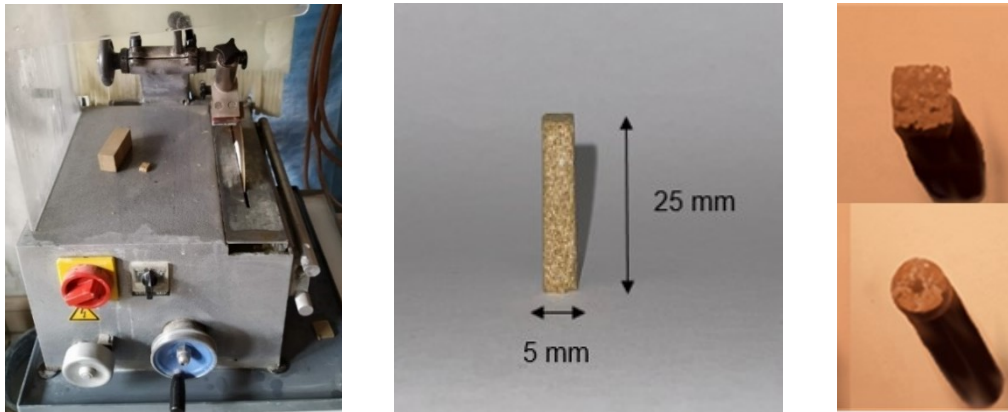


Abbildung 25: Säge zur Präparation kleiner Probekörper vom Typ WOCO 50P (I), stabförmige Proben mit den Maßen 25 x 5 x 5 mm zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten ( $\alpha$ ) und Probekörper mit quadratischem und kreisförmigem Querschnitt zur Untersuchung des Einflusses der äußeren Geometrie auf die Thermoschockeigenschaften.

Die Probenabmessungen für alle hier genannten Körper wurden je nach Größe mit einer Schieblehre oder Messschraube überprüft. Der im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendete Begriff „Probetyp“ bezieht sich auf Proben mit einem festgelegten Datensatz hinsichtlich ihrer Porosität  $P$ , Porengeometrie und bei den Proben für die Druckfestigkeitsversuche und das Dilatometer auch hinsichtlich ihrer Achsrichtung bei der Analyse, z.B. Probetyp ( $P = 5 \text{ Vol.-%}$ , sphärische Poren, x-Achse).

### 3.3 Durchführung Thermoschock-Versuche

Bei den einfachen Thermoschocks wurden je Porengeometrie, je Porosität und je Temperaturdifferenz 5 Proben geschockt.

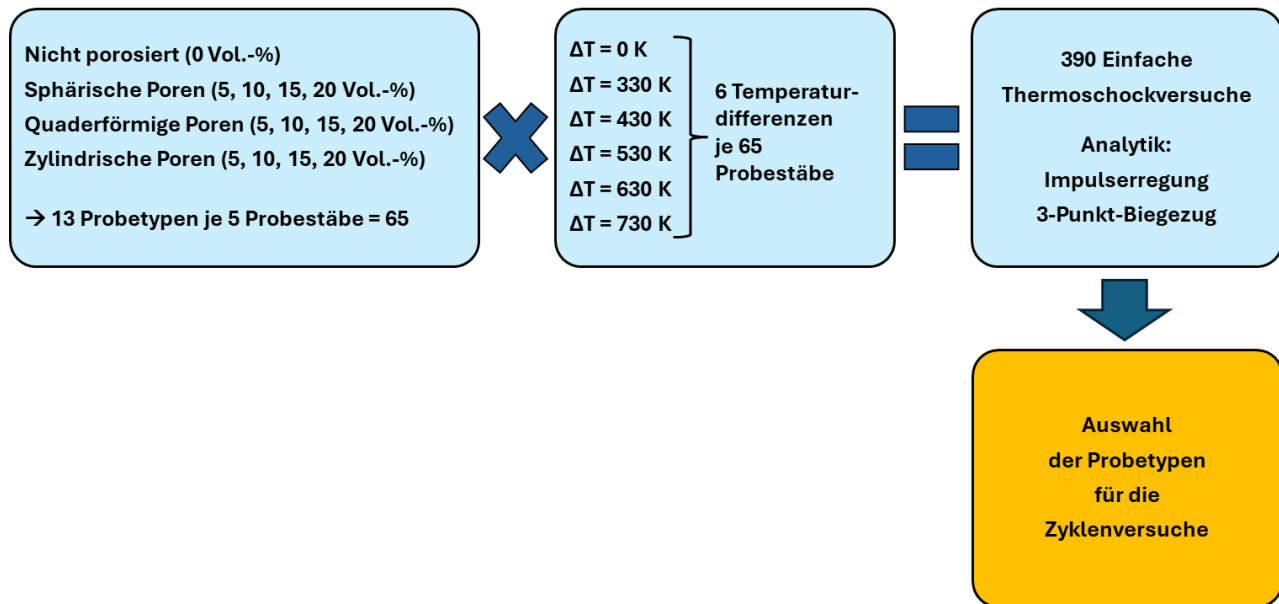


Abbildung 26: Schematische Darstellung der einfachen Thermoschockversuche mit stabförmigen Probekörpern mit den zugehörigen Probetypen, Temperaturdifferenzen und der nachfolgenden Analytik.

In gleicher Weise wurde mit den nicht porosierten Referenzproben verfahren. Um bis auf den Thermoschock an sich die exakt gleiche Beanspruchung aller Proben zu gewährleisten, wurden für die Messpunkte der nicht geschockten Proben, je Porengeometrie und Porosität jeweils 5 Probekörper bei Raumtemperatur von 20 °C ebenfalls in das Wasserbad mit 20 °C gegeben. Ebenso wurde mit den nicht geschockten und nicht porosierten Referenzproben verfahren. Sowohl die geschockten als auch die nicht geschockten Proben wurden wie in Kap 3.3.1 beschrieben nach dem Thermoschock rückgetrocknet und anschließend mittels Impulserregung die E-Moduln bestimmt und ihre 3-Punkt-Biegefestigkeit gemessen (Abbildung 26). Die Probetypen, die in den einfachen Thermoschockversuchen herausragende Ergebnisse hinsichtlich der Thermoschockresistenz zeigten, wurden für die Zyklusversuche ausgewählt. Identisch hergestellte und zuvor nicht beanspruchte Proben wurden dann den zyklischen Thermoschockversuchen unterzogen. Dazu wurden je 8 Proben pro Probetyp im Wasserbad mit einer Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 650 \text{ K}$  zyklisch abgeschreckt und anschließend jeweils nach einer festgelegten Anzahl an Zyklen per Impulserregung untersucht.



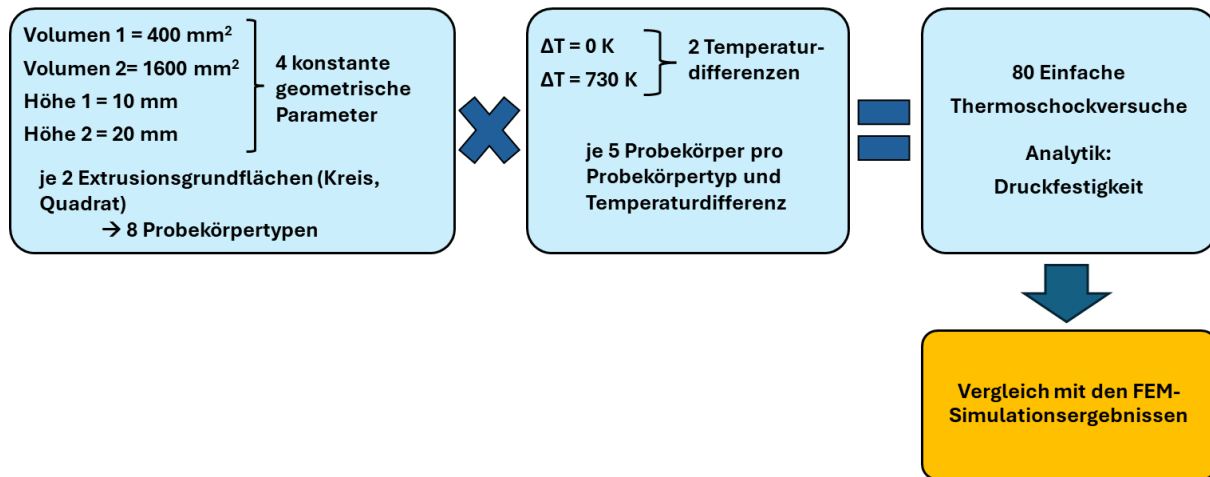


Abbildung 27: Schematische Darstellung der experimentell durchgeführten einfachen Thermoschockversuche zur Untersuchung des Einflusses der Bauteilgeometrie, die zum Abgleich mit den Ergebnissen aus den FEM-Simulationen dienen.

Zur Überprüfung der Ergebnisse der FEM-Simulationen zum Einfluss der äußeren Geometrie auf das Thermoschockverhalten wurden in 2 Versuchsreihen je 5 Probekörpertypen mit den Volumina 400 und 800 mm<sup>2</sup> und in 2 weiteren Versuchsreihen je 5 Probekörpertypen mit den Höhen 10 und 20 mm einem Thermoschock in einem Wasserbad mit 20 °C bei einer Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 730 \text{ K}$  unterzogen. Als Referenz wurden pro Probetyp jeweils 5 Probekörper bei Raumtemperatur für eine identische Verweilzeit wie beim Thermoschockversuch im Wasserbad gelagert. Der durch den Thermoschock verursachte Festigkeitsverlust wurde anhand einer Druckfestigkeitsprüfung ermittelt (Abbildung 27).

### 3.3.1 Einfache Thermoschockversuche

Die Thermoschockbeständigkeit wurde in Anlehnung an die Norm DIN EN 820-3 durchgeführt.<sup>83</sup> Dazu wurden die Probestäbe bei einer Temperatur von 120 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Proben wurden anschließend mit einer Heizrate von 720 °C/h auf je eine der fünf Zieltemperaturen (350, 450, 550, 650 und 750 °C) aufgeheizt, gefolgt von einer Haltezeit von 1 h nach Erreichen der Zieltemperatur, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung bis zum Probenkern zu gewährleisten. Die fertig durchgeheizten Proben wurden danach in einem auf 20 °C ± 2 °C temperierten

Wasserbad abgeschreckt. Die Proben sollten jeweils für 5 min im Wasserbad verweilen, wobei sich die Wassertemperatur in diesem Zeitraum gemäß der Norm um nicht mehr als 5 °C erhöhen darf, was mittels Thermometer-Messung überwacht wurde. Im Wasserbad ist ein Auffangnetz angebracht, das den direkten Kontakt der abgeschreckten Probe mit dem Gefäßboden verhindert. Anschließend wurden die Proben entnommen und erneut bei 120 °C rückgetrocknet. Die so behandelten stabförmigen Probekörper wurden jeweils mittels Impulserregung auf ihre E-Modul-Werte und mittels 3-Punkt-Biegezugversuch untersucht. Je Probetyp und Temperaturdifferenz wurden je 5 Proben auf diese Weise einem Thermoschock-Versuch unterzogen und die Mittelwerte gebildet.

### **3.3.2 Zyklische Thermoschockversuche**

Auf die gleiche Weise wie in Kap. 3.3.1 wurden in einer weiteren Messreihe identisch hergestellte Probetypen jeweils 100-mal zyklisch beansprucht. Dazu wurden die Proben auf 670 °C aufgeheizt und anschließend in einem Wasserbad mit einer Temperatur von 20 °C abgeschreckt. Außerdem erfolgte zu Vergleichszwecken die näherungsweise Vorhersage der 3-Punkt-Biegefestigkeit mittels der zerstörungsfreien Analysemethode der Impulserregung, da der durch Impulserregung bestimmte dynamische E-Modul bei den hier eingesetzten Cordierit-Proben und den vorliegenden Versuchsbedingungen in guter Näherung linear mit der 3-Punkt-Biegefestigkeit korreliert. Die Impulserregung erfolgte jeweils nach 0, 1, 3, 7, 15, 25, 37, 60 und 100 Zyklen (Kontrollzyklen). Großflächig auftretende Abplatzungen an Proben sowie ein vollständiges Zerschlagen im Verlauf der zyklischen Beanspruchung ist in dieser Versuchsreihe als vollständiges Materialversagen bzw. Ausfall und somit als ein 100 %-iger 3-Punkt-Biegefestigkeitsverlust definiert.

## **3.4 Charakterisierung**

In diesem Kapitel werden die verwendeten Analysemethoden zur Charakterisierung der Ausgangsmaterialien, der fertig hergestellten Proben und der Proben, die einfachen oder zyklischen Thermoschockversuchen unterzogen wurden, erläutert.

### 3.4.1 Rohdichte

Die Bestimmung der Rohdichten erfolgte an plattenförmigen Proben mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm x 25 mm (Länge x Breite x Höhe), die nach dem Sägen und Schleifen im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz rückgetrocknet und danach bis zum Erreichen der Raumtemperatur in einem Exsikkator gelagert wurden. Mit einer Präzisionswaage wurde die jeweilige Masse der Proben analysiert und mittels Schiebelehre die genauen Maße der Probenkörper ermittelt. Bei den manuell extrudierten Proben wurde auf die gleiche Weise die Probenhöhe ermittelt, während die Extrusionsgrundfläche mittels Lichtmikroskop (Kap. 3.4.4) bestimmt wurde. Für die Porositätsbestimmung erfolgte zusätzlich noch die Bestimmung der Scherbenrohichte mittels Unterwasser-Wägung, gemäß dem archimedischen Prinzip nach DIN EN 1936.<sup>129</sup>

### 3.4.2 Reindichte

Die Bestimmung der Reindichte erfolgte in Anlehnung an DIN 66137-1 mit einem Gaspyknometer vom Typ Ultrapyc 1200e von Quantachrome.<sup>130</sup> Dafür wurde das Probematerial zunächst bei 105 °C in einem Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz rückgetrocknet und danach bis zum Erreichen der Raumtemperatur in einem Exsikkator gelagert. Als Messgas wurde Helium der Gasreinheit 5.0 eingesetzt. Aus je sechs Einzelmessungen wurde der Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung berechnet.

### 3.4.3 Porosität

Die Anteile der offenen/flutbaren und der geschlossenen Poren sowie der Gesamtporenanteil  $P$  wurden in Anlehnung an die DIN EN 1936 mittels Unterwasser-Wägung und der Analyse der Reindichte (Kap. 3.4.2) bestimmt.<sup>129</sup> Der Porenanteil  $P_e$ , der durch die Zugabe der Porosierungsmittel (extrinsische Poren) erzeugt wurde, und der Porenanteil  $P_i$ , der ohne Porosierungsmittel-Zugabe maßgeblich von der Formgebung, Korngröße und Sinterbedingungen abhängt (intrinsische Poren), wurden mit Hilfe der Gleichung 14 bestimmt.<sup>92</sup>

$$P = P_e + P_i$$

Gleichung 14

P: Porosität bzw. gesamter Porenanteil [Vol.-%]

$P_e$ : Anteil extrinsischer Poren [Vol.-%]

$P_i$ : Anteil intrinsischer Poren [Vol.-%]

#### 3.4.4 Lichtmikroskopie

Die Bestimmung der Längenmaße zur Berechnung der Einzelporenvolumina und die Bestimmung der Extrusionsgrundflächen der manuell extrudierten Proben erfolgte mit einem Auflichtmikroskop der Firma Carl Zeiss AG. Die zugehörige Bildauswertung wurde mit der Software AxioVision durchgeführt. Außerdem wurde die Orientierung der zylindrischen Poren ebenfalls lichtmikroskopisch ermittelt.

#### 3.4.5 Scherbenwärmeleitfähigkeit

Die Scherbenwärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, tr.}$  wurde mit dem Wärmestromplatten-Messgerät TLP 200 der Firma Taurus bestimmt. Dabei handelt es sich um ein Einplattenverfahren gemäß der DIN EN 12667.<sup>55</sup> Dazu wurden die Cordierit-Platten mit den Maßen  $L \times B \times H = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  vor der Messung in einem Trockenschrank bei  $105 \text{ °C}$  bis zur Gewichtskonstanz rückgetrocknet und anschließend in einem Exsikkator bis zum Erreichen der Raumtemperatur gelagert. Um einen möglichen Einfluss von Kondensationsfeuchte zu vermeiden, wurden die Messungen bei den Probenmitteltemperaturen  $15, 25$  und  $35 \text{ °C}$  durchgeführt. Anschließend erfolgte mittels linearer Regression durch diese drei Messpunkte die Bestimmung der Scherbenwärmeleitfähigkeit bei einer angenommenen Probenmitteltemperatur von  $10 \text{ °C}$ . Für jeden Mittelwert wurden drei Messungen durchgeführt. Bei diesem Messverfahren konnte der Wärmestrom und damit die resultierende Scherbenwärmeleitfähigkeit aufgrund

der gegebenen Geometrien der Mundstücke bei der Probenherstellung nur entlang der z-Achse gemessen werden.

### 3.4.6 Elastizitätsmodul

Der dynamische Elastizitätsmodul wurde mit der Methode der Impulserregung gemäß den Normen ASTM C 1259, ASTM E 1875 und ASTM E 1876 an stabförmigen Probekörpern mit den Abmessungen 20 mm x 120 mm x 25 mm (Höhe x Länge x Breite) mit einem Gerät der Firma GrindoSonic vom Typ MK 5 ermittelt (Gleichung 15).<sup>131–133</sup>

$$E_{\text{dyn}} = 0,9465 \cdot \rho_b \cdot \frac{l^4}{h^2} \cdot f^2 \cdot T \quad \text{Gleichung 15}$$

mit

$$T = 1 + 6,585 \cdot (1 + 0,0752 \cdot \mu + 0,8109 \cdot \mu^2) \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^2 - 0,868 \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^4 - \frac{8,340 \cdot (1 + 0,2023 \cdot \mu + 2,173 \cdot \mu^2) \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^4}{1 + 6,338 \cdot (1 + 0,14081 \cdot \mu + 1,536 \cdot \mu^2) \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^2}$$

$E_{\text{dyn}}$ : Dynamischer Elastizitätsmodul [MPa]	$f$ : Frequenz der Impulserregung [kHz]
$\rho_b$ : Rohdichte des Probestabs [kg/m <sup>3</sup> ]	$T$ : Korrekturterm [-]
$l$ : Länge des Probestabs [m]	$\mu$ : Querkontraktionszahl [-]
$h$ : Höhe des Probestabs [m]	

### 3.4.7 3-Punkt-Biegefestigkeit

Die Bestimmung der 3-Punkt-Biegefestigkeiten erfolgte an einer Universalprüfmaschine der Firma Cadis Prüftechnik GmbH in Anlehnung an die Norm DIN EN 843-1.<sup>134</sup> Die Prüfvorrichtung besteht aus zwei parallel angeordneten Stützrollen, die um ihre Längsachse rotieren können, um Reibungseffekte zu vermeiden (Abbildung 28). Ein rechteckiger Probestab mit den Maßen Länge  $l = 120$  mm, Breite  $b = 25$  mm und Dicke  $d = 21$  mm wird auf die Stützrollen aufgelegt und mittels Druckfinne bei einer Verfahrensgrenze von 10 mm mit einer Kraft belastet, deren obere Grenze 9000 N beträgt.

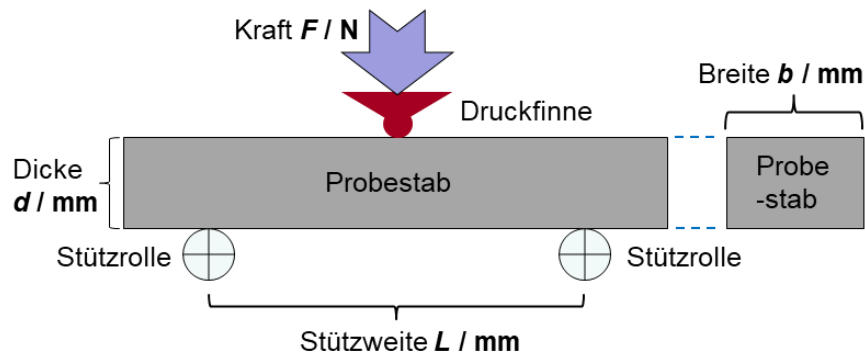


Abbildung 28: Schematischer Aufbau für die Bestimmung der 3-Punkt-Biegefestigkeit.

Einen schlagartigen Kraftabfall von 100 N oder darüber hinaus wertet die Analyse-Software als Materialversagen der Probe. Die Bruchlast  $F$  wird zu diesem Zeitpunkt aufgezeichnet (Gleichung 16).

$$\sigma_{3P} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Gleichung 16

$\sigma_{3P}$ : Biegefestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$b$ : Dicke des Probenstabs [mm]

$F$ : Bruchlast [N]

$h$ : Höhe des Probenstabs [mm]

$L$ : Stützweite [mm]

### 3.4.8 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde mit einer Universalprüfmaschine der Firma Weissgerber/Seidner GmbH & Co angelehnt an die Norm DIN EN 772-1 ermittelt (Abbildung 29).<sup>135</sup>



Abbildung 29: Universalprüfmaschine der Firma Weissgerber/Seidner-GmbH und Co zur Analyse der Druckfestigkeit.

Für die Druckprüfung wurden die Proben in Würfel mit der Kantenlänge 20 mm gesägt und geschliffen. Anschließend wurden die nassen, würfelförmigen Probekörper sowie die manuell extrudierten Proben im Trockenschrank bei 105 °C über einen Zeitraum von 24 h rückgetrocknet und anschließend im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt. Die Druckprüfungen wurden mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,3 (N/mm<sup>2</sup>)/s durchgeführt. Jede Probe wurde in x-, y- und z-Richtung auf ihre Druckfestigkeit untersucht. Bei den manuell extrudierten Probekörper zur Untersuchung des Einfluss der Bauteilgeometrie wurde die Druckfestigkeit in Extrusionsrichtung mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,2 (N/mm<sup>2</sup>)/s gemessen.

### 3.4.9 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Die Bestimmungen der thermischen Ausdehnungskoeffizienten erfolgten mit einem Schubstangen-Dilatometer bei einer Heizrate von 600 °C/h über den Temperaturbereich von 25 °C bis 800 °C. Dazu wurden im Vorfeld die stabförmigen Probekörper auf die Maße 5 mm x 5 mm x 25 mm (mit der längsten lateralen Abmessung von 25 mm jeweils entlang einer der drei Achsausrichtungen x, y und z) zurechtgesägt und geschliffen (Abbildung 30). Die Anpresskraft der Schubstange bzw. der Wegaufnehmer auf die Probe betrug 0,25 N. Die thermischen Ausdehnungen wurden entlang aller drei Raumachsen x, y und z gemessen, um eine mögliche Richtungsabhängigkeit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten feststellen zu können. Je Probetyp und Achsrichtung wurden zwei Proben gemessen und die Mittelwerte berechnet.

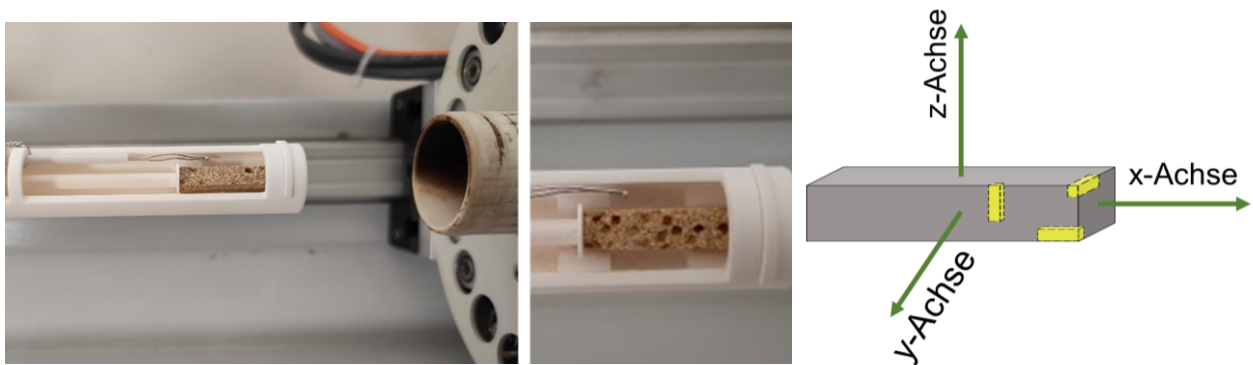


Abbildung 30: Im Schubstangen-Dilatometer platzierter Cordierit-Probekörper (l), Nahaufnahme eines Probekörpers mit kubischen Poren (m). Aussägen der Proben mit je einer längsten lateralen Ausdehnung entlang einer der drei Achsrichtungen (r).

### 3.4.10 Simultane Thermische Analyse

Simultane thermische Analysen wurden mit einem Analysegerät der Firma Netzsch vom Typ STA 449 F3 Jupiter® durchgeführt. Die Messungen an dem fertig gesintertem Probenmaterial umfassen nicht geschockte und zyklisch geschockte, porosierte und unporosierte Proben. Dafür wurde das Probenmaterial auf eine Korngröße  $< 63 \mu\text{m}$  gemörsert, wobei die Einwaage jeweils  $22,4 \pm 0,4 \text{ mg}$  betrug. Bei allen STA-Messungen wurden jeweils Gasströme von 10 ml/min Argon als Schutz-Gas und 40 ml/min synthetische Luft mit einem Volumenverhältnis von Stickstoff zu Sauerstoff von 80/20 als Purge-Gas eingesetzt. Alle Messungen wurden gemäß dem Temperatur-Zeit-Profil in Abbildung 31 und in Anlehnung an die Normen DIN 51006 und DIN 51007 durchgeführt.<sup>136,137</sup>

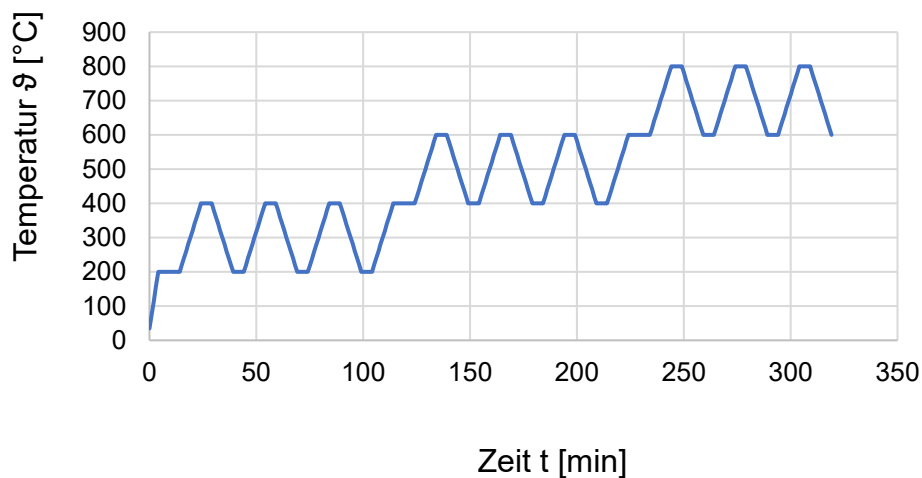


Abbildung 31: Temperatur-Zeit-Profil zur Simultanen Thermischen Analyse der fertig gesinterten Proben.

### 3.4.11 Röntgendiffraktometrie

Die XRD-Analysen wurden per Backloading-Verfahren mithilfe eines 9-9-Röntgendiffraktometers vom Typ X'Pert Pro der Firma PANalytical absolviert, um qualitativ die kristallinen Phasenbestandteile der Proben zu untersuchen. Diese Proben wurden auf eine Korngröße  $< 63 \mu\text{m}$  gemahlen. Im Rahmen der Messung wurde ein Winkelbereich von  $5 - 90^\circ 2\theta$  abgefahren. Die Auswertung erfolgte mittels der Software HighScore Plus 3.0e der Firma PANalytical.



## **4 Numerische Methoden**

In den folgenden Kapiteln werden die verwendete Software, Stoffdaten und Einstellungen sowie das grundsätzliche Vorgehen bei den FEM-Simulationen erläutert.

### **4.1 Software**

Die FEM-Simulationen wurden mit der Simulations-Software Ansys 2022 R1 Teaching durchgeführt. Mit dem Unterprogramm „DesignModeler“ wurden die Geometrien der Probekörper konstruiert und mit „Fluent“ die transienten Temperaturprofile beim simulierten Abschrecken der Probekörper berechnet. Diese Ergebnisse wurden eingesetzt, um mit dem Unterprogramm „Transiente Strukturmechanik“, die beim Thermoschock auftretenden Hauptspannungen zu simulieren.

### **4.2 Geometrisches Design**

Als Basis für die geometrische Konstruktion der Probekörper für die FEM-Simulationen dienten die Variationsparameter "Grundflächenform", „Extrusionslänge“ und „Maßstab“. Die Grundfläche entspricht dabei der Extrusionsquerschnittsfläche. Die Extrusionslänge entspricht in der Simulation und bei den zugehörigen praktischen Vergleichsversuchen der Probenhöhe. Diese quadratischen und kreisförmigen Grundflächen wurden im Konstruktionsprogramm DesignModeler durch Extrusion um die Extrusionslänge  $x$  zu einem Volumenkörper transformiert. Um vergleichbare Probekörper zu erhalten, wurde je Gruppe von Probetypen die Extrusionslänge  $x$ , das Volumen  $V$  und die Extrusionsquerschnittsfläche  $A$  konstant gehalten. Eine Gruppe von Probetypen entspricht je drei Probebezeichnungen wie z.B. 1qua1,0, 2qua1,0 und 8qua1,0 bei denen die drei Buchstaben für die Grundflächengeometrie (qua = quadratisch, zyl = kreisförmig) und die hintere Zahl 1,0 für den Maßstab (1,0 = Maßstab 1, 2,5 = Maßstab 2,5 und 25 = Maßstab 25) gleich sind.

Tabelle 11: Alle 18 Probengeometrien, die auf Basis quadratischer und kreisförmiger Grundflächen konstruiert wurden, für die FEM-Parameterstudie mit den zugehörigen Abmessungen.

Proben mit quadratischer Grundfläche							
Größe	Extrusionslänge (Höhe)	Breite	Länge	Volumen	Oberfläche	Volumenspezifische Oberfläche	Extrusionsquerschnittsfläche
Symbol	x	y	z	V	S	S <sub>v</sub>	A
Einheit/ Probetyp	[mm]	[mm]	[mm]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[1/m]	[cm <sup>2</sup> ]
1qua1,0	10	10	10	1	6,0	600	1
2qua1,0	20	10	10	2	10,0	500	1
8qua1,0	80	10	10	8	34,0	425	1
1qua2,5	25	25	25	15,625	37,5	240	6,25
2qua2,5	50	25	25	31,25	62,5	200	6,25
8qua2,5	200	25	25	125	212,5	170	6,25
1qua25	250	250	250	15625	3750	24	625
2qua25	500	250	250	31250	6250	20	625
8qua25	2000	250	250	125000	21250	17	625
Proben mit kreisförmiger Grundfläche							
Größe	Extrusionslänge (Höhe)	Breite (Durchmesser)	Länge (Durchmesser)	Volumen	Oberfläche	Volumenspezifische Oberfläche	Extrusionsquerschnittsfläche
Symbol	x	y (d)	z (d)	V	S	S <sub>v</sub>	A
Einheit/ Probetyp	[mm]	[mm]	[mm]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[1/m]	[cm <sup>2</sup> ]
1zyl1,0	10	11,3	11,3	1	5,5	554,5	1
2zyl1,0	20	11,3	11,3	2	9,1	454,5	1
8zyl1,0	80	11,3	11,3	8	30,4	379,5	1
1zyl2,5	25	28,2	28,2	15,625	34,7	221,8	6,25
2zyl2,5	50	28,2	28,2	31,25	56,8	181,8	6,25
8zyl2,5	200	28,2	28,2	125	189,7	151,8	6,25
1zyl25	250	282,1	282,1	15625	3465,6	22,2	625
2zyl25	500	282,1	282,1	31250	5681,1	18,2	625
8zyl25	2000	282,1	282,1	125000	18974,5	15,2	625

Die vordere Zahl 1 steht für die Extrusionslänge mal 10 mm, die mit dem hier gewählten Maßstab von 1,0 multipliziert wird. Auf diese Weise wurden 18 Probekörper für eine Parameterstudie mit 2 Grundflächengeometrien, 3 Extrusionslängen und je 3 Maßstäben

konstruiert (Abbildung 32 und Tabelle 11). Um jeden Probekörper wurde das 50fache seines Volumens als Hüllkörper-Fluid konstruiert, das als Abschreckmedium fungiert.

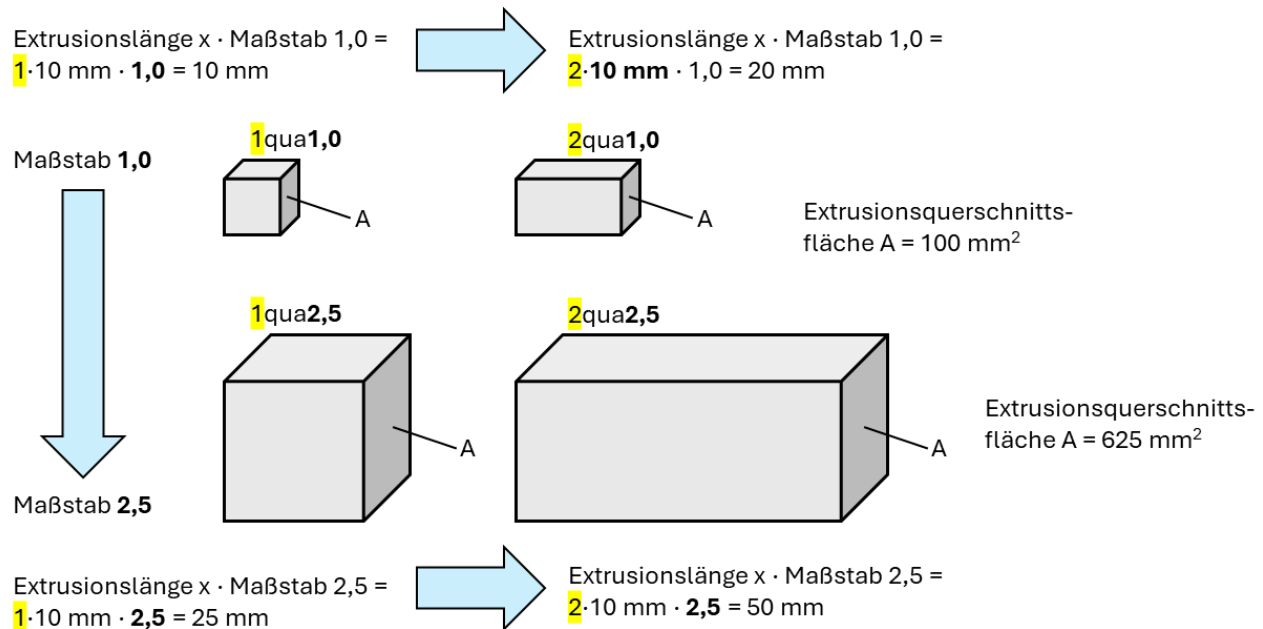


Abbildung 32: Prinzip des geometrischen Designs für die FEM-Parameterstudie.

### 4.3 Fluent

Mit dem Unterprogramm Fluent wurden die Temperaturprofile im FEM-Probekörper über die Zeit (hier die Verweildauer im Wasserbad) numerisch berechnet. Je nach Maßstab wurden zur Vernetzung im Bereich „Netz“ unterschiedliche Elementgrößen gewählt. Bei Maßstab 1,0 haben Solid (Probekörper) und Fluid (Wasser) Elementgrößen von  $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$  und

$1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , bei dem Maßstab 2,5 wurden für Solid und Fluid die Elementgrößen  $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  und  $3,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  und bei dem Maßstab 25 die Elementgrößen  $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$  und  $3,75 \cdot 10^{-2} \text{ m}$  verwendet. Die werkstofftechnischen Parameter (Dichte =  $1940 \text{ kg/m}^3$ , spezifische Wärmekapazität  $1062 \text{ J/(kgK)}$ , Wärmeleitfähigkeit  $0,657 \text{ W/(mK)}$ ) für die simulierten Cordierit-Probekörper stammen aus den Ergebnissen von experimentellen Messungen und werden im hier verwendeten Model vereinfacht als nicht temperaturabhängig und somit als konstant angenommen. Der FEM-Probekörper wird mit einer Temperatur von  $750 \text{ °C}$  und das Abschreckmedium Wasser, wie im praktischen Thermoschockversuch, mit  $20 \text{ °C}$  versehen (Initialization: Patch: Zones to Patch).

## Numerische Methoden

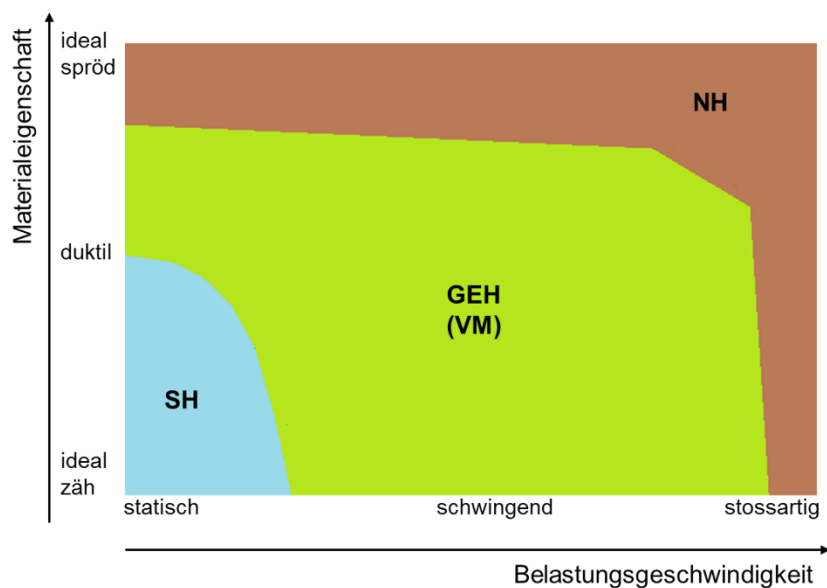
Tabelle 12: Einstellungen, Parameter und Modelle für die durchgeführten Thermoschocksimulationen im Programm Fluent zur Bestimmung des transienten Temperaturprofils.

Fluent	Abschnitt	Maßstab 1,0	Maßstab 2,5	Maßstab 25	Einheit
Netz	Komponente	Elementgröße			
	probekoerper_solid	4,00e-04	2,00e-03	2,00e-02	m
	wasser_fluid	1,50e-03	3,75e-03	3,75e-02	m
	Netzqualität	Schiefe			
	Ziel-Schiefwert	0,8			
General	Type	Pressure-Based			
	Time	Transient			
	Units	T in °C			
	Gravitational Acceleration				
	x	0			m/s <sup>2</sup>
	y	0			m/s <sup>2</sup>
	z	-9,81			m/s <sup>2</sup>
Models	Energy	on			
	Model	viscous sst k-omega			
		k-omega 2			
		SST			
Materials	solid	my_cordierit			
	Density	1940			[kg/m <sup>3</sup> ]
	Cp (Specfic Heat)	1062			[J/(kgK)]
	Thermal Conductivity	0,657			[W/(mK)]
	fluid	water_fluid			
		aus Ansys-Datenbank			
Methods	Scheme	Coupled			
	Transient Formulation	Second Order Implicit			
	Sonstige Einstellungen	default settings			
Residual Monitors	continuity	0,001			
	x-velocity	0,0001			
	y-velocity	0,0001			
	z-velocity	0,0001			
	energy	1e-06			
Calculation Activities	Autosave	Save Data File Every: 1 Time Steps			
		Save Associated Case Files: Each Time			
Initialization	Hybrid	Patch: Zones to Patch:			
	Patch: Zones to Patch:	Temperature			
	probekoerper_solid	750			°C
	wasser_fluid	20			°C
Run Calculation	Time Step Size	0,5			s
	Number Of Time Steps	240			
	Sonstige Einstellungen	default settings			

Die Simulation findet über einen simulierten Zeitraum von 120 s statt (240 timesteps à 0,5 s), was der Verweildauer der Proben im Wasserbad beim praktischen Thermoschock entspricht (Tabelle 12). Alle wichtigen Einstellungen, Modelle und Parameter für die Fluent-Simulation sind in Tabelle 12 für Maßstab 1,0, Maßstab 2,5 und Maßstab 25 aufgelistet.

#### 4.4 Transiente Strukturmechanik

Mit dem Unterprogramm Transiente Strukturmechanik wurde das zuvor in Fluent berechnete zeitabhängige Temperaturprofil des simulierten Probekörpers herangezogen, um die, durch den Thermoschock induzierten, im Material auftretenden thermischen Spannungen zu berechnen. Vor dem Erstellen des Modells wurden zunächst experimentell ermittelte Materialdaten der zu simulierenden Cordierit-Probekörper erstellt und als technische Daten zur Materialdatenbank von Ansys hinzugefügt (Tabelle 13). Dabei wurden alle Eigenschaften vereinfacht als isotrop angenommen.



#### Typische Anwendungsfälle

**GEH:** Nicht allzu spröde, eher zähe Materialien bei wechselnder nicht stoßartiger Belastung (z.B. Biegung und Torsion von Wellen)

**SH:** Zähes Material, das unter statischer Belastung durch Fließen versagt (Gleitbruch)

**NH:** Spröde Materialien unter Zugbeanspruchung oder spröde und zähe Materialien bei stoßartiger Belastung

→ Betragsmäßig größte Hauptspannung (1. - 3. HS) führt zu Versagen

GEH (VM): Gestaltänderungshypothese (Vergleichsspannung nach Mises)

SH: Schubspannungshypothese

NH: Normalspannungshypothese

Abbildung 33: Qualitative Darstellung zur Gültigkeit der drei Vergleichsspannungshypothesen Gestaltänderungshypothese, Schubspannungshypothese und Normalspannungshypothese je nach Kombination von Belastungsgeschwindigkeit und Materialeigenschaft.<sup>138,139</sup>

Nach der Normalspannungshypothese, die für spröde Materialien gilt (Abbildung 33), wurde die betragsmäßig größte Hauptspannung als charakteristische Größe für die durch den Thermoschock auftretende Belastung im Probekörper herangezogen.<sup>138,139</sup>

Tabelle 13: Set aller Materialdaten, die als technische Daten für den Probekörper in der transienten Strukturmechanik verwendet wurden.

T [°C]	Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha$ [1/K]	Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Max. Zugfestigkeit [Pa]
10	1,96E-07	2130	7,60E+06
100	3,53E-07		
200	5,30E-07		
300	7,43E-07		
400	1,01E-06		
500	1,35E-06		
600	1,70E-06		
700	2,05E-06		
800	2,05E-06		
		E-Modul [Pa]	Druckfestigkeit [Pa]
		4,49E+10	8,00E+08
		Querkontraktionszahl [-]	
		0,15	
Referenztemperatur ohne Materialausdehnung [°C]			
20		Alle Eigenschaften: Isotrop	

In Tabelle 14 folgen die ausgewählten Optionen, verwendeten Einstellungen und Zahlenwerte für das Simulationsmodell der transienten Strukturmechanik.

Tabelle 14: Verwendete Optionen und Einstellungen des transienten Strukturmechanik-Modells.

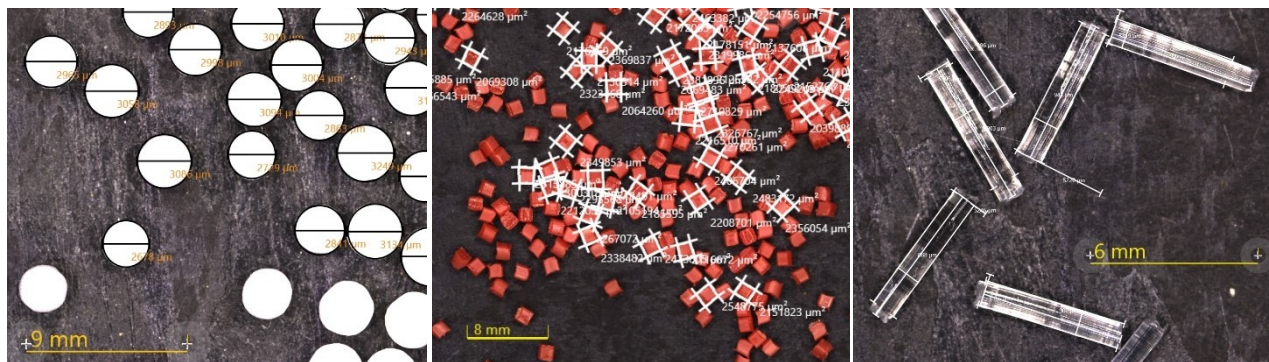
Transiente Strukturmechanik		Eingaben	
Geometrie	wasser_fluid	Körper unterdrücken	
	probekoerper_solid	Material:	
		Zuordnung: Cordierit	
Netz	Physikvoreinstellung	CFD	
	Elementansatzfunktion	quadratisch	
	Elementgröße	4,00e-04 m (Maßstab 1,0) 1,00e-03 m (Maßstab 2,5)	
	Schiefe	0,8	
Transient	Importierte Last	Importierte Körpertemperatur:	Fluent-Simulation
		Quellzeit	Alle
	Analyseeinstellungen	Anzahl Lastschritte	1
		Aktuelle Schrittnummer	1
		Zeit nach Schritt	120 s
		Anfänglicher Zeitschritt	0,5 s
		Min. Zeitschritt	0,5 s
		Max. Zeitschritt	0,5 s
		Sonstige Einstellungen	default settings

## 5 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird zunächst die Korngrößenverteilung der Porosierungsmittel dargelegt. Danach folgt die Charakterisierung mechanischer und thermischer Eigenschaften der hergestellten Probekörper und deren Thermoschockverhalten.

### 5.1 Volumengewichtete Korngrößenverteilung der Porosierungsmittel

Für jedes Porosierungsmittel wurden mit Hilfe des Lichtmikroskops je 100 Volumina einzelner Porosierungsmittel-Körner bestimmt. Dazu wurden die relevanten Maße (Kugeldurchmesser  $d$ , Quaderfläche  $A$ , Zylinderdurchmesser  $d$  und Zylinderhöhe  $h$ ) zur Berechnung der entsprechenden Volumina gemessen (Abbildung 34).



Sphärisches  
Porosierungsmittel (EPS)

$$V_{\text{Kugel}} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3$$

Kubisches  
Porosierungsmittel (PA6)

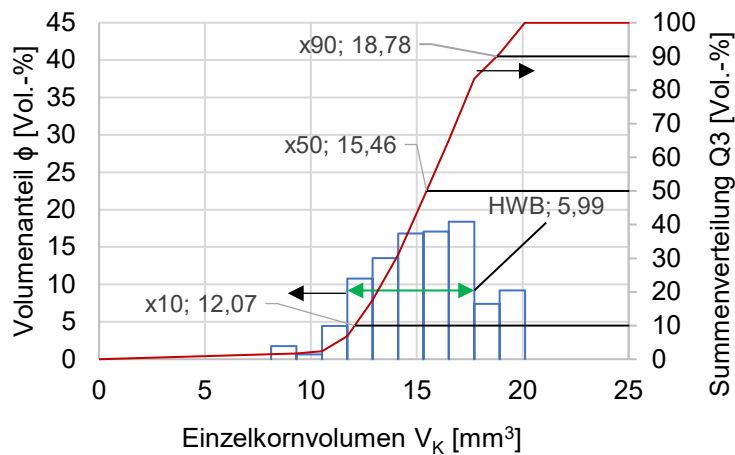
$$V_{\text{Quader}} = (\sqrt{A})^3$$

Zylindrisches  
Porosierungsmittel (PLA)

$$V_{\text{Zylinder}} = \frac{1}{4} \cdot d^2$$

Abbildung 34: Bestimmung der relevanten Abmessungen für die Berechnung der Volumina der einzelnen Porosierungsmittel-Körner per Lichtmikroskop für sphärische (l), kubische (m) und zylindrische (r) Porosierungsmittel-Geometrien.

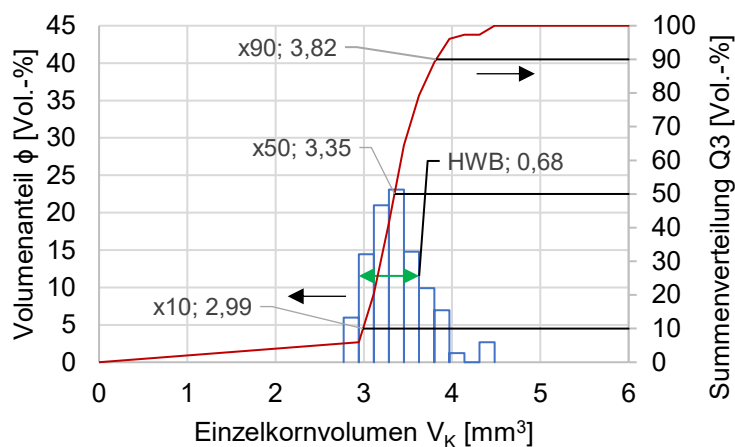
Aus den Daten wurden die x10-, x50- und x90-Werte, die arithmetischen Mittel sowie die Summen- und Dichteverteilungen gebildet (Abbildung 35, Tabelle 15).



## Sphärisches Porosierungsmittel

### (EPS)

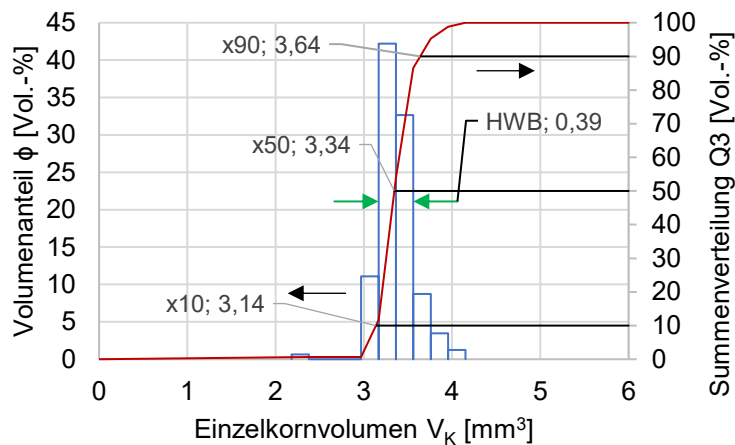
- $x_{10} = 12,07 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 15,46 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 18,78 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 5,99 \text{ mm}^3$



## Kubisches Porosierungsmittel

### (PA6)

- $x_{10} = 2,99 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,35 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 3,82 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 0,68 \text{ mm}^3$



## Zylinderförmiges

### Porosierungsmittel (PLA)

- $x_{10} = 3,14 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,34 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 3,64 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 0,39 \text{ mm}^3$

Abbildung 35: Volumengewichtete Korngrößenverteilung sphärischer (o), kubischer (m) und zylindrischer Porosierungsmittel (u) mit Volumenanteil der Einzelkörner am Gesamtvolumen  $\phi$ , Summenverteilung Q3 sowie  $x_{10}$ -,  $x_{50}$ - und  $x_{90}$ -Werten und Halbwertsbreiten (HWB).



## Ergebnisse

Das arithmetische Mittel sowie die x10-, x50. und x90-Werte sind beim Porosierungsmittel mit sphärischer Geometrie deutlich größer als bei den kubischen und zylinderförmigen Porosierungsmitteln. Die Ursache dafür ist das kompressible Verhalten des EPS beim Extrusionsvorgang mit einem Schrumpfungsfaktor von ca. 4-5 auf das mittlere Volumen eines einzelnen Porosierungsmittelkorns bezogen. Auf der Ergebnisbasis von Vorversuchen, wurde das Porosierungsmittel entsprechend größer gewählt, um nach der Schrumpfung bei der Probenherstellung die erwünschte Porengröße zu erreichen.

Tabelle 15: Das jeweilige arithmetische Mittel  $V_{pm}$  der Einzelporenvolumina der Porosierungsmittelkörner mit den dazugehörigen Standardabweichungen sowie die x10-, x50- und x90-Werte aus der volumengewichteten Korngrößenverteilung.

Porosierungsmittelgeometrie	Sphärisch	Kubisch	Zylindrisch
Volumengewichtete Korngrößenverteilung			
x10 [mm <sup>3</sup> ]	12,07	2,99	3,14
<b>x50 [mm<sup>3</sup>]</b>	<b>15,46</b>	<b>3,35</b>	<b>3,34</b>
x90 [mm <sup>3</sup> ]	18,78	3,82	3,64
Arithmetisches Mittel			
<b>Mittelwert <math>V_{pm}</math> [mm<sup>3</sup>]</b>	<b>14,84</b>	<b>3,36</b>	<b>3,35</b>
Standardabweichung s [mm <sup>3</sup> ]	2,63	0,32	0,22

Die Porosierungsmittel für kubische und zylindrische Poren aus PA6 und PLA zeigten beim Extrusionsvorgang ein inkompressibles Verhalten und liegen mit den x50-Werten 3,35 und 3,34 mm<sup>3</sup> sowie 3,36 und 3,35 mm<sup>3</sup> eng zusammen. Die kubischen Porosierungsmittelkörner zeigen mit 0,68 mm<sup>3</sup> eine größere Halbwertsbreite als die zylinderförmigen Porosierungsmittel mit 0,39 mm<sup>3</sup>. Der Vergleich zwischen Porosierungsmittelgröße und resultierender Porengröße wird in Kap. 5.6 behandelt.

## 5.2 Zusammensetzung der Keramik

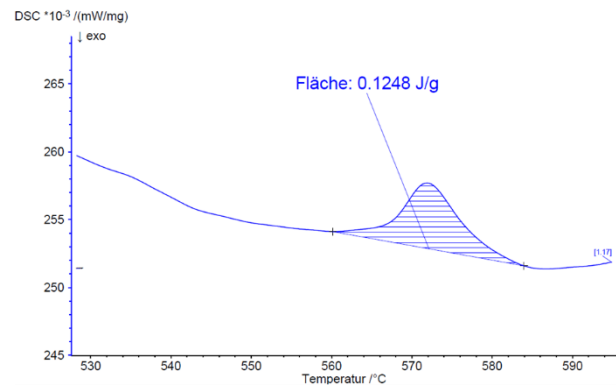
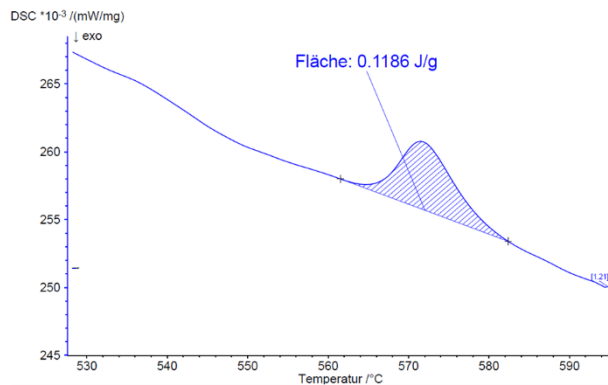
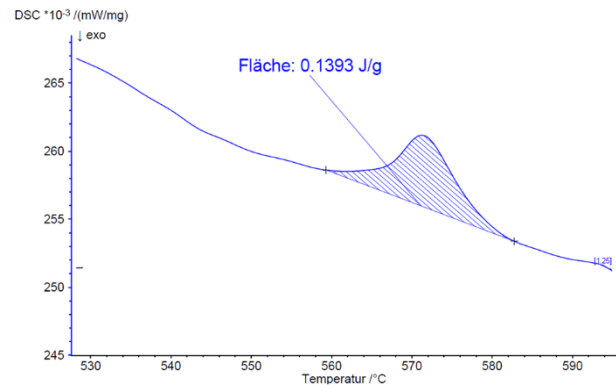
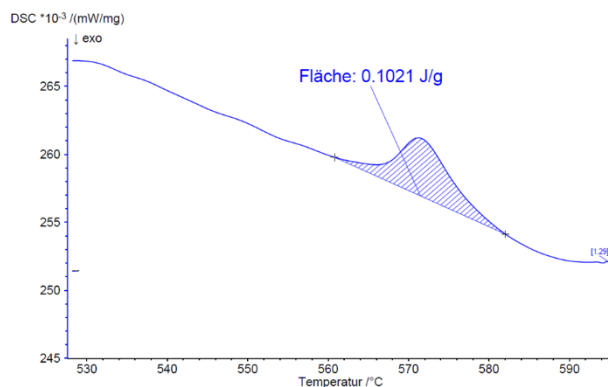
Gemäß XRD sind die Hauptphasen fertig gesinterter Proben Cordierit, Mullit und Quarz (Durch STA-Messungen und dem Literaturwert für die Enthalpie der Fest-Fest-Phasen-Umwandlung beim Quarzsprung  $\Delta H_{\alpha-\beta,m} = 92 \text{ cal/mol}$  [140] wird der Quarzanteil im Probematerial quantifiziert (Abbildung 36). Tabelle 16). Ob die Proben mit oder ohne Porosierungsmittel hergestellt wurden, hatte keinen messbaren Einfluss auf die Zusammensetzung. Durch STA-Messungen und dem Literaturwert für die Enthalpie der

## Ergebnisse

Fest-Fest-Phasen-Umwandlung beim Quarzsprung  $\Delta H_{\alpha-\beta, m} = 92 \text{ cal/mol}^{140}$  wird der Quarzanteil im Probematerial quantifiziert (Abbildung 36). Tabelle 16: Tabellarische Auflistung der Phasen zu den detektierten Hauptpeaks der XRD-Messung mit der Software HighScore Plus.

Sichtbar	PDF-Nr.	Score	Verbindungsname	Verschiebung [°2Th.]	Skalierung	Chemische Formel
*	98-004-5299	68	Cordierite high	0,000	1,351	Al <sub>4</sub> Mg <sub>2</sub> O <sub>18</sub> Si <sub>5</sub>
*	98-008-0125	44	Mullite	0,000	0,202	Al <sub>4.68</sub> O <sub>9.66</sub> Si <sub>1.32</sub>
*	98-002-1814	47	Quartz low	0,000	0,388	O <sub>2</sub> Si <sub>1</sub>

Mit der molaren Masse für Quarz  $M_{\text{Quarz}} = 60,0843 \text{ g/mol}$  und der Umrechnung von Kalorien in Joule ( $1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$ ) ergibt sich die spezifische Enthalpie  $\Delta h_{\alpha-\beta} = 6,406 \text{ J/g}$ , mit der aus der gemessenen Energiemenge der STA-Messung und der untersuchten Probenmasse der Massenanteil von Quarz in der Probe bestimmt wird (Gleichung 17).



## Ergebnisse

Abbildung 36: Vierfache Bestimmung der endothermen Energie bei der Fest-Fest-Phasenumwandlung von  $\alpha$ -Quarz in  $\beta$ -Quarz bei 573 °C.

$$x_{\text{Quarz}} = \frac{m_{\text{Quarz}}}{m_{\text{Probe}}} = \frac{\Delta h_{\text{gemessen}} \cdot m_{\text{Probe}}}{m_{\text{Probe}} \cdot \Delta h_{\alpha-\beta}} = \frac{\Delta h_{\text{gemessen}}}{\Delta h_{\alpha-\beta}} \quad \text{Gleichung 17}$$

$x_{\text{Quarz}}$ : Massenanteil Quarz in der Probemasse

$m_{\text{Quarz}}$ : Masse Quarz in der Probe [g]

$m_{\text{Probe}}$ : Masse der Probe / Gesamtmasse [g]

$\Delta h_{\text{STA}}$ : Bei STA gemessene spezifische Energie [J/g]

$\Delta h_{\alpha-\beta}$ : Spezifische Phasenumwandlungsenthalpie von  $\alpha$ - zu  $\beta$ -Quarz [J/g]

Die Probe weist einen Quarzanteil von ca. 2 Ma.-% auf (Tabelle 17). Die Standardabweichung von 0,2 Ma.-% bedeutet relativ auf den Massenanteil bezogen eine Ungenauigkeit von gut 10 %.

Tabelle 17: Ergebnis der Bestimmung des mittleren Massenanteils und der Standardabweichung von Quarz im fertig gesinterten Probenmaterial.

Endotherme Energie [J/g]	Massenanteil Quarz $x_{\text{Quarz}}$ [-]	Massenanteil Quarz $x_{\text{Quarz}}$ [Ma.-%]
0,1021	0,016	1,6
0,1393	0,022	2,2
0,1186	0,019	1,9
0,1248	0,019	1,9
<b>Mittelwert</b>	<b>0,019</b>	<b>1,9</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>0,002</b>	<b>0,2</b>

Der Quarzanteil kann für die Thermoschockeigenschaften einer Keramik von Bedeutung sein, da die Umwandlung von Tiefquarz in Hochquarz bei 573 °C mit einer Volumenänderung einhergeht und auf diese Weise zu Spannungen, Rissbildungen und somit zu einer Verschlechterung der Thermoschockeigenschaften führen kann.<sup>78</sup>

### 5.3 Porenorientierung

Bei einer ideal kugelsymmetrischen Porenform ist keine Vorzugsorientierung möglich. Die kubischen Poren werden hier vereinfacht als näherungsweise kugelsymmetrisch betrachtet. Bei zylindrischen Poren, mit der längsten lateralen Ausdehnung entlang einer

## Ergebnisse

Raumachse, kann eine Vorzugsorientierung vorliegen. Qualitativ ist so eine Vorzugsorientierung der Zylinderporen in Abbildung 37 erkennbar.

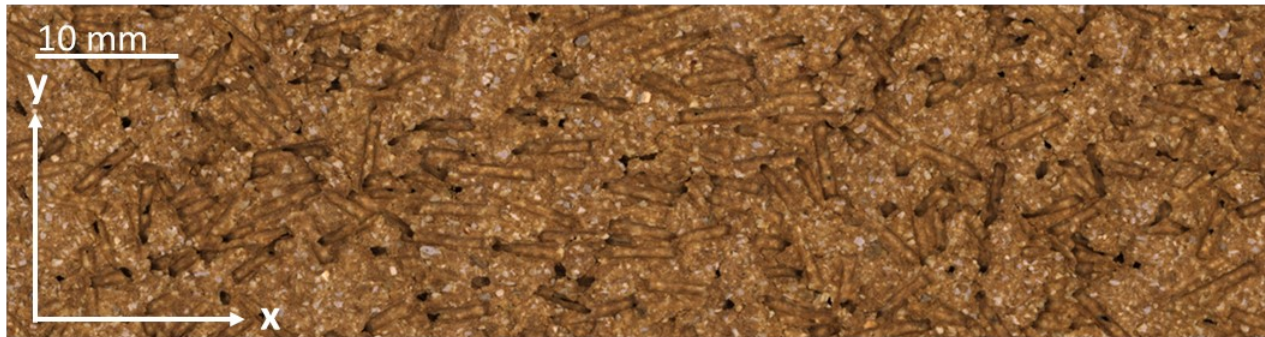


Abbildung 37: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Cordierit-Probe. Die Zylinderporen zeigen eine Vorzugsorientierung entlang ihrer längsten lateralen Ausdehnung in Extrusionsrichtung (x-Achse).

Die Ursache für diese Vorzugsorientierung ist die Ausrichtung des zylindrischen Porosierungsmittels während der Extrusion.

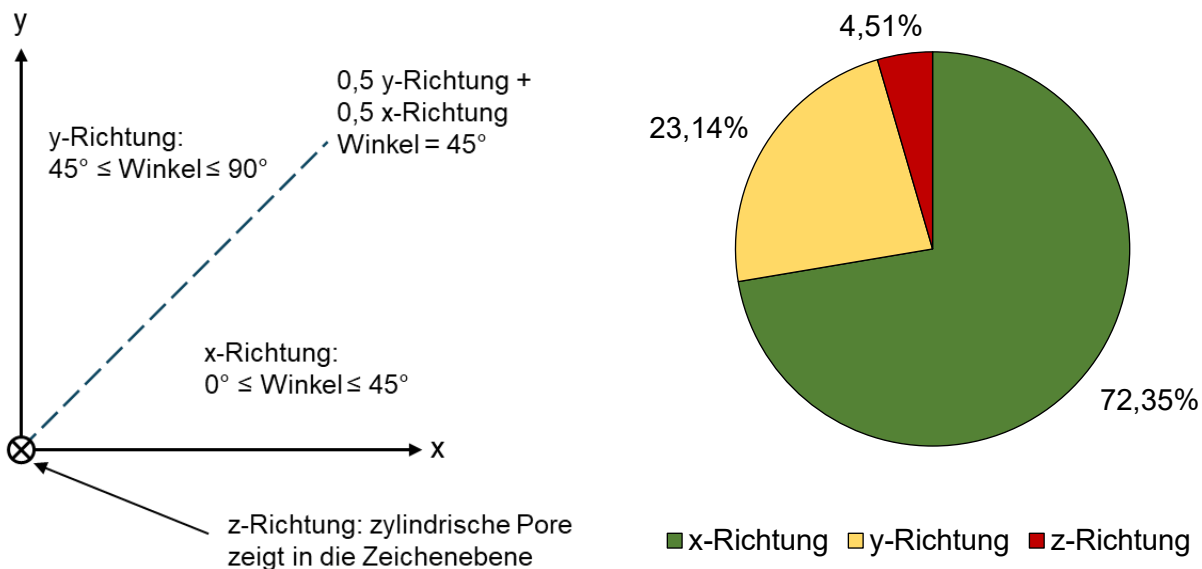


Abbildung 38: Zuordnung der Vorzugsorientierung der längsten lateralen Ausdehnung der zylindrischen Poren (l). Auswertung der Anzahlverteilung nach Achsenorientierung für eine Probe mit 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe (r).

Um in erster Näherung anhand einer Anzahlverteilung eine Quantifizierung der Vorzugsorientierung der Poren zu erhalten, wurden in einer digitalen Mikroskop-Aufnahme die Poren, deren längste laterale Ausdehnung zwischen x- und y-Achse einen Winkel

## Ergebnisse

zwischen  $0^\circ$  und  $< 45^\circ$  aufweisen, als vorzugsweise x-orientiert gewertet. Analog dazu, wurden die Poren, deren längste laterale Ausdehnung einen Winkel von  $> 45^\circ$  bis  $\leq 90^\circ$  in Extrusionsrichtung (x-Richtung) zeigen, als y-orientiert gewertet. Poren, deren längste laterale Ausdehnung zwischen x- und y-Achse exakt einen Winkel von  $45^\circ$  zeigen, wurden mit je 0,5 zu den x- und y-orientierten Poren gezählt. Poren, die in die Ebene hineinragen und somit eindeutig in z-Richtung zeigen, wurden als z-orientiert gewertet. Aus der Bewertung einer Gesamtanzahl von 443 Poren an der Oberfläche einer Cordierit-Probenplatte, die mit einer Porosierungsmittel-Zugabe von 20 Vol.-% hergestellt wurde, ergibt sich eine erste zahlenbasierte, quantitative Einschätzung bezüglich der Vorzugsorientierung der ausgebildeten Poren (Abbildung 38). Gemäß der Auszählung weisen 72,35 % der Poren (320,5 Poren) überwiegend in x-Richtung, während 23,14 % (102,5 Poren) entlang der y-Achse und 4,51 % (20 Poren) entlang der z-Achse ausgerichtet sind. Das wurde in gleicher Weise auch für die Proben mit 5, 10 und 15 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe durchgeführt.

Tabelle 18: Anzahl der ausgezählten Poren N und prozentuale Verteilung gemäß der Orientierung der längsten lateralen Ausdehnung von Cordierit-Proben entlang der x-, y- und z-Achse für Cordierit-Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe und zylindrischen Poren.

<b>PM-Zugabe [Vol.-%]</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>
Achsrichtung	N [-]	N [-]	N [-]	N [-]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]
x-Richtung	320,5	401	150	99,5	72,35	80,20	68,81	73,70
y-Richtung	102,5	73	54	28,5	23,14	14,60	24,77	21,11
z-Richtung	20	26	14	7	4,51	5,20	6,42	5,19
gesamt	443	500	218	135	100,00	100,00	100,00	100,00

Mit Anteilen im Bereich von 68,81 % bis 80,20 % kommt bei allen Stufen der Porosierungsmittel-Zugabe die Ausrichtung der längsten lateralen Ausdehnung entlang der x-Achse der Anzahl nach am häufigsten. Die Ausrichtungen entlang der y- und z-Achse zeigen geringere Anteile im Bereich von 14,60 % bis 24,77 % und 4,51 % bis 6,42 % (Tabelle 18). Eine deutliche Vorzugsorientierung zylinderförmiger Poren entlang der Extrusionsrichtung (x-Achse) ist somit in erster Näherung quantitativ nachweisbar.

## 5.4 Druckfestigkeit

Die nachfolgend dargestellten Druckfestigkeitsmessungen der Cordierit-Proben sind Mittelwerte, die sich aus 5 Messungen je Probetyp ergeben. Die Druckfestigkeit für nicht porosierte Proben und die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sphärischen, kubischen und zylindrischen Poren zeigen eine Anisotropie je nach in Kap. 3.2.3 festgelegter Raumachse.

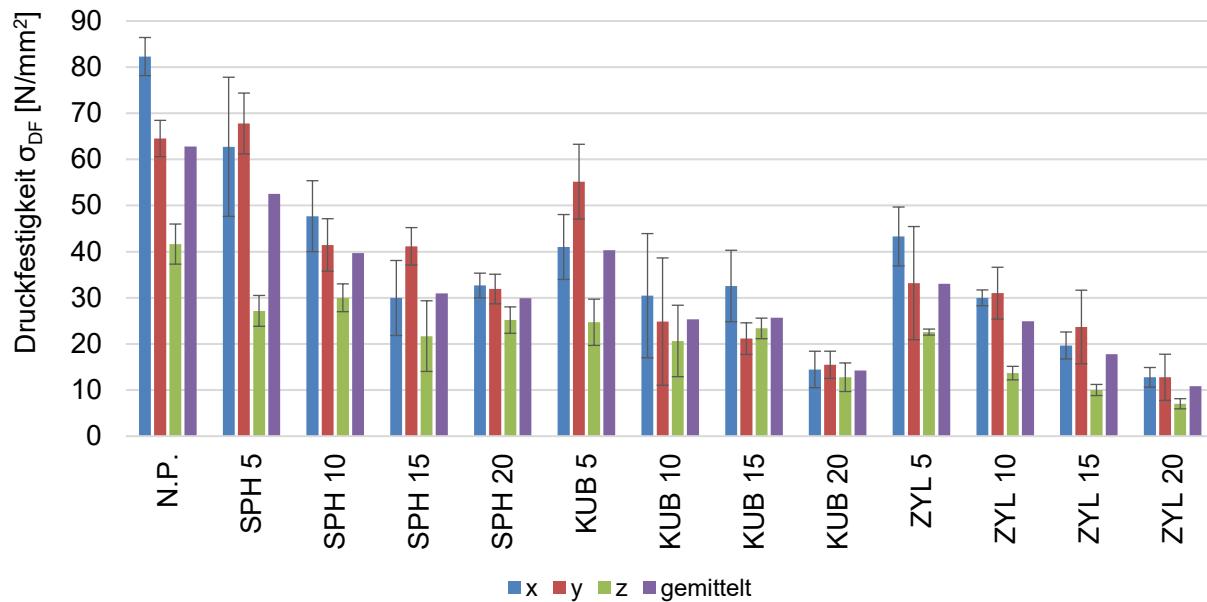


Abbildung 39: Druckfestigkeit für die nicht porosierte Cordierit-Referenzprobe (N.P) und für Cordierit-Proben, die mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Porosierungsmittel mit sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen Poren (ZYL) hergestellt wurden. Messwerte für jede der 3 Achsrichtungen x, y, z und über alle Achsrichtungen gemittelt sowie die Standardabweichung, dargestellt als Fehlerbalken.

Bis auf die Proben, die mit 15 Vol.-% kubischer Poren hergestellt wurden, sind die Ergebnisse der Druckfestigkeit in z-Richtung für alle Probetypen stets am geringsten. Die Druckfestigkeit in x- und y-Richtung sind ca. zu gleichen Anteilen höher oder tiefer als die Druckfestigkeit in die jeweils andere Achsrichtung. Bei den Unterschieden in x- und y-Richtung lässt sich keine Tendenz hinsichtlich der Porengeometrie oder des Porosierungsgrades feststellen, jedoch liegt auch grundsätzlich eine hohe Streuung der Messwerte gemäß der Standardabweichung vor. Die Druckfestigkeit der porosierten Proben nimmt im Mittel gegenüber der nicht porosierten Referenz mit zunehmendem Porosierungsgrad ab. Bei den über alle Raumachsen gemittelten Werten für die

Druckfestigkeit zeigen die Proben mit zylindrischen Poren gegenüber der nicht porierten Referenz die größte Minderung in der Druckfestigkeit, während die Proben mit sphärischen Poren die kleinste Verringerung der Druckfestigkeiten aufweisen (Abbildung 40).

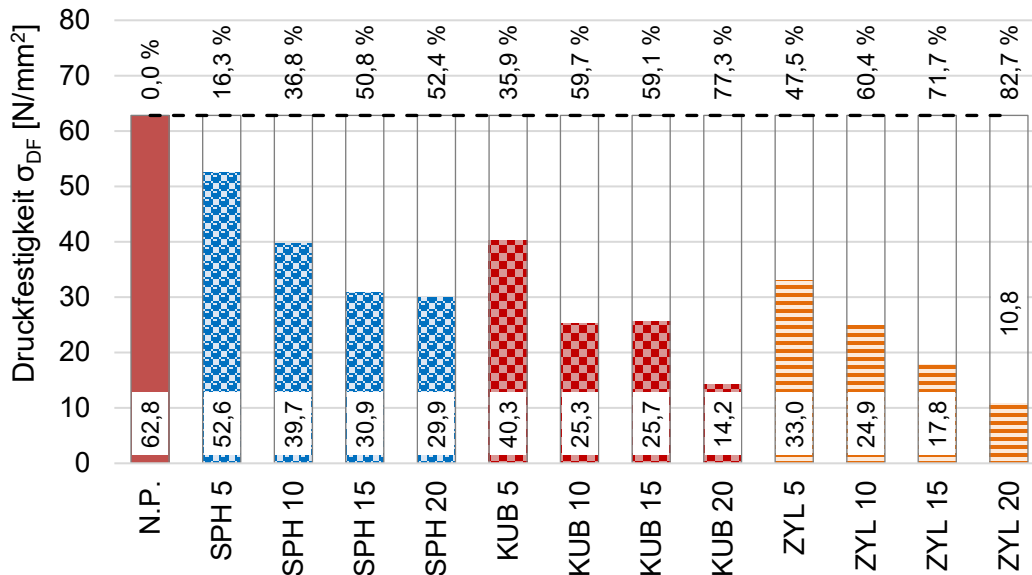


Abbildung 40: Druckfestigkeiten gemittelt über die 3 Raumachsen für Proben mit sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen (ZYL) Poren für alle Porosierungsgrade sowie für die nicht porierte Referenzprobe mit der relativen Minderung der Druckfestigkeit gegenüber der Referenzprobe und den absoluten Druckfestigkeitswerten.

Durch die Porosierung findet grundsätzlich eine Verringerung der Druckfestigkeit im Vergleich zur nicht porierten Referenzprobe statt, die gemäß der Erwartung mit ansteigendem Porosierungsgrad zunimmt.

### 5.5 Rohdichte, Reindichte und Porosität

Mittels Schieblehre und Waage wird die Rohdichte bestimmt. Das arithmetische Mittel der Werte für die Rohdichte sowie die entsprechende Standardabweichung werden aus jeweils 10 Einzelmessungen ermittelt (Abbildung 41). Bei einer anteiligen Zugabe von 5 Vol.-% Porosierungsmittel weisen die fertig hergestellten Proben mit sphärischen Poren im Mittel eine Rohdichte von  $1,84 \pm 0,010 \text{ g/cm}^3$  auf, während die Proben mit kubischen und zylindrischen Poren Mittelwerte von  $1,84 \pm 0,011 \text{ g/cm}^3$  und  $1,83 \pm 0,009 \text{ g/cm}^3$  zeigen.

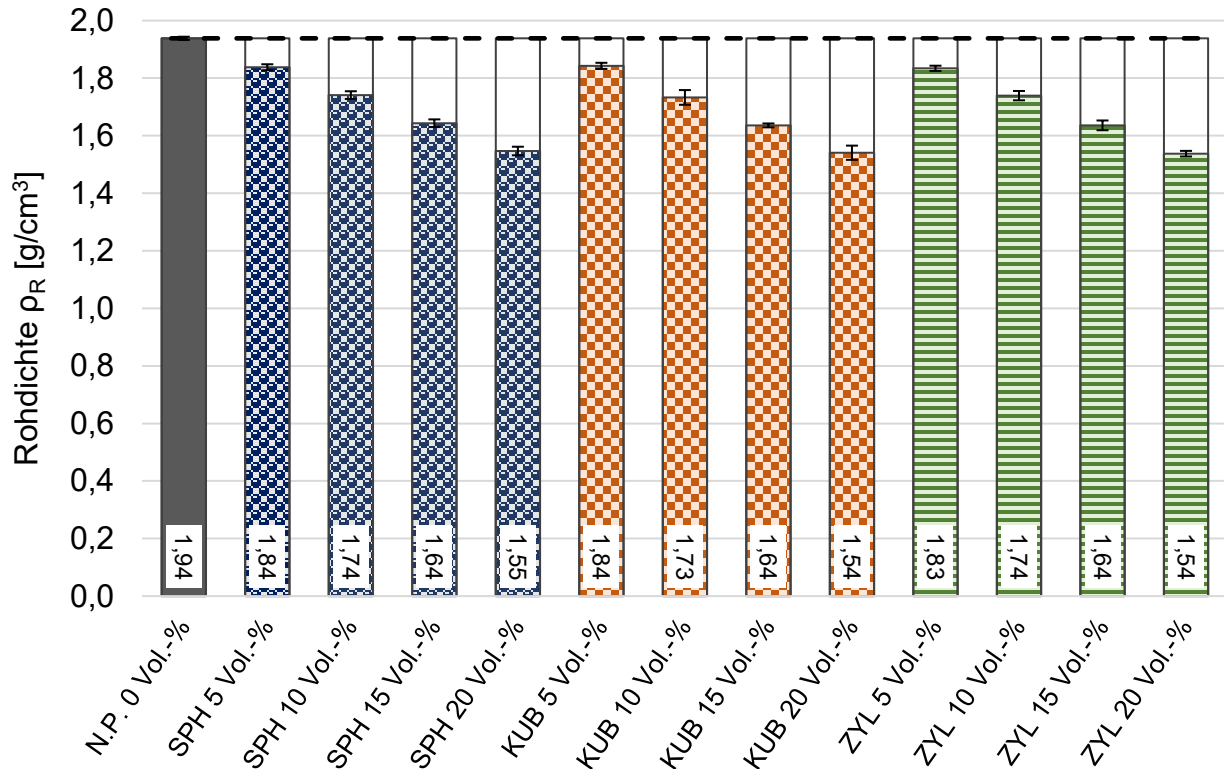


Abbildung 41: Mittelwerte der Rohdichte  $\rho_R$  mit den zugehörigen Standardabweichungen als Fehlerbalken für die nicht porosierte Referenzprobe (N.P.) und die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen Pore (ZYL).

Bei 10 Vol.-% zugegebenem Porosierungsmittel liegen die Mittelwerte der Proben mit sphärischen Poren bei  $1,74 \pm 0,013 \text{ g/cm}^3$ , während die Proben mit kubischen und zylindrischen Poren Rohdichten von  $1,73 \pm 0,026 \text{ g/cm}^3$  und  $1,74 \pm 0,016 \text{ g/cm}^3$  aufweisen. Werden 15 Vol.-% Porosierungsmittel zugegeben so zeigen die Proben mit sphärischen, kubischen und zylindrischen Poren im Mittel eine Rohdichte von  $1,64 \text{ g/cm}^3$  und unterscheiden sich lediglich in ihren Standardabweichungen von 0,013, 0,007 und  $0,017 \text{ g/cm}^3$ . Bei 20 Vol.-% Porosierungsmittel liegen die Proben mit kubischen und zylindrischen Poren mit Mittelwerten von  $1,54 \pm 0,025 \text{ g/cm}^3$  und  $1,54 \pm 0,010 \text{ g/cm}^3$  gleichauf, während die Proben mit sphärischen Poren eine etwas höhere Rohdichte von  $1,55 \pm 0,015 \text{ g/cm}^3$  zeigen. Mit steigender Porosierungsmittel-Zugabe sinken die Rohdichten erwartungsgemäß. Innerhalb einer Messreihe mit einer definierten Zugabemenge an Porosierungsmittel weichen die Mittelwerte der Proben mit



unterschiedlichen Porengeometrien nur geringfügig voneinander ab. Diese Abweichungen liegen bei den vorliegenden Messungen jedoch im Bereich der Streuung, die durch die Standardabweichung beschrieben wird.

Jeder Wert der Reindichte in Tabelle 19 ist ein Mittelwert, der aus den Ergebnissen von je 6 He-Pyknometer-Messungen bestimmt wurde. Zusammen mit den mittleren Werten der Rohdichte aus Abbildung 41 wird der gesamte Porenanteil  $P$  sowie der Anteil der extrinsischen und intrinsischen Poren  $P_e$  und  $P_i$  berechnet. Die extrinsischen Poren werden dabei vom Porosierungsmittel verursacht, während sich die intrinsischen Poren maßgeblich in Abhängigkeit von der Korngröße, der keramischen Masse, der Verdichtung bei der Formgebung und von den Sinterbedingungen bilden. Das Verhältnis von extrinsischen zu intrinsischen Poren in Abhängigkeit des Porenanteils verläuft bei allen Porengeometrien sehr ähnlich. Die nicht porosierte Referenzprobe verfügt aufgrund fehlender Porosierungsmittel-Zugabe über keine extrinsischen Poren, so dass ihre Gesamtporosität gleich der intrinsischen Porosität ist (Abbildung 42). Die mittleren Messwerte der Reindichten liegen für je einen gleichen Anteil an Porosierungsmittel-Zugabe unabhängig von der Porengeometrie sehr nahe zusammen.

Mit zunehmendem Anstieg des extrinsischen Porenanteils durch eine steigende Zugabe von Porosierungsmittel, kommt es zu einer mäßigen Abnahme des Anteils der intrinsischen Poren. Eine mögliche Ursache dafür kann eine geringfügig stärkere Verdichtung des die Porosierungsmittel-Körner umgebenden Matrixmaterials bei der Extrusion sein, die mit steigender Porosierungsmittel-Zugabe einhergeht und auf diese Weise für eine Kontaktflächenvergrößerung zwischen den Körnern der keramischen Rohmasse sorgt. Ein Hinweis darauf sind auch die Werte der Reindichten, die mit ansteigender Porosierungsmittel-Zugabe einen leichten Anstieg zeigen (Tabelle 19 und Abbildung 42).

## Ergebnisse

Tabelle 19: Rohdichten, Reindichten und berechnete Anteile der extrinsischen und intrinsischen Poren sowie die Gesamtporositäten unterschiedlich porosierter Cordierit-Keramik-Proben.

	Porosierungs- mittelzugabe	Rohdichte	Reindichte	Extrinsische Poren	Intrinsische Poren	Porosität gesamt
Porenform	$\xi_{PM}$ [Vol.-%]	$\rho_R$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$P_e$ [Vol.-%]	$P_i$ [Vol.-%]	$P$ [Vol.-%]
Nicht porosiert	0	1,94	2,47	0,00	21,57	21,57
Sphärisch	5	1,84	2,51	5,18	21,57	26,76
	10	1,74	2,55	10,18	21,63	31,80
	15	1,64	2,58	15,22	21,03	36,25
	20	1,55	2,59	20,20	20,07	40,27
Kubisch	5	1,84	2,52	4,93	21,83	26,77
	10	1,73	2,56	10,59	21,72	32,31
	15	1,64	2,59	15,61	21,15	36,76
	20	1,54	2,60	20,51	20,23	40,74
Zylindrisch	5	1,83	2,51	5,37	21,58	26,95
	10	1,74	2,56	10,27	21,78	32,05
	15	1,64	2,59	15,60	21,12	36,72
	20	1,54	2,59	20,68	19,97	40,65

Die Anteile von offenen, d.h. mit VE-Wasser flutbaren, und geschlossenen Poren wurden aus den Werten der Unterwasserwägung nach Archimedes (DIN EN 1936) berechnet.<sup>129</sup> Daher weichen die Werte der Rohdichte und der Gesamtporosität in Tabelle 20 leicht von den entsprechenden Werten in Tabelle 19 ab. Dazu dienten pro Porosierungsgrad und Porengeometrie je 8 Probekörper und 14 Probekörper für die nicht porosierte Referenzprobe. Für die Dichte des eingesetzten VE-Wassers wurde der Literaturwert 0,99841 g/cm<sup>3</sup> aus dem VDI-Wärmeatlas bei der gemessenen Temperatur von 19 °C und bei atmosphärischem Druck verwendet.<sup>56</sup>

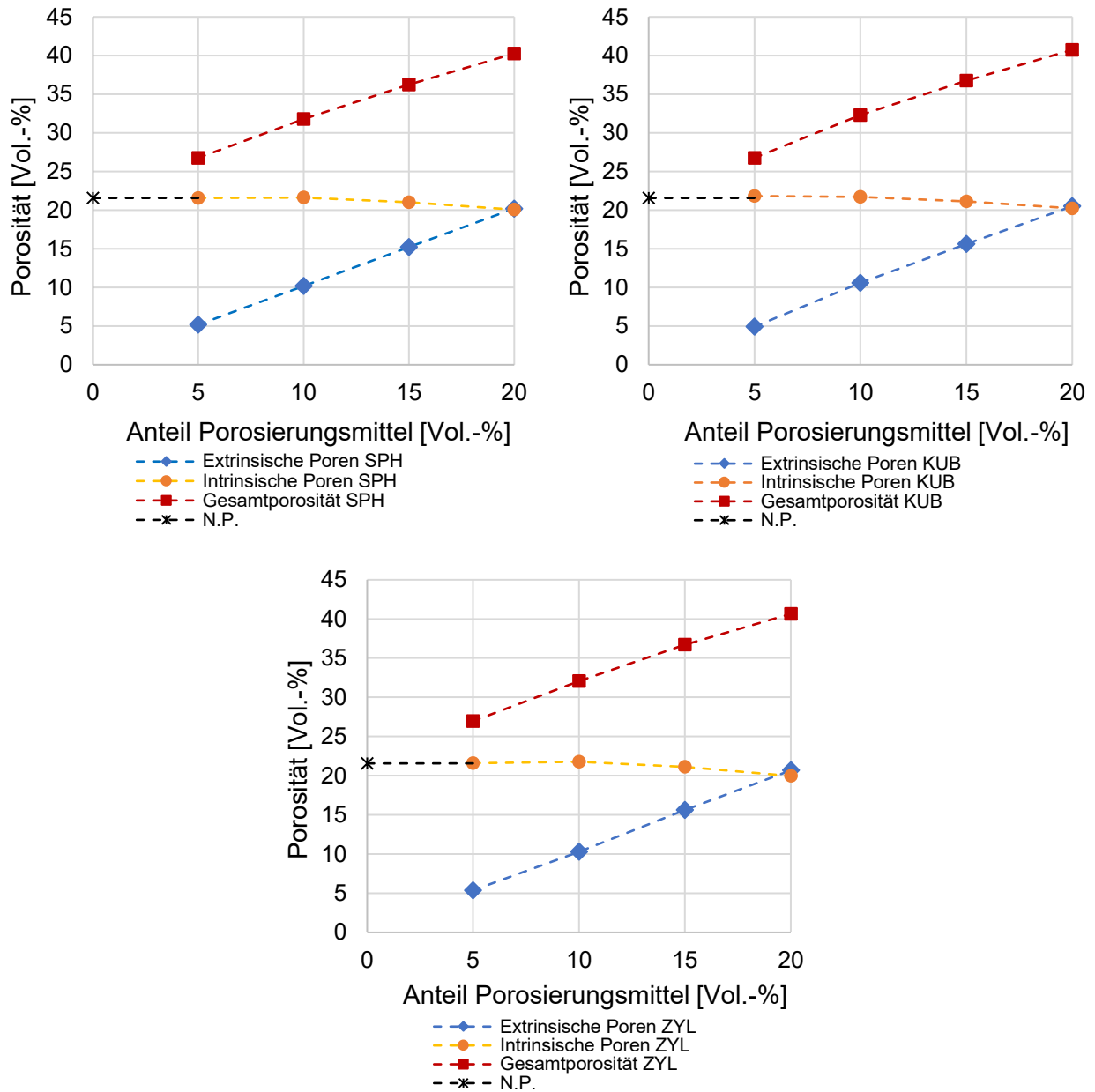


Abbildung 42: Anteile der extrinsischen und intrinsischen Poren sowie der Gesamtporosität in Abhängigkeit von der Porosierungsmittel-Zugabe für Cordierit-Proben mit sphärischen (o.l.), kubischen (o.r.) und zylindrischen Poren (u). In den Graphiken ist jeweils die nicht porosierte Probe (N.P.) eingezeichnet.

Mit zunehmendem Porosierungsgrad steigt für alle Porengeometrien der Anteil an geschlossenen und offenen Poren, wobei sich der Anteil geschlossener Poren deutlicher als der Anteil offener Poren erhöht (Abbildung 43 und Tabelle 20).

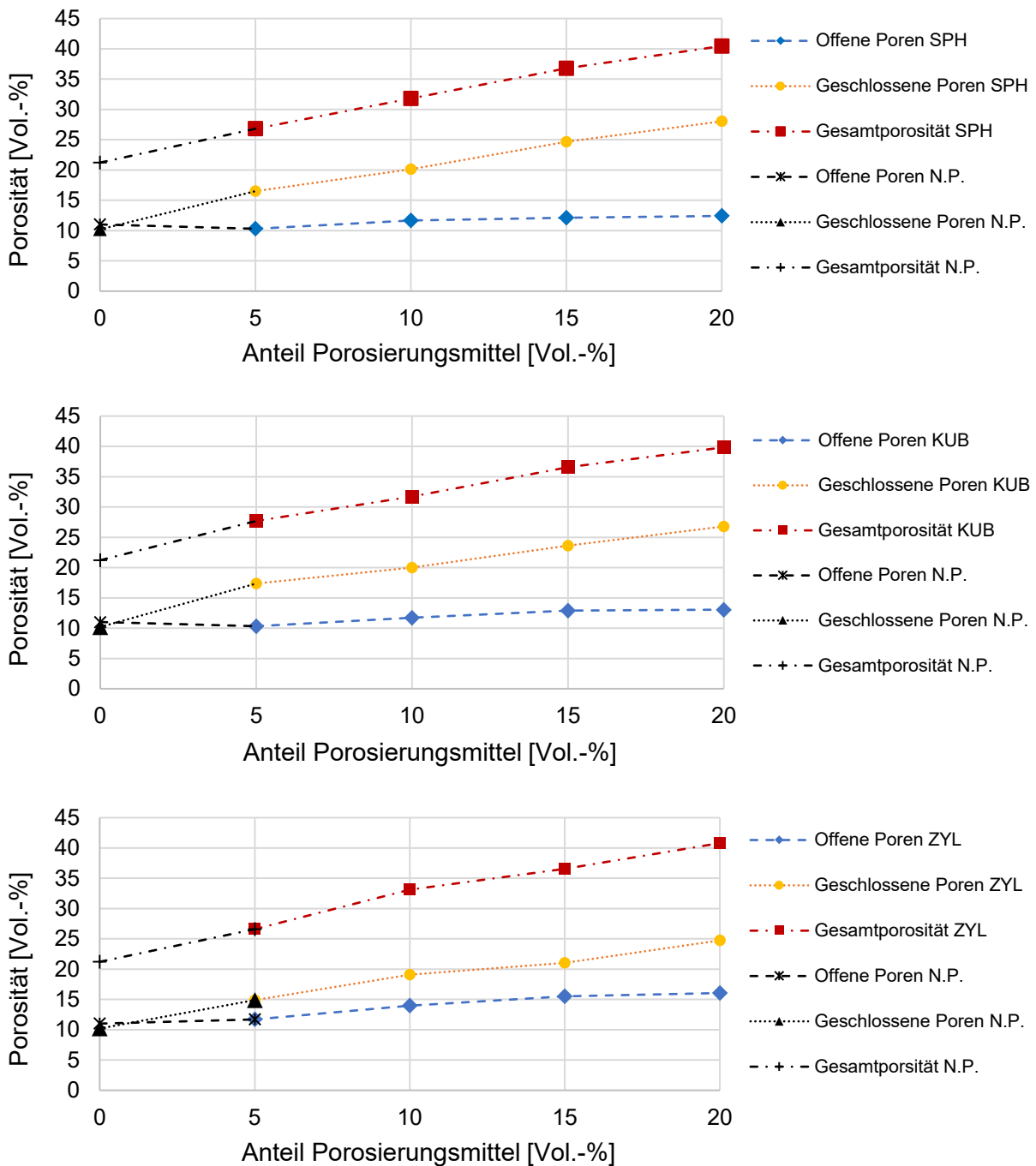


Abbildung 43: Anteile der offenen und geschlossenen Poren sowie der Gesamtporenanteil für Cordierit-Proben mit sphärischen (o), kubischen (n) und zylindrischen (u) Porengeometrien im Vergleich mit der nicht porosierten Referenzprobe (N.P.)

## Ergebnisse

Das Verhältnis von geschlossenen zu offenen Poren liegt bei der unporisierten Referenzprobe bei ca. 1:1 (Abbildung 43 und Tabelle 20). Bei Betrachtung der offenen und geschlossenen Porenanteile zeigt sich, dass die Proben mit zylinderförmigen Poren einen deutlich höheren Anteil an offener Porosität aufweisen als die Proben mit kubischen und sphärischen Poren. Der Anteil geschlossener Poren ist umgekehrt bei den Proben mit zylindrischen Poren am geringsten. Eine mögliche Ursache besteht darin, dass sich die nicht kugelsymmetrische Geometrie eines Zylinders mit seiner größten lateralen Ausdehnung in eine Richtung besser zur Strukturbildung und damit zum Formen von Perkulationspfaden eignet, die offene mit geschlossenen Porenräumen verbinden, als bei kugelsymmetrischen und näherungsweise kugelsymmetrischen Geometrien.

Tabelle 20: Rohdichten, Reindichten und berechnete Porositäten für offene und geschlossene Poren sowie Gesamtporenanteile für alle Cordierit-Probetypen.<sup>129</sup>

	Porosierungs- mittelzugabe	Rohdichte (Archimedes)	Reindichte	Offene Poren	Geschlossene Poren	Porosität gesamt
Porenform	$\xi_{PM}$ [Vol.-%]	$\rho_R$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$P_o$ [Vol.-%]	$P_g$ [Vol.-%]	$P$ [Vol.-%]
Nicht porosiert	0	1,95	2,47	11,01	10,20	21,22
Sphärisch	5	1,84	2,51	10,30	16,51	26,81
	10	1,74	2,55	11,66	20,13	31,79
	15	1,63	2,58	12,13	24,64	36,77
	20	1,54	2,59	12,42	28,04	40,46
Kubisch	5	1,82	2,52	10,32	17,36	27,69
	10	1,75	2,56	11,71	20,01	31,73
	15	1,64	2,59	12,92	23,63	36,55
	20	1,56	2,60	13,05	26,79	39,84
Zylindrisch	5	1,84	2,51	11,70	14,89	26,60
	10	1,71	2,56	13,99	19,11	33,10
	15	1,64	2,59	15,53	21,03	36,56
	20	1,53	2,59	16,06	24,74	40,80

Die Anteile geschlossener und offener Poren liegen für Proben mit sphärischen und kubischen Poren nahe zusammen. Die Proben mit kubischen Poren weisen geringfügig mehr offene und weniger geschlossene Poren aus als die Proben mit sphärischen Poren.

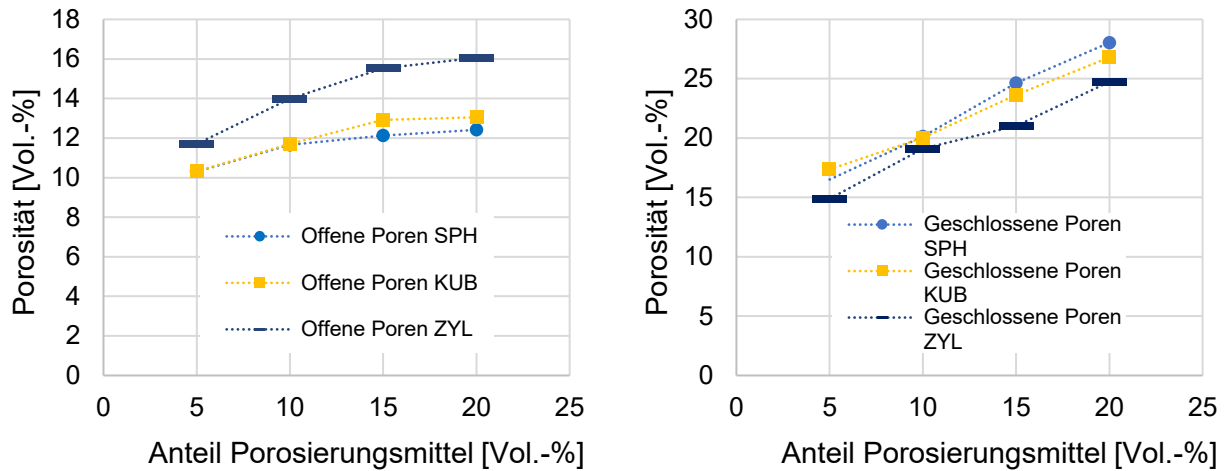


Abbildung 44: Anteile der offenen (l) und geschlossenen (r) Porosität in Abhängigkeit des Porosierungsgrades für Cordierit-Proben mit sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen (ZYL) Porengeometrien.

## 5.6 Volumengewichtete Porengrößenverteilung

Sowohl das arithmetische Mittel der Volumina der Einzelporen als auch der x50-Wert aus der Volumenverteilung liegen bei allen Proben im angestrebten Bereich von  $3,375 \text{ mm}^3 \pm 0,250 \text{ mm}^3$ , wobei der Betrag  $\pm 0,250 \text{ mm}^3$  die angestrebte Genauigkeit beim Treffen des Mittelwerts bzw. des Medians repräsentiert (Tabelle 21 und Abbildung 45). Die arithmetischen Mittel der Einzelporenvolumina  $V_{sp,m}$ , bestimmt aus jeweils 100 Poren, zeigen im Vergleich bei den Proben mit zylindrischen Poren für die Porosierungsmittel-Zugaben von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% stets die größten Werte mit  $3,38 \text{ mm}^3$ ,  $3,39 \text{ mm}^3$ ,  $3,40 \text{ mm}^3$  und  $3,36 \text{ mm}^3$  gefolgt von den Proben mit kubischen Poren mit Mittelwerten von  $3,37 \text{ mm}^3$ ,  $3,35 \text{ mm}^3$ ,  $3,32 \text{ mm}^3$  und  $3,35 \text{ mm}^3$  und den Proben mit sphärischen Poren mit Mittelwerten von  $3,08 \text{ mm}^3$ ,  $3,23 \text{ mm}^3$ ,  $3,15 \text{ mm}^3$  und  $3,16 \text{ mm}^3$ . Die schmalsten Streuungen gemäß der Standardabweichung weisen die zylindrischen Porenvolumina mit Werten zwischen  $0,15 \text{ mm}^3$  und  $0,37 \text{ mm}^3$  auf, gefolgt von den kubischen Porenvolumina, die im Bereich zwischen  $0,46 \text{ mm}^3$  und  $0,69 \text{ mm}^3$  liegen und den sphärischen Porenvolumina mit Standardabweichungen im Bereich von  $0,69 \text{ mm}^3$  bis  $1,03 \text{ mm}^3$ .

## Ergebnisse

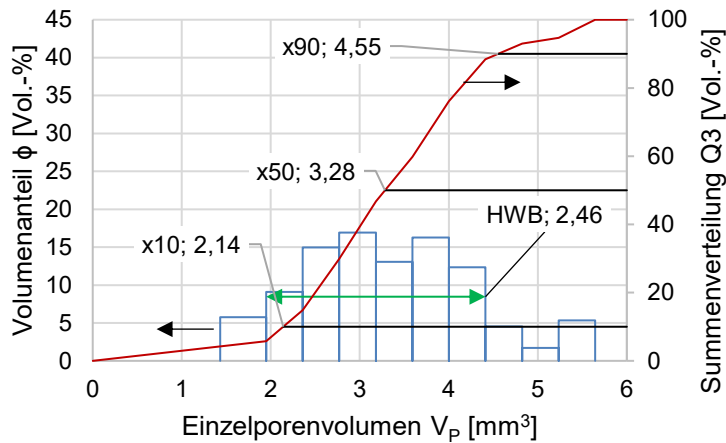
Tabelle 21: Die arithmetischen Mittel  $V_{sp,m}$  der Einzelporenvolumina mit den dazugehörigen Standardabweichungen  $s$  sowie die  $x_{10}$ -,  $x_{50}$ - und  $x_{90}$ -Werte aus der volumengewichteten Porengrößenverteilung für die Porosierungsmittel-Zugaben (PM-Zugabe) von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sowie der Korngrößenverteilung der zugehörigen Porosierungsmittel.

PM-Zugabe [Vol.-%]	Porenform	Sphärisch	Kubisch	Zylindrisch	Sphärisch	Kubisch	Zylindrisch
5	Kenngroße	Volumengewichtete Porengrößenverteilung			Volumengewichtete Korngrößenverteilung		
	$x_{10}$ [mm <sup>3</sup> ]	2,14	2,58	2,92	12,07	2,99	3,14
	<b><math>x_{50}</math> [mm<sup>3</sup>]</b>	<b>3,28</b>	<b>3,47</b>	<b>3,41</b>	<b>15,46</b>	<b>3,35</b>	<b>3,34</b>
	$x_{90}$ [mm <sup>3</sup> ]	4,55	4,30	3,84	18,78	3,82	3,64
	Arithmetisches Mittel						
	$V_{sp,m}$ [mm <sup>3</sup> ]	<b>3,08</b>	<b>3,37</b>	<b>3,38</b>	<b>14,84</b>	<b>3,36</b>	<b>3,35</b>
	STABW $s$ [mm <sup>3</sup> ]	0,97	0,69	0,36	2,63	0,32	0,22
10	Kenngroße	Volumengewichtete Porengrößenverteilung			Volumengewichtete Korngrößenverteilung		
	$x_{10}$ [mm <sup>3</sup> ]	2,31	2,67	3,00	12,07	2,99	3,14
	<b><math>x_{50}</math> [mm<sup>3</sup>]</b>	<b>3,46</b>	<b>3,48</b>	<b>3,44</b>	<b>15,46</b>	<b>3,35</b>	<b>3,34</b>
	$x_{90}$ [mm <sup>3</sup> ]	5,24	4,29	3,86	18,78	3,82	3,64
	Arithmetisches Mittel						
	$V_{sp,m}$ [mm <sup>3</sup> ]	<b>3,23</b>	<b>3,35</b>	<b>3,39</b>	<b>14,84</b>	<b>3,36</b>	<b>3,35</b>
	STABW $s$ [mm <sup>3</sup> ]	1,03	0,69	0,34	2,63	0,32	0,22
15	Kenngroße	Volumengewichtete Porengrößenverteilung			Volumengewichtete Korngrößenverteilung		
	$x_{10}$ [mm <sup>3</sup> ]	2,18	2,65	2,91	12,07	2,99	3,14
	<b><math>x_{50}</math> [mm<sup>3</sup>]</b>	<b>3,36</b>	<b>3,37</b>	<b>3,46</b>	<b>15,46</b>	<b>3,35</b>	<b>3,34</b>
	$x_{90}$ [mm <sup>3</sup> ]	4,80	4,31	3,95	18,78	3,82	3,64
	Arithmetisches Mittel						
	$V_{sp,m}$ [mm <sup>3</sup> ]	<b>3,15</b>	<b>3,32</b>	<b>3,40</b>	<b>14,84</b>	<b>3,36</b>	<b>3,35</b>
	STABW $s$ [mm <sup>3</sup> ]	0,99	0,64	0,37	2,63	0,32	0,22
20	Kenngroße	Volumengewichtete Porengrößenverteilung			Volumengewichtete Korngrößenverteilung		
	$x_{10}$ [mm <sup>3</sup> ]	2,44	2,82	3,21	12,07	2,99	3,14
	<b><math>x_{50}</math> [mm<sup>3</sup>]</b>	<b>3,35</b>	<b>3,42</b>	<b>3,38</b>	<b>15,46</b>	<b>3,35</b>	<b>3,34</b>
	$x_{90}$ [mm <sup>3</sup> ]	4,23	4,06	3,52	18,78	3,82	3,64
	Arithmetisches Mittel						
	$V_{sp,m}$ [mm <sup>3</sup> ]	<b>3,16</b>	<b>3,35</b>	<b>3,36</b>	<b>14,84</b>	<b>3,36</b>	<b>3,35</b>
	STABW $s$ [mm <sup>3</sup> ]	0,69	0,46	0,15	2,63	0,32	0,22

Da sich der Median robuster gegenüber Ausreißern verhält, was bei volumengewichteten Größen eine deutliche Relevanz haben kann, sind die  $x_{50}$ -Werte bei der Charakterisierung zu bevorzugen. Der Abgleich mit dem arithmetischen Mittel dient jedoch dazu, ebensolche Ausreißer identifizieren zu können. Die beste Übereinstimmung von arithmetischen Mittelwerten und  $x_{50}$ -Werten zeigt sich bei den Proben mit zylindrischen Poren, gefolgt von den Proben mit kubischen Poren. Bei den Proben mit sphärischen Poren weist das arithmetische Mittel für alle Porosierungsmittel-Zugaben die größten Abweichungen vom  $x_{50}$ -Wert auf. Da bei der Berechnung der Einzelporenvolumina der sphärischen Poren der Porendurchmesser in der 3. Ordnung in die Gleichung eingeht, haben Ausreißer und Abweichungen einen besonders großen Einfluss, was zu dieser Diskrepanz führen kann. Das zeigt sich auch an der etwas größeren Streuung um den Mittelwert gemäß der Standardabweichung. Die Übertragbarkeit der Korngrößenvolumina auf die resultierenden Porengrößenvolumina funktioniert für die kubischen und zylindrischen Geometrien sehr gut (Tabelle 21). Die  $x_{50}$ -Werte der Porenvolumina zeigen im Vergleich zu den Korngrößenvolumina der Porosierungsmittel für die Proben mit kubischen Poren und zylindrischen Poren eine adäquate Übereinstimmung. Unter Berücksichtigung einer Volumenschrumpfung mit einem Faktor von 4-5 ist auch das Erreichen der erwünschten Porenvolumina für die Proben mit sphärischen Poren mit guter Genauigkeit möglich.

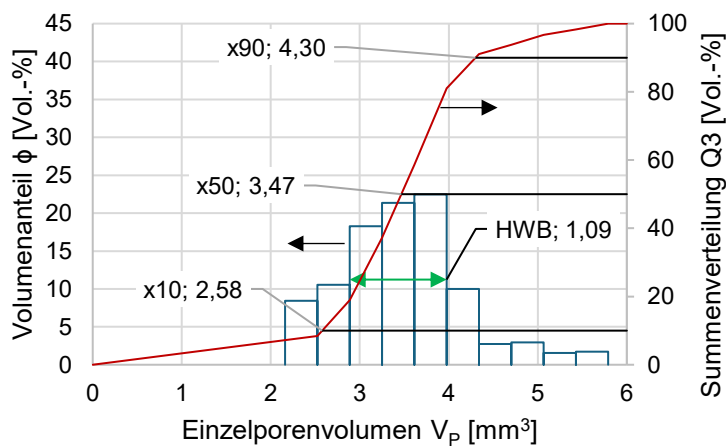
Die Halbwertsbreiten (Verteilungsbreite bei  $y_{\max}/2$ ) HWB der volumengewichteten Porengrößenverteilungen, die zur Charakterisierung der Verteilungsbreite dienen, weisen gewisse Unterschiede auf. Die schmalsten Halbwertsbreiten zeigen die Verteilungen der zylinderförmigen Poren mit Werten im Bereich von  $0,20 \text{ mm}^3$  bis  $0,64 \text{ mm}^3$ , gefolgt von den kubischen Poren, die Halbwertsbreiten im Bereich von  $0,72 \text{ mm}^3$  bis  $1,37 \text{ mm}^3$  aufweisen. Die höchsten Halbwertsbreiten ergeben die Verteilungen der sphärischen Poren mit Werten im Bereich von  $1,54 \text{ mm}^3$  bis  $2,54 \text{ mm}^3$ .





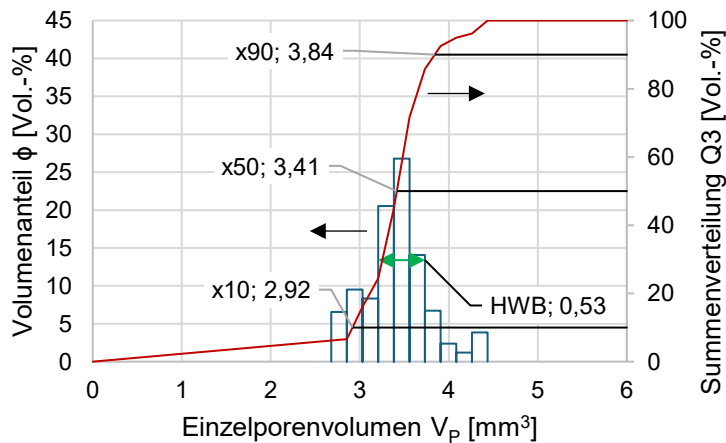
## Sphärische Poren

- $x_{10} = 2,14 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,28 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 4,55 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 2,46 \text{ mm}^3$



## Kubische Poren

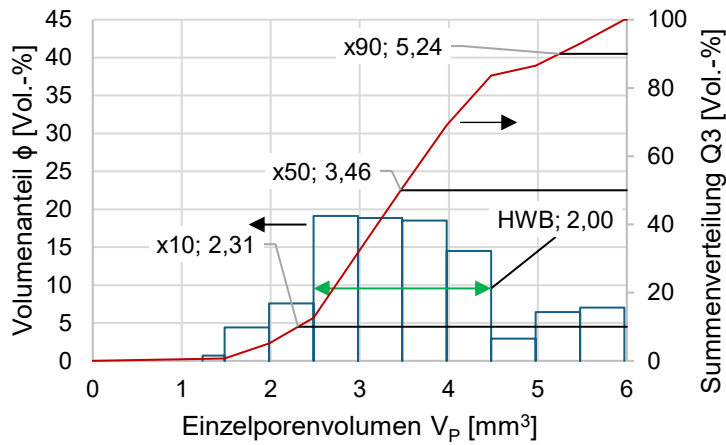
- $x_{10} = 2,58 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,47 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 4,30 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 1,09 \text{ mm}^3$



## Zylindrische Poren

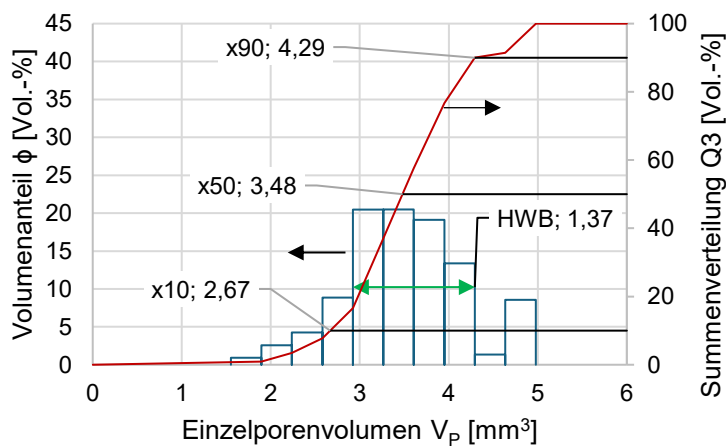
- $x_{10} = 2,92 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,41 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 3,84 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 0,53 \text{ mm}^3$

Abbildung 45: Volumengewichtete Porengrößenverteilung für sphärische (o), kubische (m) und zylindrische Poren (u) bestehend aus dem Volumenanteil der Einzelporen am Gesamtvolumen  $\phi$  und der Summenverteilung Q3 sowie die für jede Porenform ermittelten  $x_{10}$ -,  $x_{50}$ - und  $x_{90}$ -Werte für Proben mit 5 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.



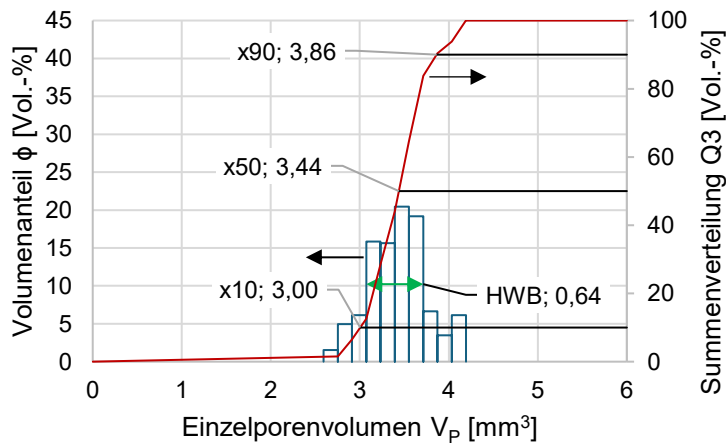
## Sphärische Poren

- $x_{10} = 2,31 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,46 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 5,24 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 2,00 \text{ mm}^3$



## Kubische Poren

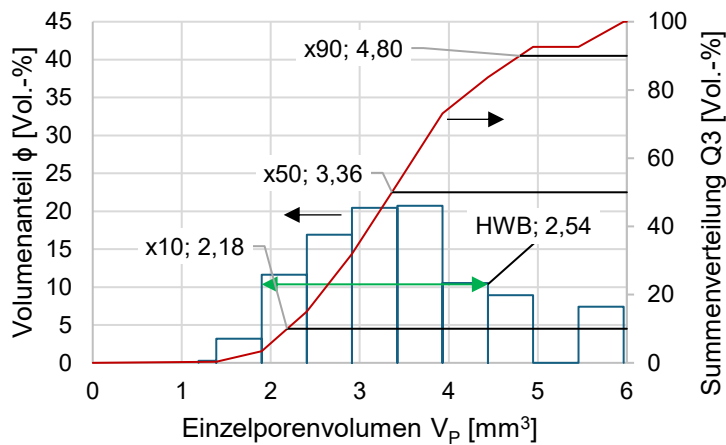
- $x_{10} = 2,67 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,48 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 4,29 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 1,37 \text{ mm}^3$



## Zylindrische Poren

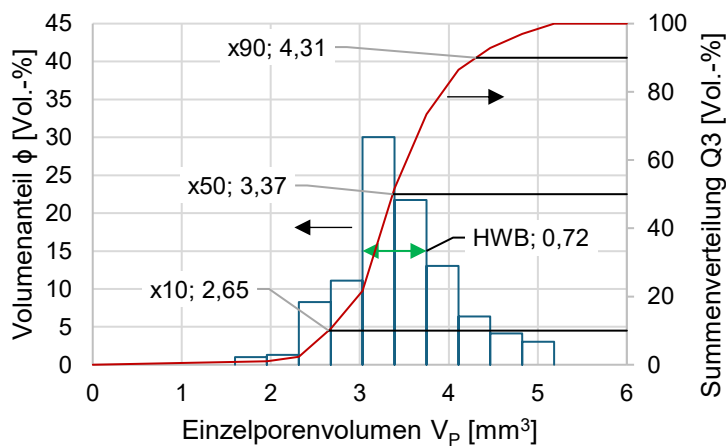
- $x_{10} = 3,00 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,44 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 3,86 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 0,64 \text{ mm}^3$

Abbildung 46: Volumengewichtete Porengrößenverteilung für sphärische (o), kubische (m) und zylindrische Poren (u) bestehend aus dem Volumenanteil der Einzelporen am Gesamtvolumen  $\phi$  und der Summenverteilung  $Q3$  sowie die für jede Porenform ermittelten  $x_{10}$ -,  $x_{50}$ - und  $x_{90}$ -Werte für Proben mit 10 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.



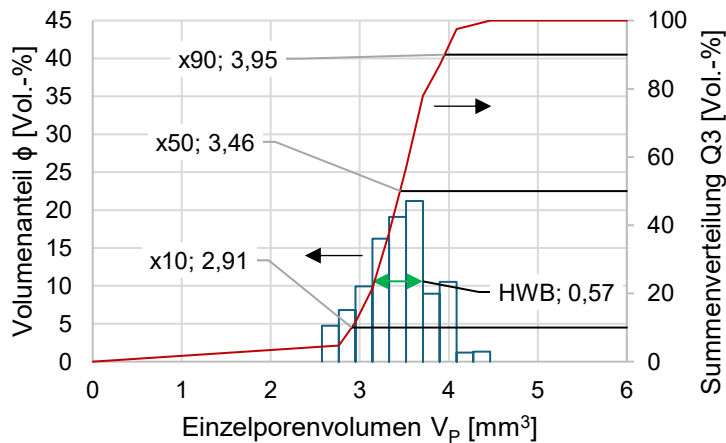
## Sphärische Poren

- $x_{10} = 2,18 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,36 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 4,80 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 2,54 \text{ mm}^3$



## Kubische Poren

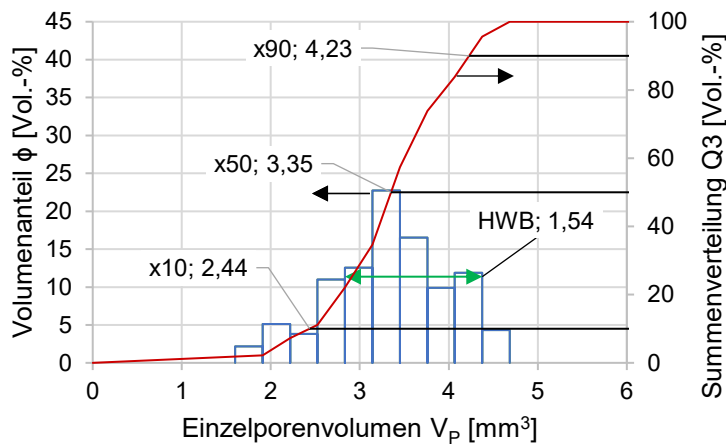
- $x_{10} = 2,65 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,37 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 4,31 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 0,72 \text{ mm}^3$



## Zylindrische Poren

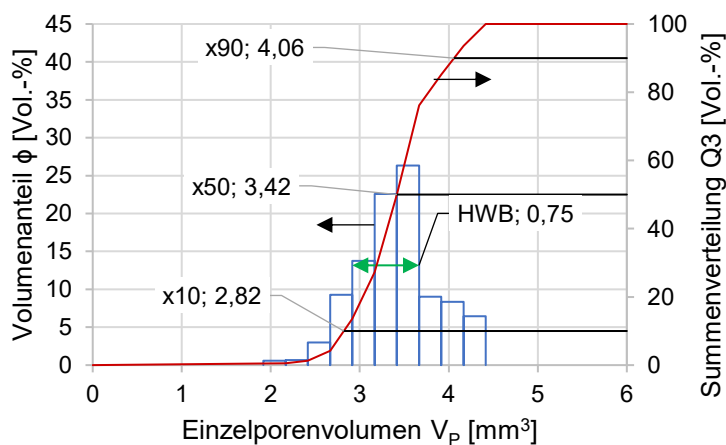
- $x_{10} = 2,91 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,46 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 3,95 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 0,57 \text{ mm}^3$

Abbildung 47: Volumengewichtete Porengrößenverteilung für sphärische (o), kubische (m) und zylindrische Poren (u) bestehend aus dem Volumenanteil der Einzelporen am Gesamtvolumen  $\phi$  und der Summenverteilung  $Q3$  sowie die für jede Porenform ermittelten  $x_{10}$ -,  $x_{50}$ - und  $x_{90}$ -Werte für Proben mit 15 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.



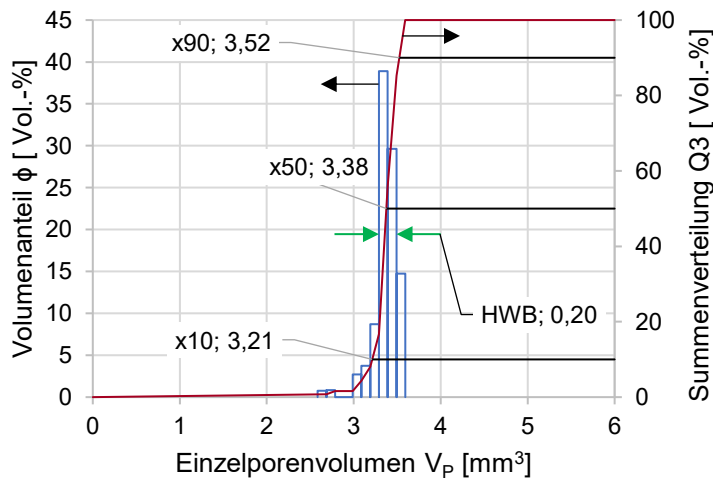
## Sphärische Poren

- $x_{10} = 2,44 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,35 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 4,23 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 1,54 \text{ mm}^3$



## Kubische Poren

- $x_{10} = 2,82 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,42 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 4,06 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 0,75 \text{ mm}^3$



## Zylindrische Poren

- $x_{10} = 3,21 \text{ mm}^3$
- $x_{50} = 3,38 \text{ mm}^3$
- $x_{90} = 3,52 \text{ mm}^3$
- $\text{HWB} = 0,20 \text{ mm}^3$

Abbildung 48: Volumengewichtete Porengrößenverteilung für sphärische (o), kubische (m) und zylindrische Poren (u) bestehend aus dem Volumenanteil der Einzelporen am Gesamtvolumen  $\phi$  und der Summenverteilung  $Q3$  sowie die für jede Porenform ermittelten  $x_{10}$ -,  $x_{50}$ - und  $x_{90}$ -Werte für Proben mit 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

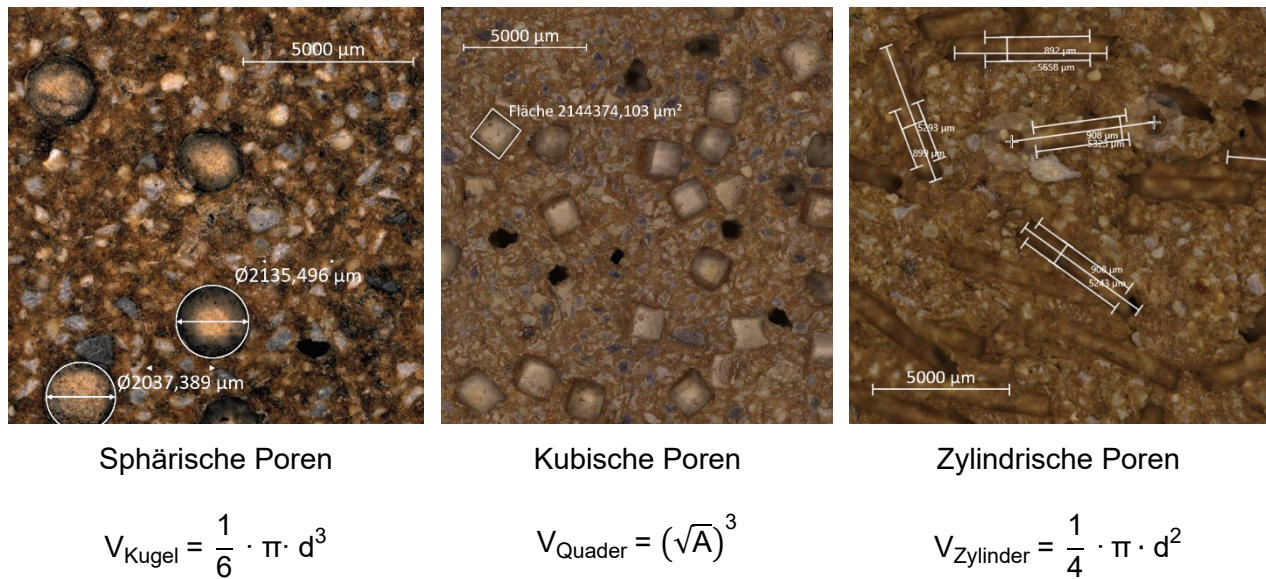


Abbildung 49: Bestimmung der relevanten Maße zur Berechnung der Volumina der einzelnen Porenvolumina per Lichtmikroskop für sphärische (l), kubische (m) und zylindrische (r) Poren in Cordierit-Keramik.

Die Einzelporenvolumina der sphärischen Poren fallen bei der Betrachtung des arithmetischen Mittels  $V_{\text{sp,m}}$  kleiner aus als bei den anderen beiden Porenformen. Eine mögliche Ursache hierfür ist die Berechnung der Einzelporenvolumina anhand von Abmessungen bei Schliffbildern im Lichtmikroskop (Abbildung 49). Ideal sphärische Poren werden bei dieser Methode tendenziell kleiner gemessen, da zur korrekten Bestimmung bei jeder einzelnen Pore exakt bis zum maximalen Durchmesser bzw. dem wahren Durchmesser geschliffen werden müsste. Jede Abweichung des Schliffs, ob zu viel oder zu wenig geschliffen, führt zu einem kleineren Durchmesser. Anhand der Helligkeit bzw. des Schattenwurfs innerhalb der unter dem Mikroskop betrachteten Halbkugel, ist jedoch ein grobes Aussortieren ungeeigneter Schliffbilder möglich und somit in gewissen Grenzen eine Vermeidung deutlicher Fehler realisierbar.

## 5.7 Scherbenwärmeleitfähigkeit

Das arithmetische Mittel der Scherbenwärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10,\text{tr}}$  sowie die zugehörigen Standardabweichungen werden aus jeweils 3 Einzelmessungen bestimmt (Tabelle 22).

Die Messwerte unterscheiden sich innerhalb der Porosierungsgrades deutlich je nach Porengeometrie. Die Proben mit sphärischen Poren zeigen bei allen Porosierungsmittel-

## Ergebnisse

Zugaben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% stets die höchsten Scherbenwärmeleitfähigkeiten, nämlich 0,627, 0,587, 0,553 und 0,527 W/(mK), gefolgt von den Proben mit kubischen Poren mit Scherbenwärmeleitfähigkeiten von 0,587, 0,560, 0,500 und 0,397 W/(mK). Die Proben mit zylindrischen Proben zeigen bei Porosierungsmittel-Zugaben von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% jeweils die niedrigsten Scherbenwärmeleitfähigkeiten mit 0,550, 0,450, 0,433 und 0,373 W/(mK). Jede porosierte Probe zeigt im Vergleich mit der unporosierten Referenzprobe eine geringere Scherbenwärmeleitfähigkeit.

Tabelle 22: Mittelwerte der Scherbenwärmeleitfähigkeiten sowie Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Porosierungsmittel-Zugabe und Vergleich mit der nicht porosierten Referenzprobe.

Scherbenwärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr.}$ [W/(mK)]								
Porenform	Sphärisch		Kubisch		Zylindrisch		Nicht porosiert	
Porosierungs- mittelanteil	Mittelwert $\lambda_{10, tr.}$	STABW s	Mittelwert $\lambda_{10, tr.}$	STABW s	Mittelwert $\lambda_{10, tr.}$	STABW s	Mittelwert $\lambda_{10, tr.}$	STABW s
5 Vol.-%	<b>0,627</b>	0,012	<b>0,587</b>	0,006	<b>0,550</b>	0,010	<b>0,657</b>	0,006
10 Vol.-%	<b>0,587</b>	0,025	<b>0,560</b>	0,010	<b>0,450</b>	0,026		
15 Vol.-%	<b>0,553</b>	0,006	<b>0,500</b>	0,010	<b>0,433</b>	0,015		
20 Vol.-%	<b>0,527</b>	0,012	<b>0,397</b>	0,021	<b>0,373</b>	0,038		

Alle porosierten Proben weisen geringere Scherbenwärmeleitfähigkeiten auf als die nicht porosierte Nullprobe. Das Ausmaß der Absenkung der Scherbenwärmeleitfähigkeiten unterscheidet sich innerhalb der Porosierungsstufen 5, 10, 15 und 20 Vol.-% je nach Porengeometrie deutlich. Die Probekörper mit zylindrischen Poren zeigen bei allen Porosierungsmittel-Zugaben von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% mit 42,8, 34,2, 31,3 und 16,3 % stets die größte prozentuale Absenkung der Scherbenwärmeleitfähigkeiten, gefolgt von den Proben mit kubischen Poren mit 39,8, 23,9, 14,7 und 10,5 % Absenkung. Die Probekörper mit sphärischen Poren zeigen mit den Werten 19,7, 15,7, 10,7 und 4,5 % die vergleichsweise niedrigste prozentuale Absenkung (Abbildung 50).

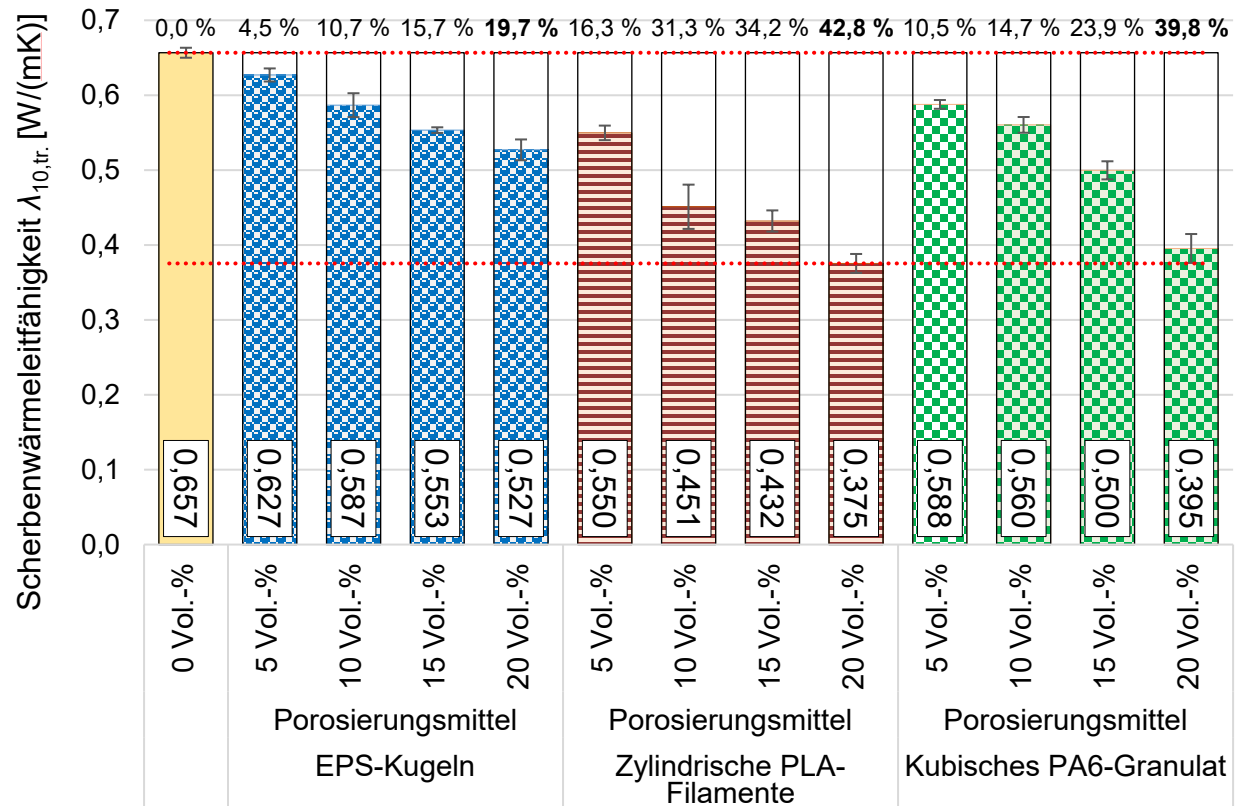


Abbildung 50: Vergleich der mittleren Scherbenwärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, tr}$  mit zugehörigen Standardabweichungen sowie die jeweilige prozentuale Absenkung der Scherbenwärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, tr}$  in Abhängigkeit von der Porosierungsmittel-Zugabe

Die graphische Auftragung der mittleren Scherbenwärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, tr}$  in Abhängigkeit der korrelierenden mittleren Rohdichten  $\rho_b$  der Probekörper zeigt eine Abweichung der Scherbenwärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, tr}$  zwischen den Proben mit unterschiedlicher Porosierung bei näherungsweise gleichen Rohdichten (Abbildung 51). Die dargestellten Differenzen zwischen den Scherbenwärmeleitfähigkeiten bei stets gleicher Porosierungsmittel-Zugabe zeigen sehr deutlich, dass die Form der Porengeometrie einen erheblichen Einfluss auf die Scherbenwärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, tr}$  ausübt. Bei allen Messreihen steigt mit zunehmender Rohdichte erwartungsgemäß auch die Scherbenwärmeleitfähigkeit an. Auffällig ist in diesem Zusammenhang, dass nur bei den Proben mit sphärischen Poren ein weitestgehend linearer Zusammenhang zwischen den Scherbenwärmeleitfähigkeiten und der Porosierungsmittel-Zugabe besteht.

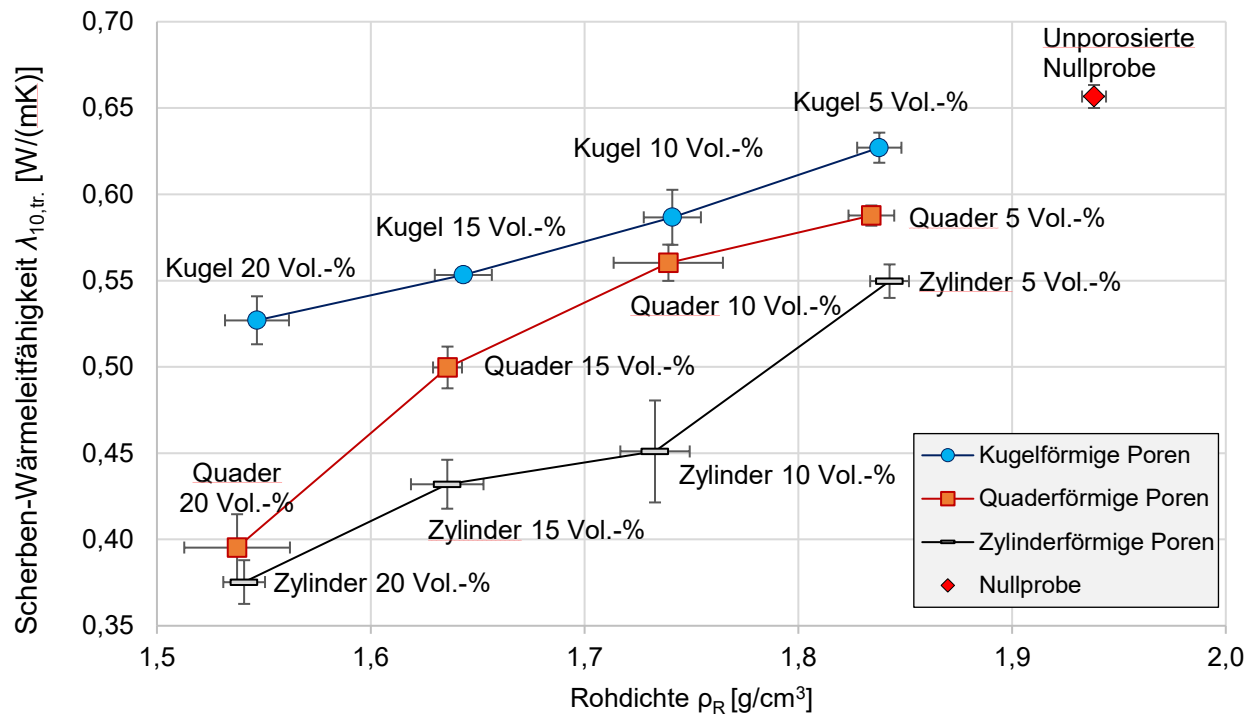


Abbildung 51: Mittlere Scherbenwärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, tr}$  aller Cordierit-Proben in Abhängigkeit von den korrelierenden mittleren Rohdichten  $\rho_R$  im Vergleich mit der unporosierten Nullprobe.

Da bei den Messungen der Scherbenwärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, tr}$  nur der Wärmestrom entlang der z-Achse betrachtet wird, kommt als ein möglicher Einfluss die Porenausrichtung der Zylinderporen für den abweichenden graphischen Verlauf in Frage. Die Diskrepanzen im Bereich der Scherbenwärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, tr}$  lassen sich nicht allein durch die geringfügigen Schwankungen in der Dichte erklären, so dass ein Einfluss der Porengeometrie auf diese thermische Werkstoffeigenschaft sehr wahrscheinlich ist.

## 5.8 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Die nachfolgend aufgetragenen, gemittelten Graphen des thermischen Ausdehnungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperatur im Bereich von 25 °C bis 800 °C resultieren stets aus zwei Dilatometer-Messungen je Probetyp für die nicht porosierten Referenzproben und die porosierten Proben, die mit 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe hergestellt wurden.



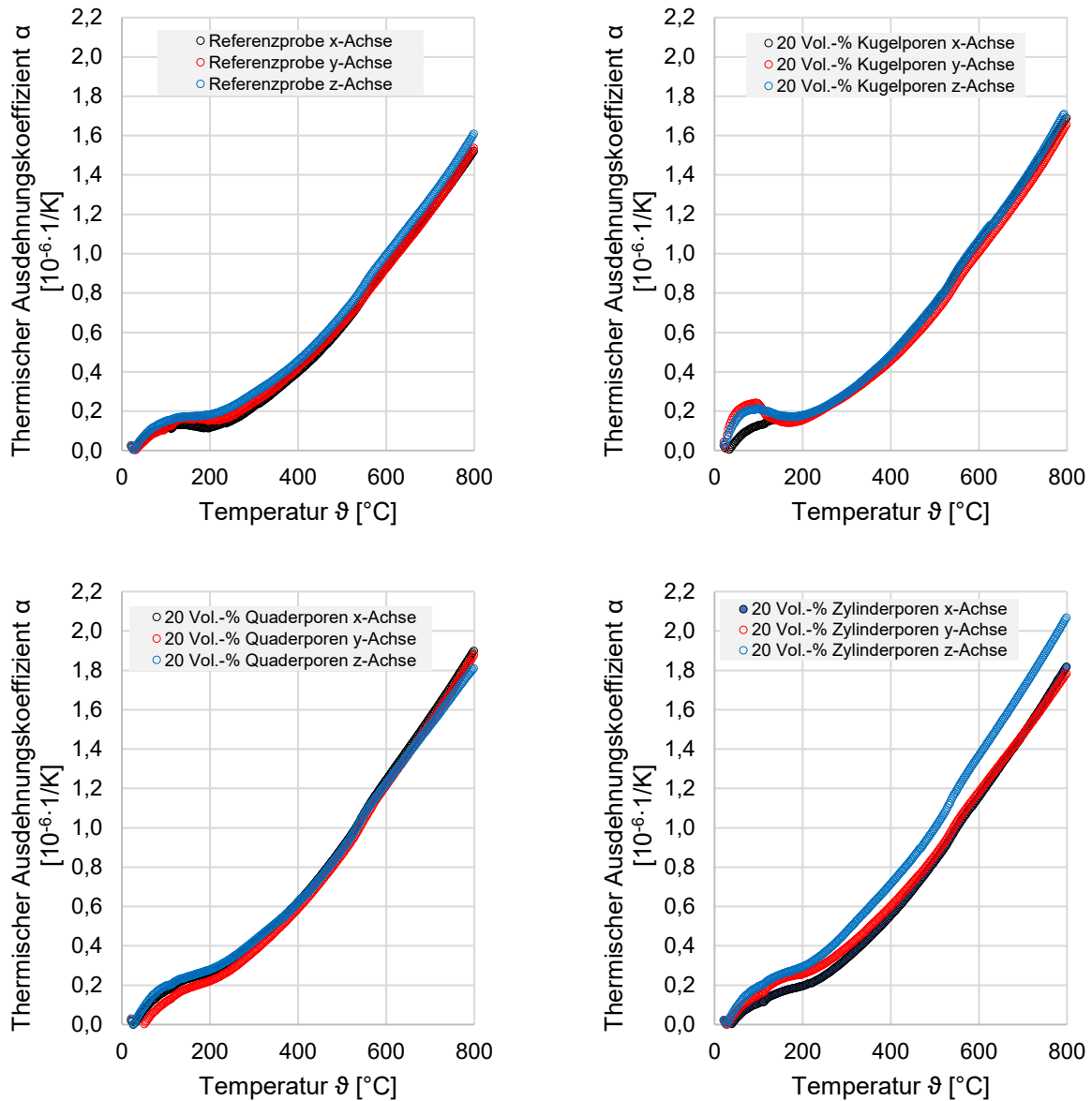


Abbildung 52: Mittlere thermische Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  der unporierten Cordierit-Referenzprobe (o.l.) sowie der Proben mit sphärischen (o.r.), kubischen (u.r.) und zylindrischen Poren (u.l.) entlang der x-, y- und z-Achse, in Abhängigkeit von der Temperatur  $\theta$ .

Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  der unporierten Cordierit-Referenzproben sowie der Proben mit sphärischen, kubischen und zylinderförmigen Poren werden für alle drei Achsrichtungen x, y und z gemessen (Abbildung 52).

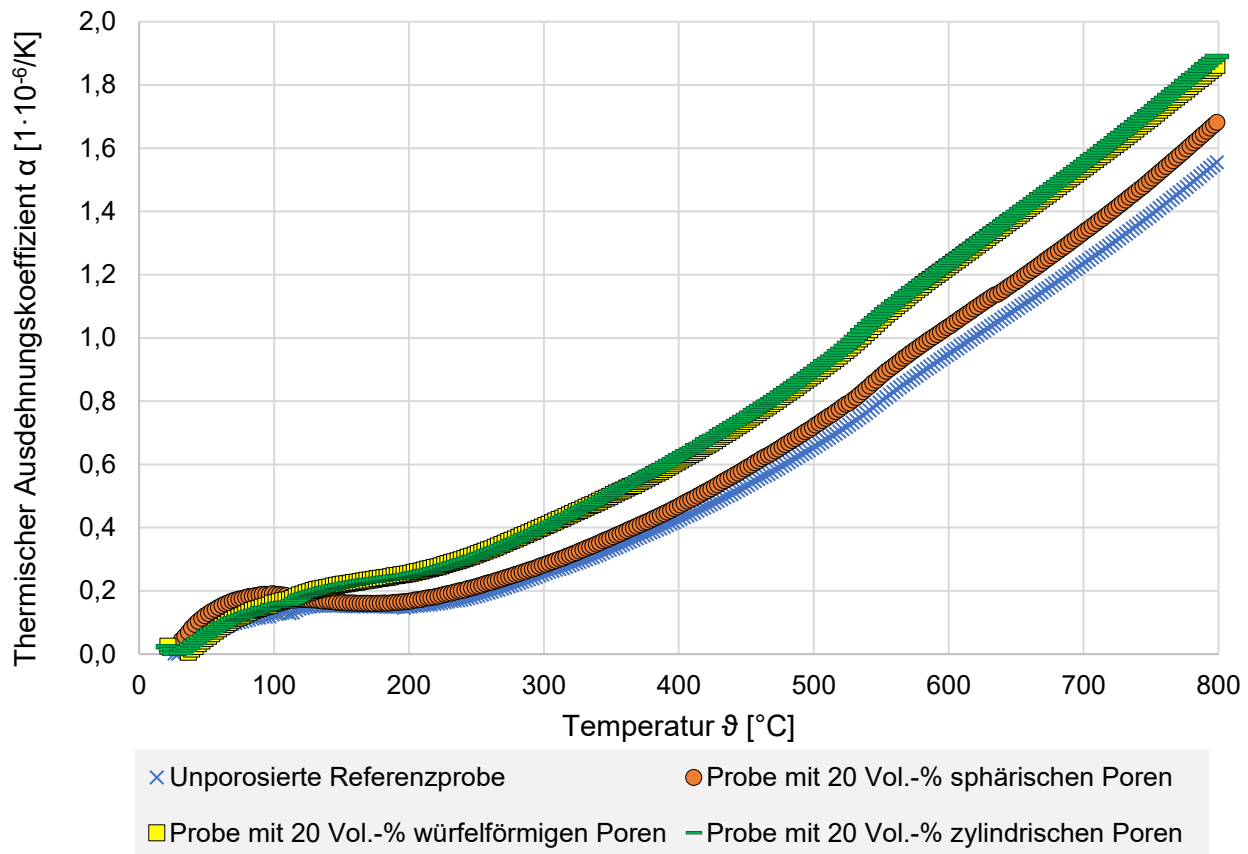


Abbildung 53: Über alle drei Achsen gemittelte thermische Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  der unporosierten Referenzproben sowie der Proben mit 20 Vol.-% sphärischen, 20 Vol.-% kubischen und 20 Vol.-% zylindrischen Poren in Abhängigkeit von der Temperatur  $\theta$ .

Die unporosierte Cordierit-Referenzprobe weist im Mittel in allen drei Achsrichtungen einen geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf als die porosierten Proben. Sämtliche Proben, mit Ausnahme der Proben mit zylinderförmigen Poren, zeigen keinen deutlichen Einfluss der betrachteten Achsrichtung auf die Messwerte des thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Bei den Proben mit zylindrischen Poren zeigen sich bei den Dilatometer-Messungen entlang der z-Achse vergleichsweise größere Werte, für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten als bei den Messungen entlang der x- und y-Achse, was durch die Vorzugsorientierung der zylindrischen Poren entlang der x-Achse verursacht sein könnte. In Abbildung 53 sind die thermischen Ausdehnungskoeffizienten für alle Probetypen graphisch über die drei Raumachsen gemittelt dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Proben mit kubischen und zylindrischen Poren deutlich größere thermische Ausdehnungskoeffizienten aufweisen als die nicht porosierte Referenzprobe. Die Proben

mit sphärischen Poren zeigen hingegen nur eine geringfügigere Erhöhung des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  gegenüber der unporosierten Referenz. Die über den gesamten Temperaturbereich von 25 °C bis 800 °C und über alle drei Raumachsen gemittelten, thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  betragen für die nicht porosierte Referenzprobe  $5,9 \cdot 10^{-7} \text{ 1/K}$  und für die Proben mit sphärischen, kubischen und zylindrischen Poren je  $6,5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/K}$ ,  $7,7 \cdot 10^{-7} \text{ 1/K}$  und  $7,8 \cdot 10^{-7} \text{ 1/K}$ .

### 5.9 Einfache Thermoschockversuche

Der Verlust der 3-Punkt-Biegefestigkeit dient gemäß der Norm DIN EN 820-3 als Maß zur Beurteilung der Thermoschockbeständigkeit eines Probekörpers.<sup>83</sup> Die Intensität eines Thermoschocks erhöht sich in der Regel mit steigender Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , resultierend aus der Temperatur des Probekörpers und der Temperatur des Wasserbades, in dem abgeschreckt wird. Entsprechend dieser Norm wird die Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , bei der ein Verlust der 3-Punkt-Biegefestigkeit einer nicht geschockten Probe gegenüber einer gleichartigen geschockten Probe (gleiche Porenform, gleicher Porosierungsgrad) um 30 % stattfindet, als kritische Temperaturdifferenz  $\Delta T_c$  bezeichnet.

Als alternative, zerstörungsfreie Messmethode wird in dieser Arbeit die Impulserregung betrachtet, mit der der dynamische E-Modul von Probekörpern bestimmt werden kann. Je gemitteltem Messpunkt der 3-Punkt-Biegefestigkeit und des dynamischen E-Moduls werden je 5 Messungen herangezogen.

Deswegen wird sowohl die 3-Punkt-Biegefestigkeit  $\sigma_{3P}$  als auch der dynamische E-Modul  $E_{dyn}$  gegen die Temperaturdifferenz beim Thermoschockversuch aufgetragen (Abbildung 53). Da es sich sowohl bei der 3-Punkt-Biegefestigkeit  $\sigma_{3P}$  als auch beim dynamischen E-Modul  $E_{dyn}$  um aus verschiedenen Messwerten berechnete Größen mit zugehörigen Standardabweichungen  $s$  handelt, sollte zu einer konservativen Betrachtung die Streuung nicht unterschätzt werden.

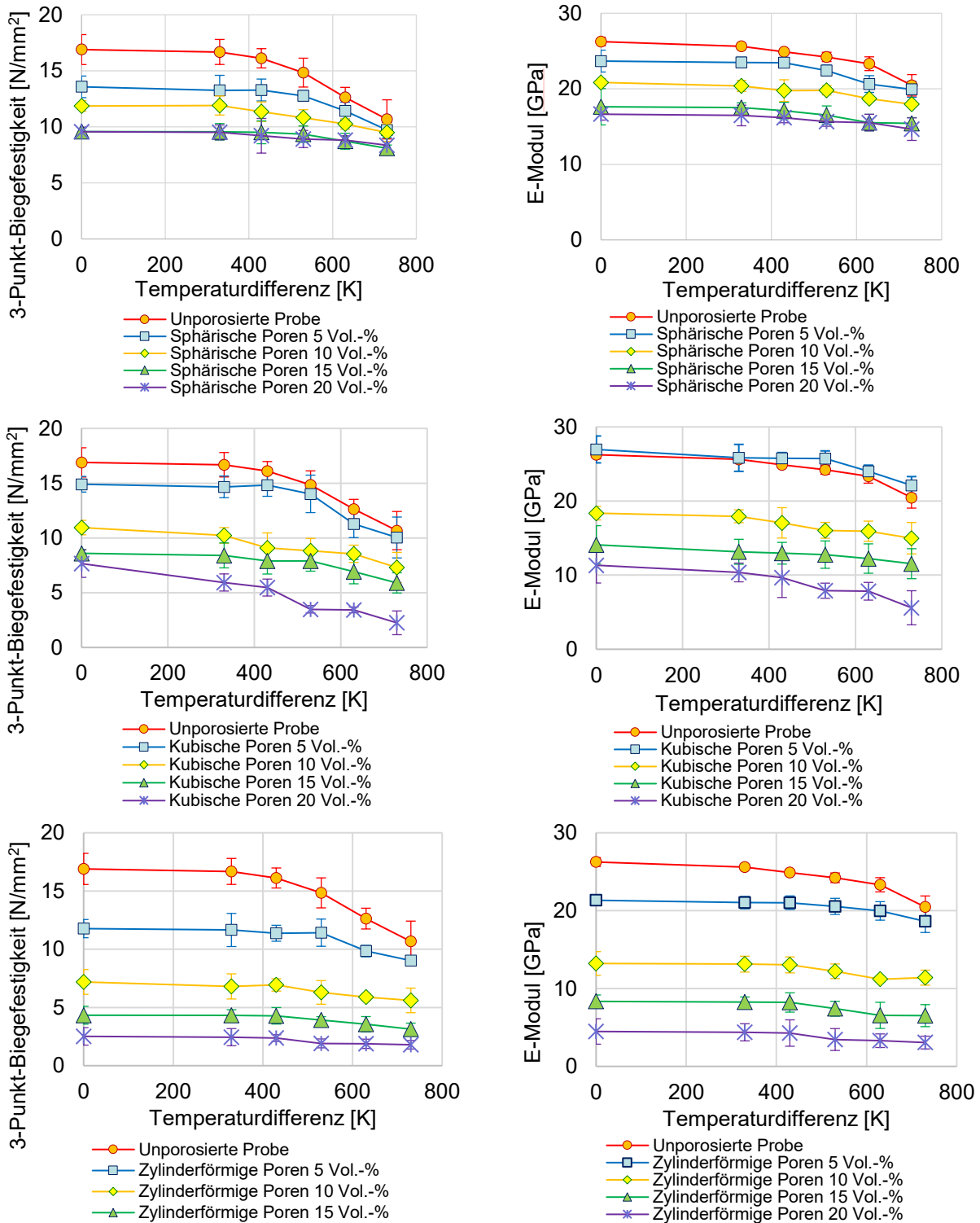


Abbildung 54: 3-Punkt-Biegefestigkeiten und dynamische E-Moduln der Cordierit-Proben mit sphärischen (o), kubischen (m) und zylindrischen Poren (u) in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen heißem Probekörper und Wasserbad beim Abschreckversuch mit Fehlerbalken der Gaußschen Fehlerfortpflanzung

## Ergebnisse

Daher bilden die Fehlerbalken in den Graphiken die Gaußsche Fehlerfortpflanzung ab, in die zur Berechnung gemessenen Werte mit ihren Standardabweichungen eingehen. Jeder graphisch aufgetragene Messpunkt entspricht einem Mittelwert aus 5 Messungen.

Unabhängig von der Porenform wird durch die Porosierung der monolithischen Cordierit-Körper stets eine Minderung der 3-Punkt-Biegefestigkeit bewirkt. Gemäß der Norm DIN EN 820-3 ist jedoch der relative Verlust der Festigkeit (hier: 3-Punkt-Biegefestigkeit) das entscheidende Kriterium zur Beurteilung der Thermoschockresistenz.<sup>83</sup> Der dynamische E-Modul zeigt in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , die beim Thermoschock auftritt, bei allen Porenformen einen qualitativ ähnlichen Verlauf wie bei der 3-Punkt-Biegefestigkeit (Abbildung 54). Dieser Sachverhalt wird durch die graphische Auftragung aller gemessenen 3-Punkt-Biegefestigkeiten gegen die entsprechenden dynamischen E-Moduln bestätigt. Es zeigt sich eine näherungsweise lineare Korrelation, so dass die Impulserregung als alternative, zerstörungsfreie Messmethode für eine erste Abschätzung der 3-Punkt-Biegefestigkeit verwendet werden kann (Abbildung 55).

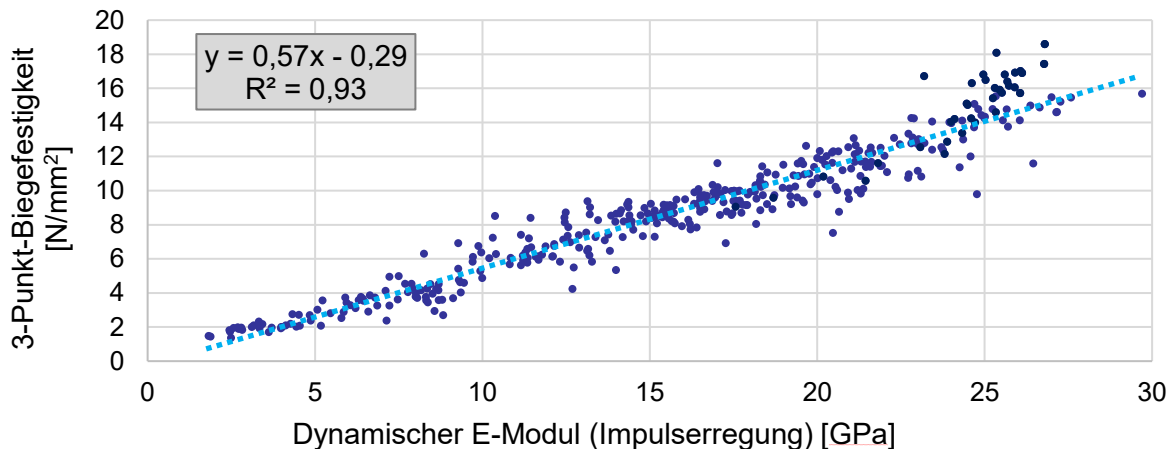


Abbildung 55: Mittlere 3-Punkt-Biegefestigkeiten aufgetragen gegen die korrelierenden dynamischen E-Moduln. Das Bestimmtheitsmaß weist einen Wert von  $R^2 = 0,93$  auf.

Die relativen 3-Punkt-Biegefestigkeits-Verluste  $L$  der Proben mit zylindrischen und sphärischen Poren erreichen bei allen getesteten Temperaturdifferenzen ( $\Delta T = 330$  K, 430 K, 530 K, 630 K, 730 K) und für alle Porosierungsgrade (5, 10, 15 und 20 Vol.-%) bei einem einzelnen Thermoschock nicht die 30 %, die als Materialversagen gewertet werden (Abbildung 56).

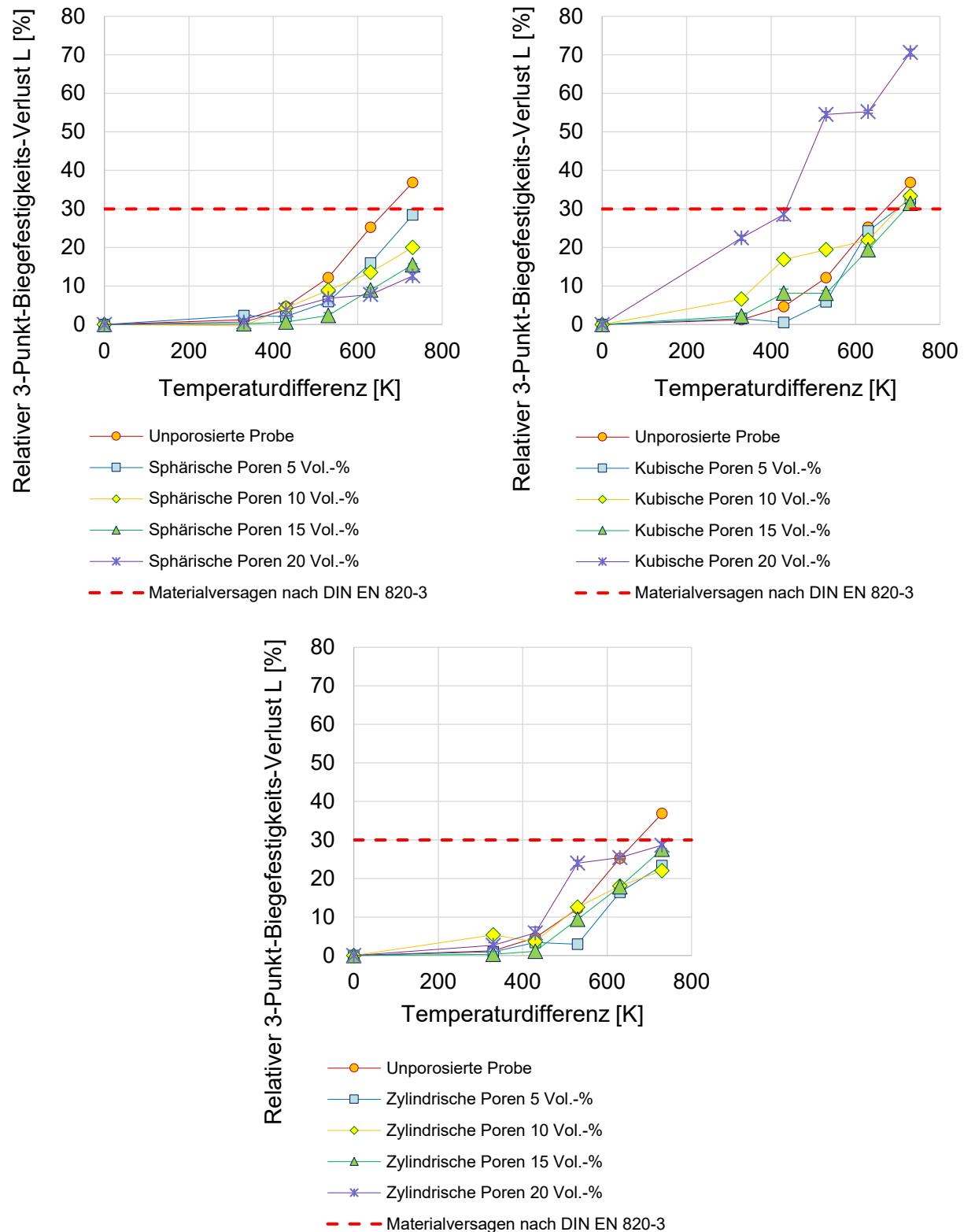


Abbildung 56: Relativer 3-Punkt-Biegefestigkeitsverlust L für die Proben mit sphärischen (o.l.), kubischen (o.r.) und zylindrischen Poren (u) sowie jeweils für die nicht porosierte Referenzprobe.

## Ergebnisse

Die Proben haben sich durch die Porosierung bezüglich des Thermoschockverhaltens bis auf einen Fall gegenüber der nicht porosierten Referenzprobe verbessert, die zwischen  $\Delta T = 630 \text{ K}$  und  $\Delta T = 730 \text{ K}$  einen 3-Punkt-Biegefestigkeits-Verlust von 30 % erreicht. Die Proben mit kubischen Poren erreichen bei den Porosierungsmittel-Zugaben von 5, 10 und 15 Vol.-% ebenfalls zwischen  $\Delta T = 630 \text{ K}$  und  $\Delta T = 730 \text{ K}$  einen 3-Punkt-Biegefestigkeits-Verlust von 30 %. Die Proben, die mit 20 Vol.-% kubischem Porosierungsmittel hergestellt wurden, erreichen diesen Verlust bereits zwischen  $\Delta T = 430 \text{ K}$  und  $\Delta T = 530 \text{ K}$ . Die Porosierung mit kubischem Porosierungsmittel führt in diesem Fall zu einer Verschlechterung der Thermoschockeigenschaften. Die resultierenden kritischen Temperaturdifferenzen  $\Delta T_c$  sind mittels linearer Interpolation bestimmt worden (Tabelle 23).

Tabelle 23: Kritische Temperaturdifferenzen  $\Delta T_c$  für die nicht porosierte Referenzprobe und die Proben mit kubischen Poren. Die Proben mit sphärischen und zylindrischen Poren zeigen im einfachen Thermoschockversuch keine kritische Temperaturdifferenz und sind daher nicht erfasst.

Porenform	Porosierungsmittel-Zugabe [Vol.-%]	Kritische Temperaturdifferenz $\Delta T_c$ [K]
Nicht porosiert	0	671
Kubisch	5	651
	10	701
	15	718
	20	436

Die kritische Temperaturdifferenz der Proben mit kubischen Poren liegt nur bei einer Porosierungsmittel-Zugabe von 10 und 15 Vol.-% über dem Wert der kritischen Temperaturdifferenz der nicht porosierten Referenzprobe. Bei den Proben mit einer Zugabe von 5 oder 20 Vol.-% kubischem Porosierungsmittel findet durch die Porosierung für die Bedingungen im einfachen Thermoschock-Versuch eine Verschlechterung der Thermoschockresistenz statt.

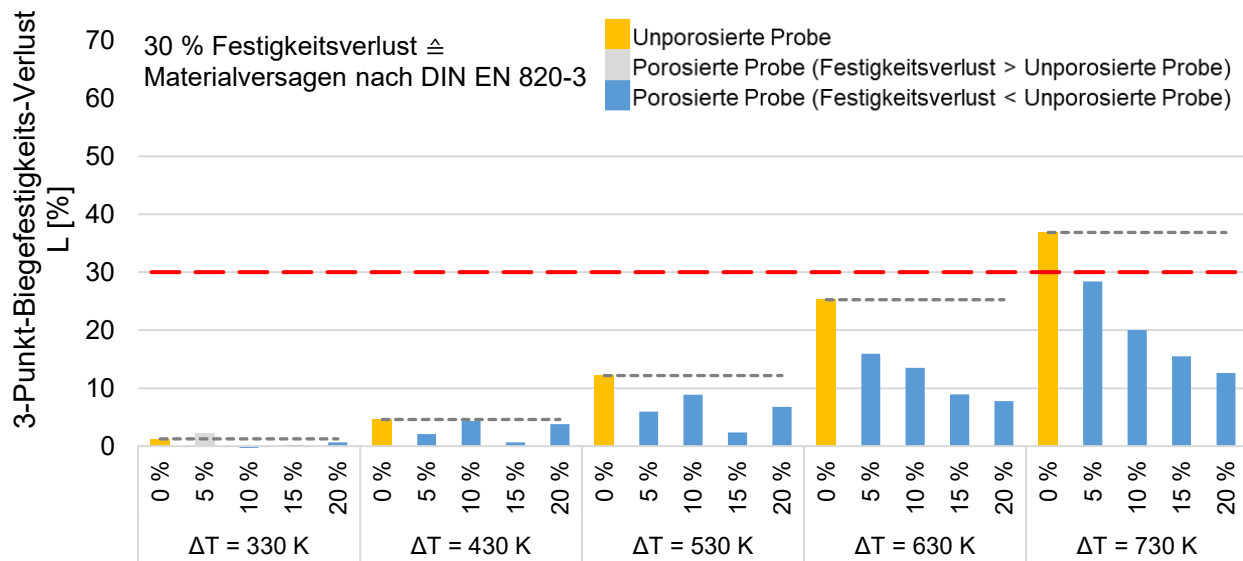


Abbildung 57: Prozentualer Verlust der 3-Punktbiegefestigkeit  $L$  gegenüber den gleichartigen ungeschockten Probetypen mit sphärischen Poren sowie der unporosierten Nullprobe für die Temperaturdifferenzen  $\Delta T = 330, 430, 530, 630$  und  $730$  K.

Noch genauer wird der Einfluss der Porosierung bei einer Gegenüberstellung der nicht porosierten Referenzprobe zu den porosierten Proben für jeden einzelnen Bereich der geprüften Temperaturdifferenz verdeutlicht (Abbildung 57 bis Abbildung 59).

Die Proben mit kugelförmigen Poren weisen gegenüber den anderen Porenformen den geringsten Verlust der 3-Punkt-Biegefestigkeit durch den Thermoschock auf. Bis auf die Versuchsreihe bei einer Temperaturdifferenz  $\Delta T = 330$  K mit 5 Vol.-% Porosierungsmittel-Anteil kann bei allen Porosierungen mit sphärischem Porosierungsmittel eine Abnahme des Festigkeitsverlusts bei der 3-Punkt-Biegefestigkeit gegenüber der unporosierten Nullprobe erreicht werden. Bei einer Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 730$  K zeigt die unporosierte Nullprobe einen Festigkeitsverlust  $> 30\%$  gegenüber der zugehörigen, nicht geschockten Probe. Gemäß der DIN EN 820-3 ist dadurch ein Materialversagen erreicht.<sup>83</sup> Durch die Porosierung mit kugelförmigen Poren mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% kann bei dieser Temperaturdifferenz stets das Materialversagen nach Norm vermieden werden (Abbildung 57).



## Ergebnisse

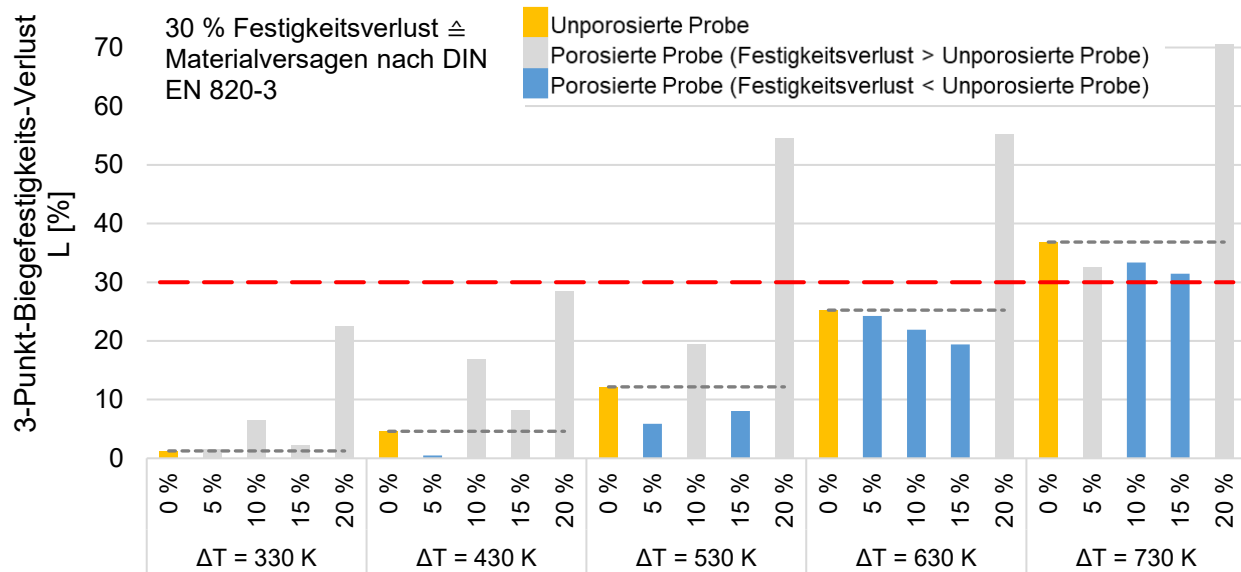


Abbildung 58: Prozentualer Verlust der 3-Punktbiegefestigkeit  $L$  gegenüber den gleichartigen ungeschockten Probetypen mit kubischen Poren sowie der unporosierten Nullprobe für die Temperaturdifferenzen  $\Delta T = 330$ , 430, 530, 630 und 730 K.

Bei den Proben mit kubischen Poren gelingt nur in 9 von 20 Fällen eine Verbesserung der Thermoschockresistenz. Die Proben, die mit einem Porosierungsmittel-Anteil von 20 Vol.-% hergestellt werden, zeigen stets eine deutliche Verschlechterung. Bei  $\Delta T = 530$  K und 630 K weisen die Proben mit 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Anteil einen Festigkeitsverlust > 30 % bzw. Materialversagen auf. Bei  $\Delta T = 730$  K zeigen sämtliche Porosierungsstufen einen Festigkeitsverlust > 30 % und somit Materialversagen (Abbildung 58).

Die Porosierung mit zylindrischen Poren zeigt in 15 von 20 Fällen eine Verbesserung der Thermoschockresistenz. Insbesondere kann durch diese Porenform bei  $\Delta T = 730$  K das Materialversagen mithilfe der Porosierung vermieden werden. Allerdings ist die Verbesserung des relativen Verlusts gegenüber den zugehörigen ungeschockten Proben geringer als bei den Proben mit sphärischen Poren (Abbildung 59).

## Ergebnisse

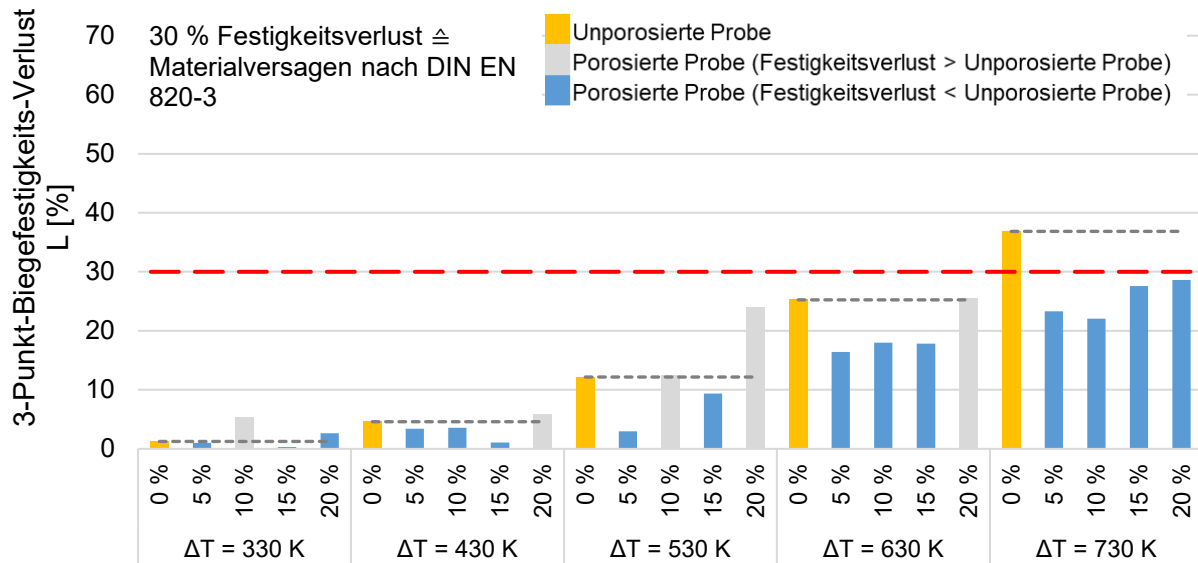


Abbildung 59: Prozentualer Verlust der 3-Punktbiegefestigkeit L gegenüber den gleichartigen ungeschockten Probetypen mit zylindrischen Poren sowie der unporosierten Nullprobe für die Temperaturdifferenzen  $\Delta T = 330, 430, 530, 630$  und  $730$  K.

Durch die Porosierung mit sphärischen Poren kann im Vergleich zu den Proben mit zylindrischen und kubischen Poren häufiger eine Verbesserung der Thermoschockbeständigkeit gegenüber den zugehörigen ungeschockten Proben erreicht werden. Die Proben mit sphärischen Poren zeigen darüber hinaus in den überwiegenden Fällen auch eine größere Verbesserung gegenüber der unporosierten Probe als die Proben mit kubischen und zylindrischen Poren. Im Porengrößenbereich von  $3,375 \text{ mm}^3$  mit einem Porosierungsmittel-Anteil von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sind somit die sphärischen Poren am besten geeignet, um die Thermoschockresistenz des hier eingesetzten Wärmespeichermaterials zu erhöhen. Da die Proben mit einem Porosierungsgrad von 20 Vol.-% sphärischer Poren (Abbildung 57) und die Proben mit einem Porosierungsgrad von 5 Vol.-% zylindrischer Poren (Abbildung 59) bei jeder Temperaturdifferenz  $\Delta T = 330 \text{ K}$  bis  $\Delta T = 730 \text{ K}$  im Vergleich zur Referenz geringere Festigkeitsverluste L aufweisen, wurden Proben mit den Porosierungsmittel-Zugaben 5 und 20 Vol.-% für die zyklischen Thermoschockversuche gewählt.

Um den Einfluss der Porosierung sowie den möglichen Effekt eines einfachen Thermoschocks auf die ein- und ausspeicherbare Wärme pro Gramm Speichermasse zu

## Ergebnisse

untersuchen, wurden STA-Messungen an nicht porosierten Referenzproben sowie an mit 20 Vol.-% porosierten Proben mit sphärischen, kubischen und zylindrischen Poren durchgeführt, die zuvor zu einem Pulver mit der Korngröße  $< 63 \mu\text{m}$  gemörstert wurden (Abbildung 60).

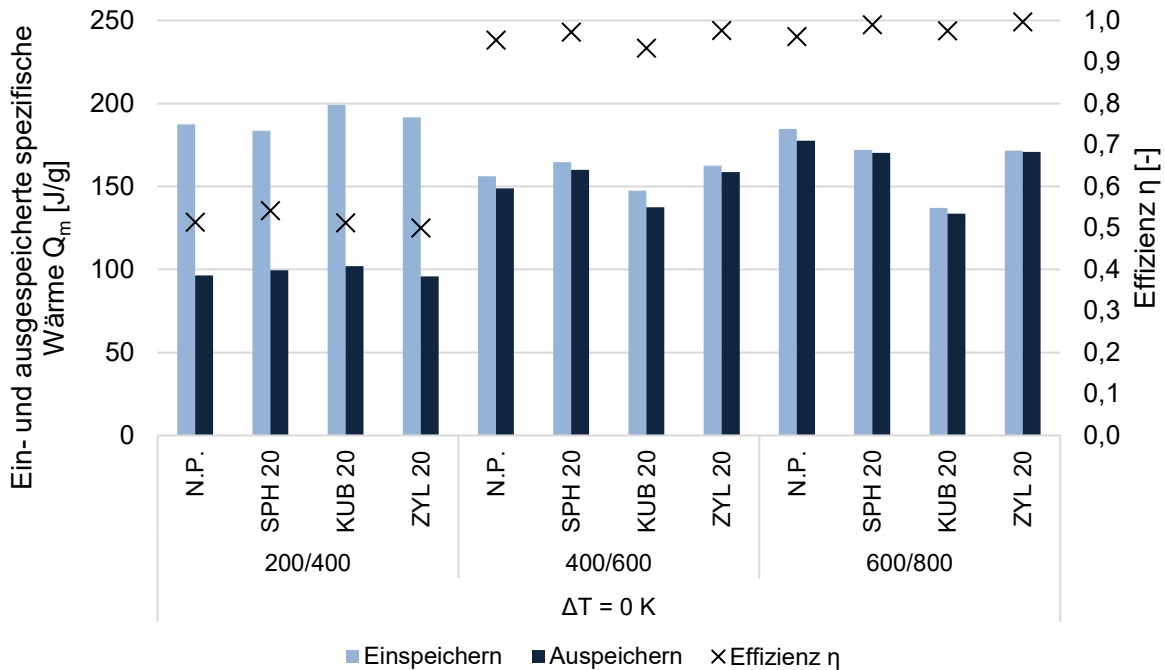


Abbildung 60: Mittels Simultaner Thermischer Analyse zwischen 200 °C/400 °C, 400 °C/600 °C und 600 °C/800 °C ein- und ausgespeicherten massenspezifische Wärmen und die daraus resultierenden Effizienzen für nicht geschockte ( $\Delta T = 0 \text{ K}$ ) Proben, die ohne (N.P.) oder mit je 20 Vol.-% sphärischem (SPH 20), kubischem (KUB 20) und zylindrischem Porosierungsmittel hergestellt wurden.

Die STA-Messungen wurden an nicht geschockten Proben (Temperaturdifferenz  $\Delta T = 0 \text{ K}$ ) und für zuvor einfach geschockten Proben mit einer resultierenden Temperaturdifferenz von  $\Delta T$  von 730 K durchgeführt. Das Verhältnis von ausspeicherbarer Wärme zu eingespeicherter Wärme wird als Effizienz  $\eta$  bezeichnet. Die Wärmemenge wird bei den 3 Temperaturniveaus zwischen 200 °C und 400 °C, 400 °C und 600 °C und 600 °C und 800 °C jeweils ein- und ausgespeichert, so dass stets ein gleich großes Temperaturintervall von 200 K gegeben ist.

## Ergebnisse

Bei zuvor nicht geschockten Proben ist innerhalb eines Temperaturniveaus ist zwischen den unterschiedlich porosierten Probetypen keine eindeutige Tendenz hinsichtlich der aufgenommenen und abgegeben Wärmen sowie der Effizienz festzustellen. Mit zunehmendem Temperaturniveau steigt für alle Probetypen die Effizienz.

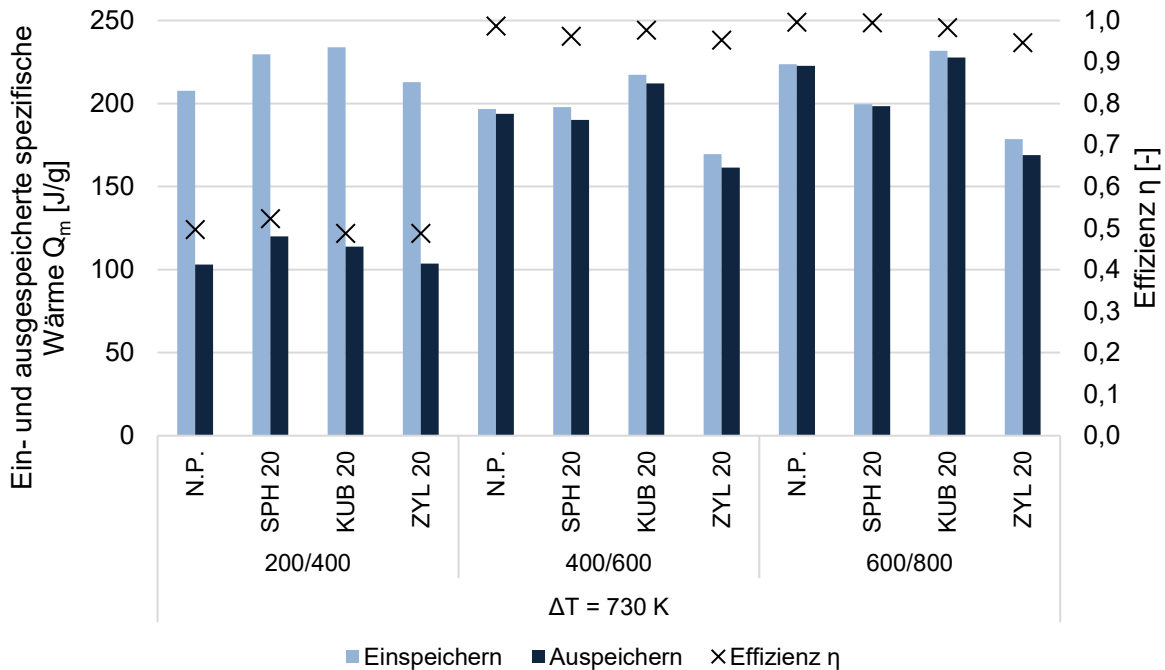


Abbildung 61: Die mittels Simultaner Thermischer Analyse zwischen 200 °C/400 °C, 400 °C/600 °C und 600 °C/800 °C ein- und ausgespeicherten massenspezifische Wärmen und die daraus resultierenden Effizienzen für geschockte ( $\Delta T = 730$  K) Proben, die ohne (N.P.) oder mit je 20 Vol.-% sphärischem (SPH 20), kubischem (KUB 20) und zylindrischem Porosierungsmittel hergestellt wurden.

Die identisch hergestellten Probetypen, die zuvor einen einfachen Thermoschock mit  $\Delta T = 730$  K durchlaufen haben, zeigen ebenfalls keine klaren Unterschiede zwischen den porosierten und nicht porosierten Proben. Die ausspeicherbaren Wärmemengen verringern sich nicht durch den einfachen Thermoschock. Es liegt somit weder ein offensichtlicher Einfluss durch die eingesetzten Porosierungsmittel noch durch einen einfachen Thermoschock auf die ein- und ausspeicherbaren Wärmemengen vor. Die ein- und ausspeicherbaren Wärmemengen hängen maßgeblich von der vorherrschenden Einsatztemperatur ab.

### **5.10 Zyklische Thermoschockversuche**

Proben mit je 5 und 20 Vol.-% sphärischen, kubischen oder zylindrischen Poren sowie nicht porosierte Referenzproben wurden bei den zyklischen Thermoschockversuchen jeweils 100-mal auf 670 °C aufgeheizt und anschließend in einem Wasserbad mit einer Temperatur von 20 °C abgeschreckt. Je Probetyp werden stets 8 Proben dem beschriebenen Abschreck-Verfahren unterzogen. Zur zerstörungsfreien, näherungsweisen Bestimmung der 3-Punkt-Biegefestigkeiten wird die in Abbildung 55 dargestellte lineare Korrelation mit den dynamischen E-Moduln herangezogen. Es handelt sich folglich um mittels der festgestellten Linearfunktion berechnete 3-Punkt-Biegefestigkeiten.

Die Impulserregung wurde je Probetyp nach einer Thermoschock-Zyklenzahl von 0, 1, 3, 7, 15, 25, 37, 60 und 100 durchgeführt, die als Kontrollzyklen dienen. Für Proben, die während der zyklischen Beanspruchung großflächige Abplatzungen oder ein vollständiges Zerbrechen zeigen, wird Materialversagen angenommen. Für diese Proben wird mit einem 100 %-igen 3-Punkt-Biegefestigkeits-Verlust weitergerechnet. Aus den berechneten 3-Punkt-Biegefestigkeiten  $\sigma_{3P,calc}$  wird der relative Verlust  $L$  im Vergleich zu einer nicht geschockten Probe gleichen Typs bestimmt. In der graphischen Auftragung entsprechen  $L$  und  $\sigma_{3P,calc}$  dem Mittelwert der 8 eingesetzten Proben je Probetyp. Die Proben mit 20 Vol.-% zylindrischen und die Proben mit 20 Vol.-% kubischen Poren zeigen bereits nach dem ersten Zyklus  $N$  ein Materialversagen gemäß der Norm DIN EN 820-3.<sup>83</sup>

Die nicht porosierten Referenzproben weisen im Bereich zwischen 25 und 37 Zyklen ein entsprechendes Materialversagen auf. Die Proben mit 5 Vol.-% kubischen Poren erreichen zwischen 7 und 15 Zyklen Materialversagen, während die Proben mit 5 Vol.-% sphärischen und zylindrischen Poren zwischen 25 und 37 sowie zwischen 37 und 60 Zyklen versagen (Abbildung 62).

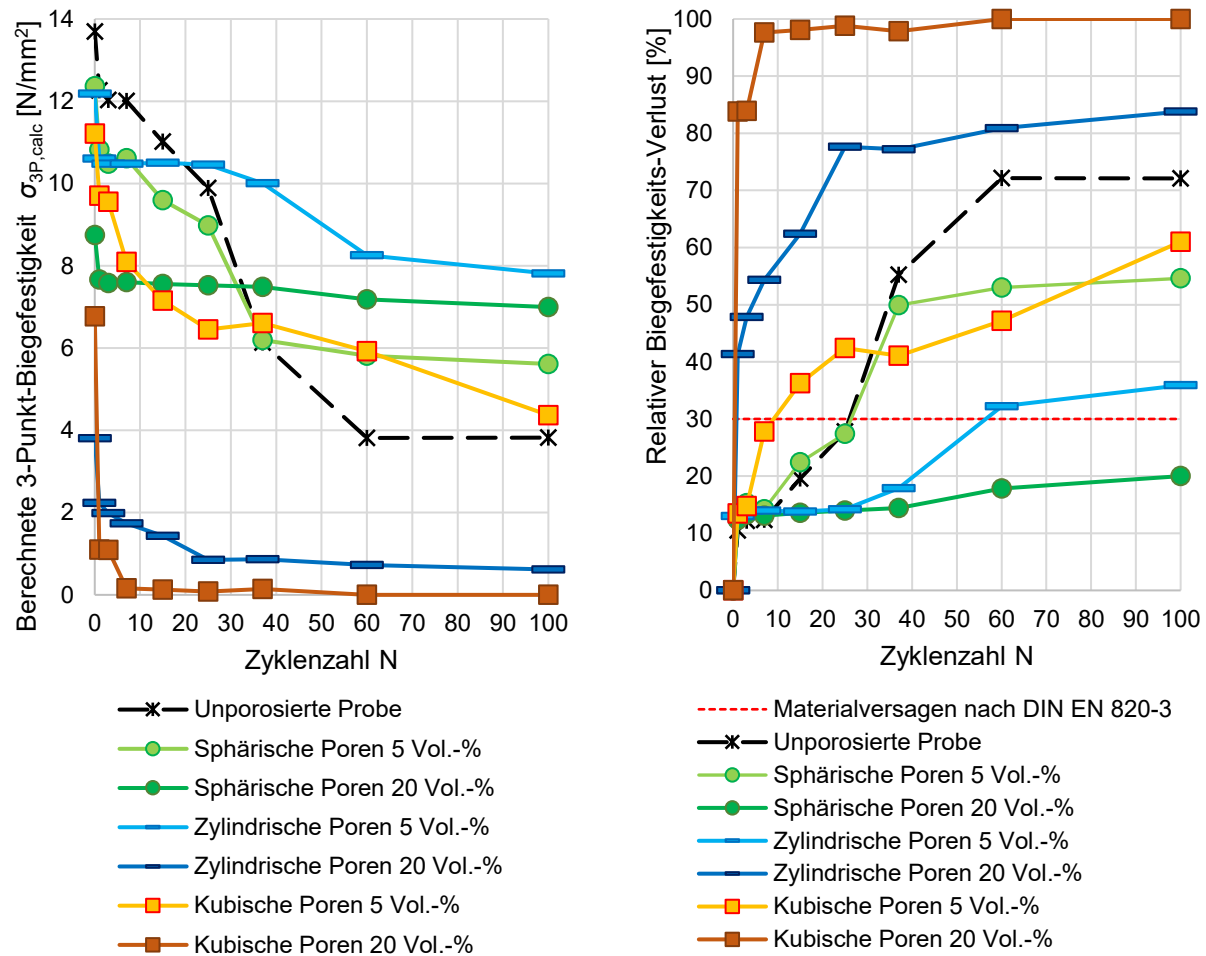


Abbildung 62: Berechnete mittlere 3-Punkt-Biegefestigkeiten (I) und relative 3-Punkt-Biegefestigkeits-Verluste L (B) der Proben mit sphärischen, zylindrischen und kubischen Poren sowie nicht porosierte Referenzproben in Abhängigkeit von der Anzahl der Thermoschock-Zyklen N.

Tabelle 24 zeigt den durch lineare Interpolation berechneten Zyklus, bei dem ein Probetyp Materialversagen, d.h. ein Biegefestigkeitsverlust  $\geq 30$  % zeigt. Die Zyklenzahlen werden dabei im Sinne einer konservativen Annahme auf ganze Zahlen abgerundet.

Tabelle 24: Mit linearer Interpolation bestimmte Zyklenzahlen, bis zu denen für die nicht porosierte Referenz sowie die mit 5 und 20 Vol.-% sphärischem, kubischem und zylindrischen Porosierungsmittel hergestellten Proben ein Biegefestigkeits-Verlust  $\geq 30$  % stattfindet.

Probe	N.P.	SPH 5	KUB 5	ZYL 5	SPH 20	KUB 20	ZYL 20
N ( $L \geq 30$ %)	25	26	9	56	>100	1	1

## Ergebnisse

Die Proben mit 20 Vol.-% sphärischen Poren weisen den geringsten 3-Punkt-Biegefestigkeits-Verlust  $L$  auf und zeigen auch nach 100 Abschreck-Zyklen kein Materialversagen. Obwohl die berechnete mittlere 3-Punkt-Biegefestigkeit einer nicht geschockten und nicht porierten Referenzprobe mit einem absoluten Wert von  $13,70 \text{ N/mm}^2$  deutlich über dem gemittelten, absoluten Wert der nicht geschockten Probe mit sphärischen Poren von  $8,75 \text{ N/mm}^2$  liegt, unterschreitet die mittlere berechnete 3-Punkt-Biegefestigkeit der Referenzprobe mit  $3,82 \text{ N/mm}^2$  nach 100 Zyklen selbst die absolute berechnete 3-Punkt-Biegefestigkeit von  $7,00 \text{ N/mm}^2$  der Proben mit sphärischen Poren. Dieses Ergebnis verdeutlicht die erheblich bessere Thermoschock-Resistenz der Proben mit sphärischen Poren, was auch die Zahlen der bei den zyklischen Thermoschocks ausgefallenen Proben bestätigen (Tabelle 25).

Tabelle 25: Anzahl und Anteil intakter Probekörper für bei den Probezyklen 0, 1, 3, 7, 15, 25, 37, 60 und 100 der nicht porierten Referenzprobe (N.P.) sowie der mit 5 und 20 Vol.-% sphärisch (S5, S20), kubisch (K5, K20) und zylindrisch (Z5, Z20) porierten Proben.

Zyklus	Zahl der intakten Probekörper $n$ [-]							Anteil der intakten Probekörper $\varphi$ [%]						
N [-]	N.P.	S5	K5	Z5	S20	K20	Z20	N.P.	S5	K5	Z5	S20	K20	Z20
0	8	8	8	8	8	8	8	100	100	100	100	100	100	100
1	8	8	8	8	8	8	8	100	100	100	100	100	100	100
3	8	8	8	8	8	8	8	100	100	100	100	100	100	100
7	8	8	7	8	8	5	8	100	100	87,5	100	100	62,5	100
15	8	8	6	8	8	5	7	100	100	75	100	100	62,5	87,5
25	8	7	6	8	8	4	6	100	87,5	75	100	100	50	75
37	8	5	6	8	8	1	6	100	62,5	75	100	100	12,5	75
60	8	5	5	7	8	0	5	100	62,5	62,5	87,5	100	0	62,5
100	8	5	4	7	8	0	4	100	62,5	50	87,5	100	0	50

Für die Betrachtung der Zyklenstabilität bezogen auf die Eigenschaft der Wärmespeicherfähigkeit wurden nach 0, 1, 3, 7, 15, 25, 37, 60 und 100 Thermoschockzyklen die beanspruchten Probekörper zu Pulver mit einer Korngröße  $< 63 \mu\text{m}$  gemahlen und nach der Rücktrocknung im Trockenschrank bei  $105^\circ\text{C}$  mittels STA die ein- und ausgespeicherten, massenspezifischen Wärmen sowie die daraus resultierenden Effizienzen bestimmt (Abbildung 63).

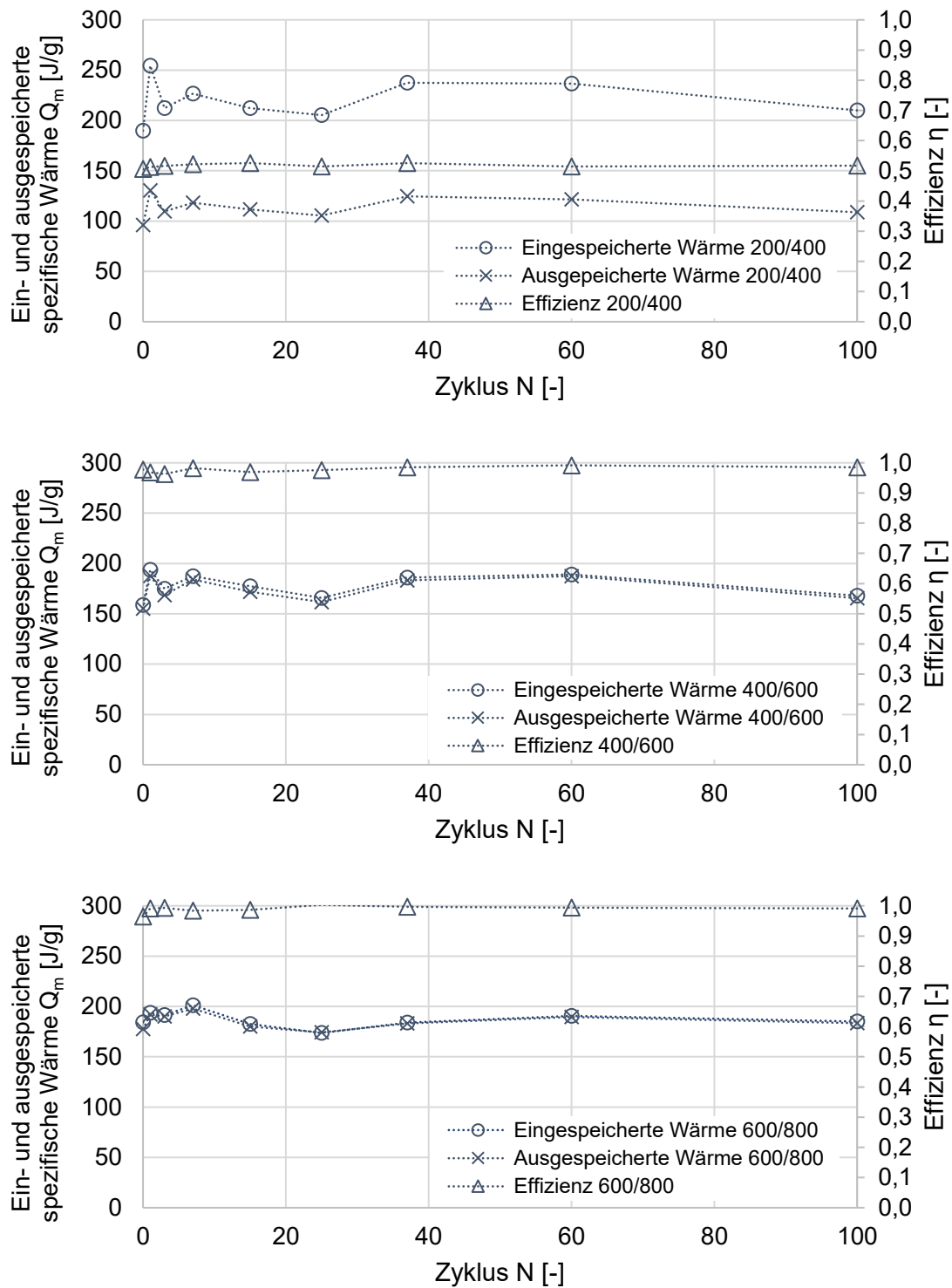


Abbildung 63: Mittels Simultaner Thermischer Analyse zwischen 200 °C/400 °C, 400 °C/600 °C und 600 °C/800 °C von nicht porierten Cordierit-Proben ein- und ausgespeicherte massenspezifische Wärmemengen und die daraus resultierenden Effizienzen in Abhängigkeit der Thermoschock-Zyklenzahl ( $\Delta T = 670$  K).



## Ergebnisse

Da bei den STA-Messungen nach einem Einzelschock kein Einfluss der Porosierung auf die Ergebnisse der STA-Messungen festgestellt werden konnte, wurden für die Untersuchung der zyklisch beanspruchten Probekörper nur die nicht porosierten Probetypen verwendet. Jeder graphisch dargestellte Zahlenwert wurde aus zwei Messwerten gemittelt. Die Analysen fanden wie in Kap. 5.8 für die 3 Temperaturniveaus zwischen 200 °C und 400 °, 400 °C und 600 °C sowie 600 °C und 800 °C statt (Abbildung 63).

Aus der Untersuchung geht hervor, dass sich vom Temperaturniveau zwischen 200 °C und 400 °C auf die beiden höheren Temperaturniveaus die Effizienz von 0,5 auf einen Wert nahe der 1,0 verdoppelt. Innerhalb des 200 K großen Temperaturintervalls kann das Wärmespeichermaterial bezogen auf 1 g seiner Masse im Temperaturniveau zwischen 600 °C und 800 °C und den eingestellten Randbedingungen der Simultanen Thermischen Analyse bis zu 200 J speichern. Bis auf geringfügige Schwankungen zeigt sich bei der zyklischen Thermoschockbeanspruchung mit einer Temperaturdifferenz  $\Delta T$  von 670 K über 100 Zyklen hinweg keine Tendenz zur Verringerung der vom Probenmaterial ein- und ausgespeicherten Wärmemengen. Das eingesetzte Material zeigt somit eine gute Zyklenstabilität im Bereich seiner Wärmespeicherfähigkeit.

Die Thermoschocks zeigen keinen Einfluss auf die qualitative Zusammensetzung des Wärmespeichermaterials. Nach 100 Thermoschockzyklen entsprechen die detektierten Hauptbestandteile Cordierit, Mullit und Quarz denen der nicht geschockten, nicht porosierten Probe aus Kap. 5.2. (Tabelle 26).

Tabelle 26: Tabellarische Auflistung der Phasen zu den detektierten Hauptpeaks der XRD-Messung mit der Software HighScore Plus nach 100 Thermoschockzyklen.

Sichtbar	PDF-Nr.	Score	Verbindungsname	Verschiebung [°2Th.]	Skalierung	Chemische Formel
*	98-004-5300	71	Cordierite high	0,000	1,528	Al <sub>4</sub> Mg <sub>2</sub> O <sub>18</sub> Si <sub>5</sub>
*	98-005-6873	47	Quartz low	0,000	0,429	O <sub>2</sub> Si <sub>1</sub>
*	98-002-8274	49	Mullite	0,000	0,389	Al <sub>4.59</sub> O <sub>9.7</sub> Si <sub>1.41</sub>

## Ergebnisse

Bei der Bestimmung des Quarzanteils mittels STA zeigt sich ebenfalls ein vergleichbarer Massenanteil zu der nicht geschockten Probe in Kap. 5.2. Die Probe weist nach 100 Thermoschocks mit einem Wert von 1,9 Ma.-% den gleichen Quarzanteil wie das nicht geschockte Material aus der Messung in Kap. 5.2 auf (Abbildung 64, Tabelle 27 und Tabelle 17).

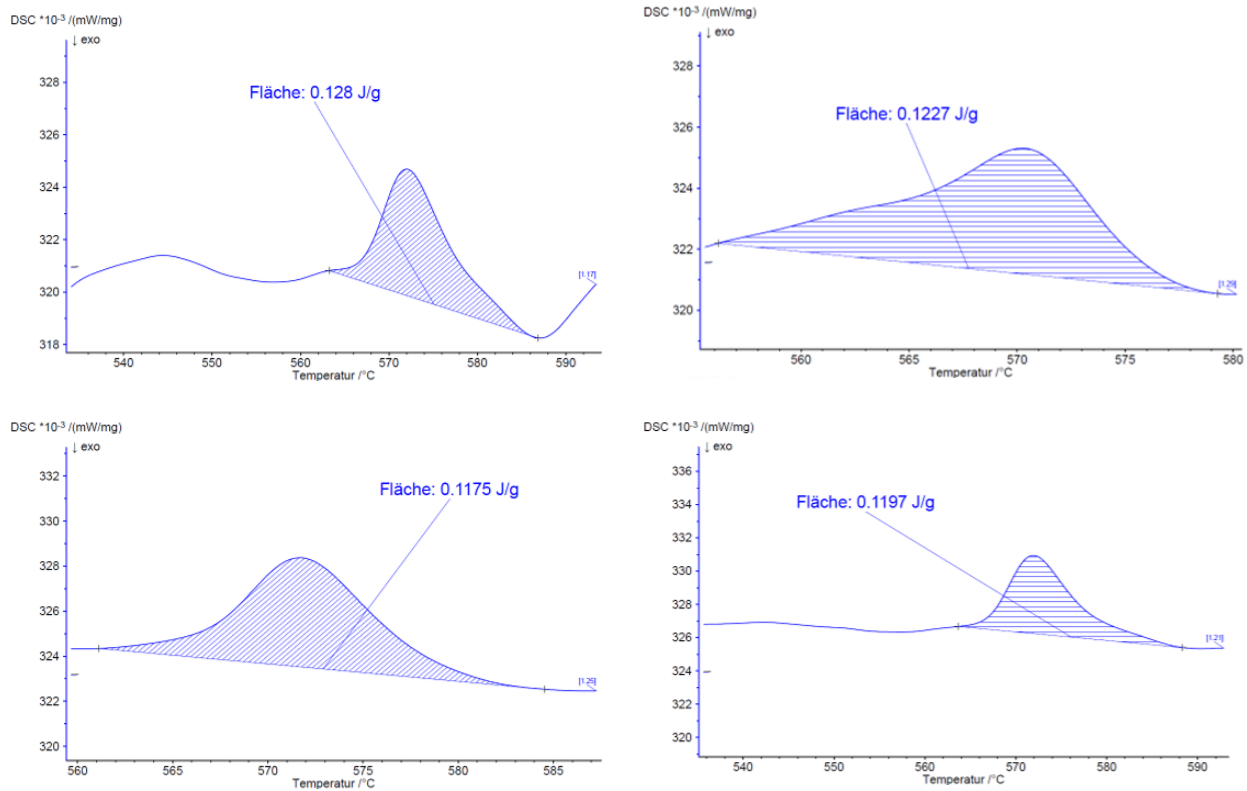


Abbildung 64: Vierfache Bestimmung der endothermen Energie bei der Fest-Fest-Phasenumwandlung von  $\alpha$ -Quarz in  $\beta$ -Quarz bei 573 °C des 100fach zyklisch geschockten Probenmaterials.

Die Standardabweichung von 0,1 Ma.-% bedeutet relativ auf den Massenanteil bezogen eine Ungenauigkeit von gut 5 % und ist um die Hälfte geringer als die Streuung bei der nicht geschockten Probe. Die Ergebnisse zeigen, dass der Quarzanteil unter den hier erfolgten Bedingungen während der 100 Thermoschocks in Wasser mit einer Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 670$  K nicht verändert. Da auch qualitativ keine Veränderung des Materials über die gesamte Zyklenzahl festgestellt wird, zeigt das verwendete Wärmespeichermaterial im Rahmen der hier durchgeführten Analysen eine gute Zyklensstabilität hinsichtlich seiner mineralogischen Zusammensetzung.

## Ergebnisse

Tabelle 27: Ergebnis der Bestimmung des mittleren Massenanteils und der Standardabweichung von Quarz im Probenmaterial nach 100 Thermoschockzyklen.

Endotherme Energie [J/g]	Massenanteil Quarz $x_{\text{Quarz}}$ [-]	Massenanteil Quarz $x_{\text{Quarz}}$ [Ma.-%]
0,1280	0,020	2,0
0,1197	0,019	1,9
0,1175	0,018	1,8
0,1227	0,019	1,9
<b>Mittelwert</b>	<b>0,019</b>	<b>1,9</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>0,001</b>	<b>0,1</b>

### 5.11 Erster und zweiter Thermoschockparameter

Zur Berechnung der Thermoschockparameter wurden die einzusetzenden Messwerte vereinfacht als konstante Größen behandelt (Tabelle 28). Für den thermischen Ausdehnungskoeffizient werden die über den Temperaturbereich von 25 bis 800 °C und über die drei Achsrichtungen gemittelten Werte verwendet (Kap. 5.8). Die Scherbenwärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10,\text{tr}}$  wird vereinfacht als nicht temperatur- und richtungsabhängige Größe betrachtet. Zur Berechnung dienen die Werte aus der Gleichgewichtsmessung mit dem Einplatten-Verfahren (Kap. 5.7).

Tabelle 28: Erster und zweiter Thermoschockparameter R und R' sowie kritische Temperaturdifferenz  $\Delta T_c$  und linear interpolierte Anzahl der Zyklen N beim Abschrecken im Wasserbad mit  $\Delta T = 670$  K bis zum Materialversagen bzw. bis zu einem 3-Punkt-Biegefestigkeitsverlust von > 30 % für die nicht porosierte Referenzprobe und für die Probekörper, die mit je 20 Vol.-% sphärischem (SPH), kubischem (KUB) und zylindrischem (ZYL) Porosierungsmittel hergestellt wurden.

Probetyp	R [K]	R' [W/m]	$\Delta T_c$ [K]	N [L ≥ 30 %]
N.P.	927	609	671	25
SPH 20	475	250	> 730	> 100
KUB 20	332	166	436	1
ZYL 20	109	49	> 730	1

Der Elastizitätsmodul wird ebenfalls als richtungs- und temperaturunabhängige Größe betrachtet. Die Messungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Der erste und zweite Thermoschockparameter R und R' eignen sich im hier betrachteten Fall weder quantitativ noch qualitativ für eine geeignete Voraussage zur im Versuch bestimmten kritischen Temperaturdifferenz  $\Delta T_c$  oder zur Zyklenstabilität, die hier durch die Anzahl der

Zyklen N bis zum Materialversagen charakterisiert wird. Die nicht porosierte Referenz wird im Vergleich zu der Probe mit sphärischen Poren zu hoch eingeschätzt. Ohne Berücksichtigung der nicht porierten Referenz, bewerten beide Thermoschockparametern die Probe mit den sphärischen Poren richtigerweise als die Probe mit der besten Thermoschockresistenz.

### 5.12 Verbesserung der Thermoschockresistenz durch Porosierung

Das Verbesserungspotential der Thermoschockresistenz von Cordierit-Keramik durch geeignete Porosierung wird anhand verschiedener Kenngrößen und deren prozentualen Verbesserungen bzw. Verschlechterungen dargestellt in Tabelle 29 dargestellt. Die Energiedichte pro Volumen wird anhand der ausgespeicherten Wärmemengen gemittelt über die Temperaturniveaus 200 °C und 400 °C sowie 400 °C und 600 °C sowie über die Zyklen und den Rohdichten der Probetypen berechnet. Dabei wird ein thermisches Energiespeichersystem angenommen, in das zwischen 200 °C und 600 °C Wärme ein- und ausgespeichert wird. Verglichen werden nur die Proben, die der nicht porierten Referenzprobe bei den zyklischen Thermoschockversuchen überlegen waren.

Tabelle 29: Kenngrößen zur Charakterisierung der mit 5 Vol.-% sphärischen oder zylindrischen (SPH 5 oder ZYL 5) sowie mit 20 Vol.-%s sphärischen (SPH 20) Porosierungsmitteln hergestellten Wärmespeichermassen und deren prozentualen Verbesserungen/Verschlechterungen gegenüber der nicht porierten Referenz.

Kenngröße	Symbol [Einheit]	Referenz (N.P)	SPH 5	SPH 20	ZYL 5
Energiedichte pro Volumen* [nutzbar]	w [kWh/m³]	155	147	124	147
Kritische Temperaturdifferenz	$\Delta T_c$ [K]	671	>730	>730	>730
Anteil intakter Proben bei 100 Zyklen mit $\Delta T = 670$ K	$\varphi$ [%]	100	63	100	88
Zyklenzahl bis Materialversagen mit $\Delta T = 670$ K	N (L>30 %) [-]	25	26	>100	56
Prozentuale Verbesserung/Verschlechterung gegenüber Referenzprobe					
Energiedichte pro Volumen* [nutzbar]	$\pm \Delta(w)$ [%]	-	-5	-20	-5
Kritische Temperaturdifferenz	$\pm \Delta(\Delta T_c)$ [%]	-	>9	>9	>9
Anteil intakter Proben bei 100 Zyklen mit $\Delta T = 670$ K	$\pm \Delta(\varphi)$ [%]	-	-38	0	-13
Zyklenzahl bis Materialversagen mit $\Delta T = 670$ K	$\pm \Delta(N (L>30 \%))$ [%]	-	4	>285	119

\*) System mit  $\Delta T = 400$  K zwischen 200 °C und 600 °C

## Ergebnisse

Mit den Proben, die mit 20 Vol.-% sphärischem Porosierungsmittel hergestellt werden kann auf Kosten einer Einbuße bei der volumenbezogenen Energiedichte um ca. 20 % die maximal erreichbare Zyklenzahl bis zum Materialversagen um über 285 % gesteigert werden, bei gleichzeitiger Erhöhung der kritischen Temperaturdifferenz um mehr als 9 %, wodurch höhere Anwendungstemperaturen möglich sind. Die Verbesserungen der kritischen Temperaturdifferenz und der Zyklenzahl bei den mit 5 Vol.-% zylindrischen und sphärischen Porosierungsmitteln hergestellten Proben werden durch die erhöhte Ausfallquote innerhalb der 100 Thermoschockzyklen aufgehoben, die eine erhebliche Beeinträchtigung in der Anwendung darstellt.

### 5.13 Einfluss der Bauteilgeometrie

Bei der Simulation des Thermoschocks eines 750 °C heißen Probekörper in 20 °C kaltem Wasser über einen Zeitraum von 120 s ist die vom Betrag her höchste Normalspannung die 3. Hauptspannung bzw. die minimale Hauptspannung. Sie ist somit in diesem Fall die nach der Normalspannungshypothese für spröde Materialien maßgebliche Größe.

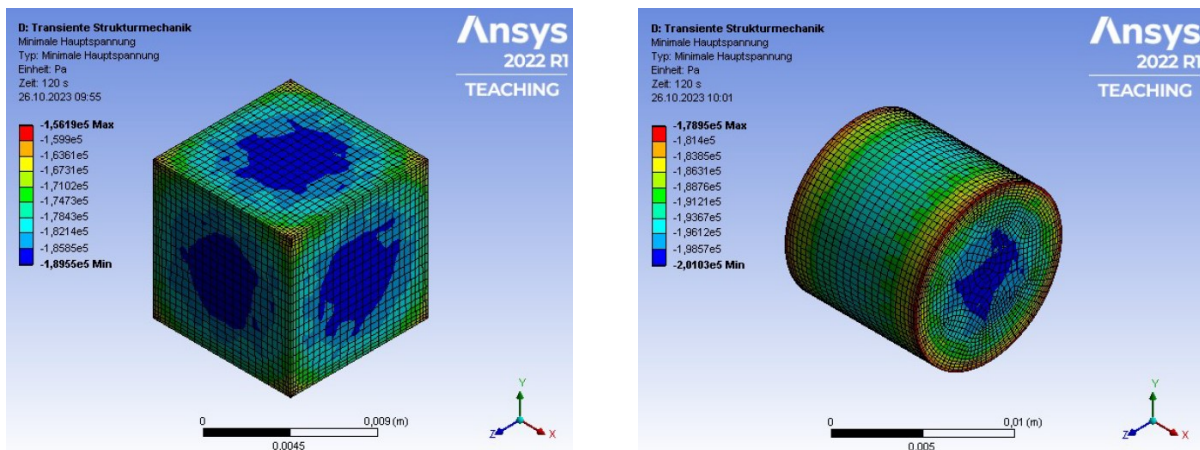


Abbildung 65: Spannungsprofil der 3. Hauptspannung bei der transienten Simulation eines Thermoschocks an kubischen (l) und zylindrischen (r) Geometrien.

Die im Bauteil resultierende Spannung kann zu Rissen und letztlich zum Materialversagen führen und dient somit als Maß für die Belastung durch den Thermoschock (Abbildung 65). Mit der hier durchgeführten Parametervariation der geometrischen Variablen Höhe  $h$ , dem Verhältnis von Höhe zu Dicke  $h/d$ , sowie der volumenspezifischen Oberfläche  $S_v$ , kann die

## Ergebnisse

mögliche Abhängigkeit der Höhe der 3. Hauptspannung von diesen Einflussvariablen bei Thermoschockbedingungen beurteilt werden (Tabelle 30). Darüber hinaus wird der Größeneinfluss der Probe bzw. der Einfluss des Maßstabs bewertet. Im weiteren Verlauf wird die 3. Hauptspannung stets als Betrag ohne negatives Vorzeichen verwendet. An Kanten und Ecken laufen Oberflächen zusammen, so dass an diesen mehrseitig von freier Oberfläche umgebenen Volumenelementen eine größere Kontaktfläche zum Wasser vorliegt als bei einem vergleichbar großen Volumenelement, das nur einseitig von einer Kontaktfläche begrenzt wird. Dadurch kommt es in diesen Bereichen zu stärkeren Temperaturgradienten, die wiederum zu höheren Spannungen führen können (Abbildung 65).

Tabelle 30: Maximale Beträge der 3. Hauptspannung (HS) und die Werte der möglichen Einflussvariablen Körperhöhe  $h$ , das Verhältnis von Höhe zu Dicke  $h/d$ , Volumen  $V$ , Körperoberfläche  $S$  sowie die volumenspezifische Oberfläche  $S_v$  für alle Probetypen und Maßstäbe.

Probtyp	3.HS  [MPa]	h [mm]	h/d [-]	V [cm <sup>3</sup> ]	S [cm <sup>2</sup> ]	S <sub>v</sub> [1/m]
1qua1,0	1,41	10	1,00	1	6	600
2qua1,0	1,74	20	2,00	2	10	500
8qua1,0	2,19	80	8,00	8	34	425
1qua2,5	4,65	25	1,00	16	38	240
2qua2,5	4,82	50	2,00	31	63	200
8qua2,5	5,26	200	8,00	125	213	170
1qua25	7,09	250	1,00	15625	3750	24
2qua25	5,77	500	2,00	31250	6250	20
8qua25	4,82	2000	8,00	125000	21250	17
1zyl1,0	1,55	10	0,89	1	6	554
2zyl1,0	1,34	20	1,77	2	9	454
8zyl1,0	1,70	80	7,09	8	30	379
1zyl2,5	4,82	25	0,89	16	35	222
2zyl2,5	4,28	50	1,77	31	57	182
8zyl2,5	4,64	200	7,09	125	190	152
1zyl25	7,07	250	0,89	15625	3466	22
2zyl25	6,75	500	1,77	31250	5681	18
8zyl25	4,58	2000	7,09	125000	18975	15

## Ergebnisse

Bei der Auftragung der 3. Hauptspannung in Abhängigkeit von der Probenhöhe  $h$  wird ein Größeneffekt deutlich. Bei einem im Maßstab vergrößerten Bauteil wird durch den Thermoschock eine höhere Spannung erzeugt. Dieser Effekt verhält sich nicht linear. Der Effekt ist bei einer Maßstabsvergrößerung von 1,0 zu 2,5 deutlich stärker als bei der Maßstabsvergrößerung von 2,5 zu 25. Es kommt dort bei den Proben mit einer Höhe von 2000 mm und dem Maßstab 25 zu einer Umkehr des Effekts, so dass die resultierenden Spannungen der zylindrischen und quaderförmigen Probekörper unterhalb der Spannung der Probekörper mit einer Höhe von 200 mm und einem Maßstab von 2,5 liegen.

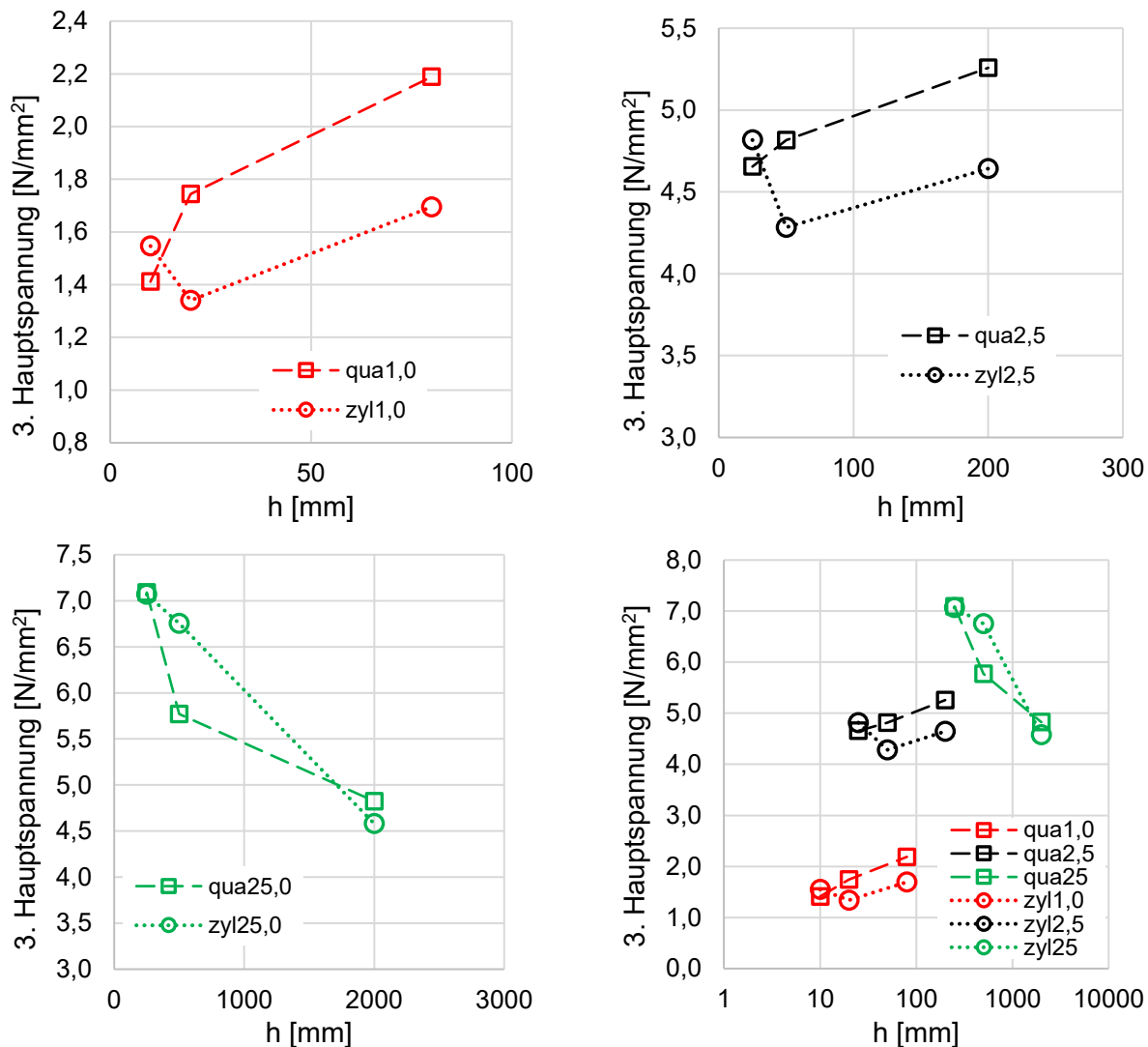


Abbildung 66: Durch den Thermoschock resultierende maximale Spannungen in den quaderförmigen (qua) und zylindrischen Probekörpern mit den Maßstäben 1:1 (o.l.), 2,5:1 (o.r.) und 25:1 (u.l.) in Abhängigkeit der Probenhöhe  $h$ . Darstellung aller Maßstäbe in einer Graphik (u.r.) mit logarithmischer Skalierung der Abszisse.

## Ergebnisse

Die Empfindlichkeit der resultierenden 3. Hauptspannung gegenüber einer Variation der Höhe des Probekörpers nimmt mit steigendem Maßstab und somit steigender Größe des Körpers ab. Daher dient zur übersichtlicheren Darstellung aller Probetypen in einer Graphik eine logarithmische Abszisse (Abbildung 66, u.r.).

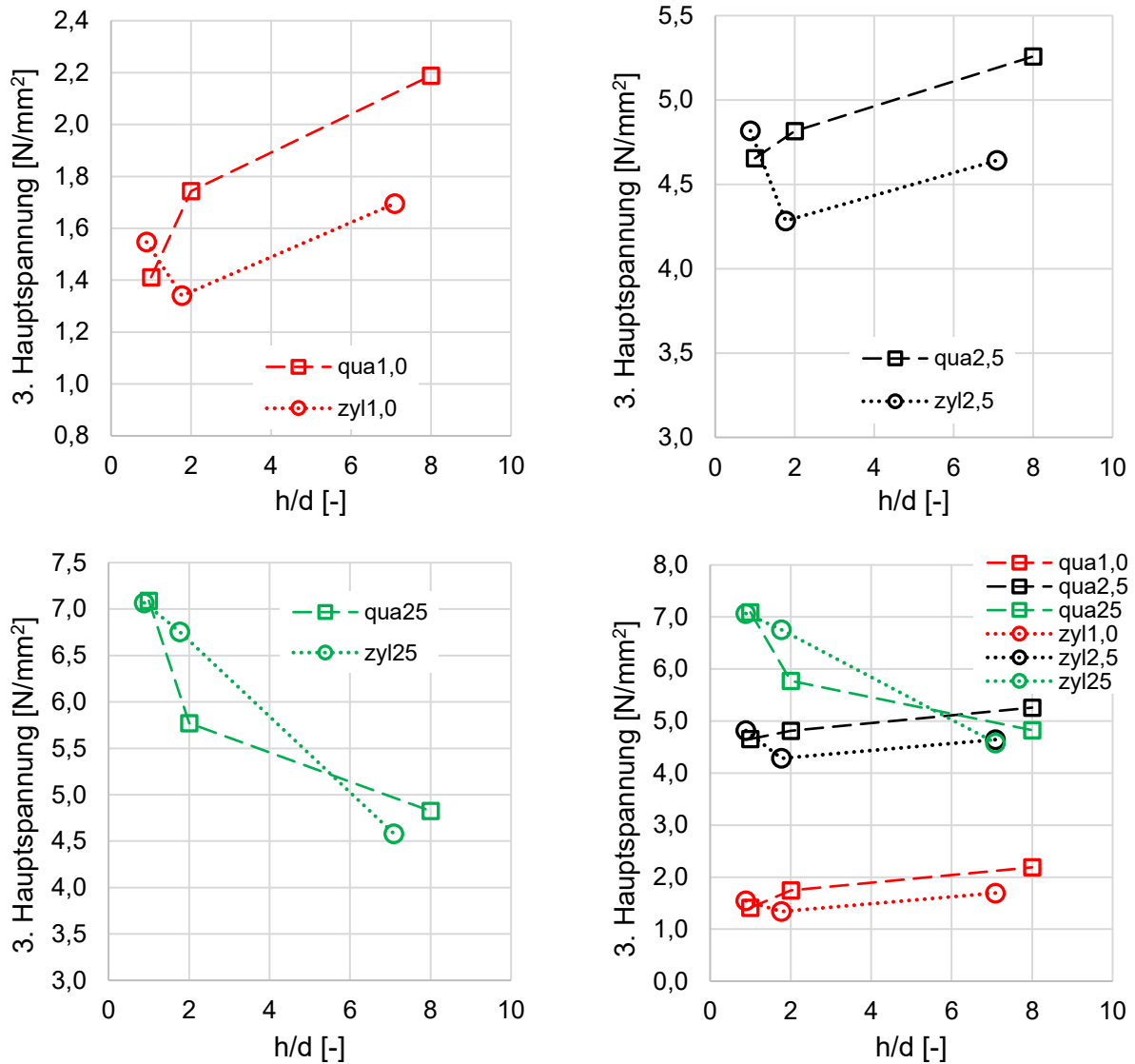


Abbildung 67: Durch den Thermoschock resultierende maximale Spannungen in den quaderförmigen (qua) und zylindrischen Probekörpern mit den Maßstäben 1:1 (o.l.), 2,5:1 (o.r.) und 25:1 (u.l.) in Abhängigkeit vom Verhältnis von Höhe zu Dicke  $h/d$  h. Darstellung aller Maßstäbe in einer Graphik (u.r.) mit linear skaliertter Abszisse.



Bei den quaderförmigen Proben steigt bei den Maßstäben 1,0 und 2,5 beim Thermoschock die 3. Hauptspannung mit steigender Probenhöhe  $h$  an, wohingegen bei der deutlich größeren Probe mit Maßstab 25 eine steigende Probenhöhe zu einer Reduzierung der 3. Hauptspannung führt. Bei den zylinderförmigen Proben im Maßstab 1,0 und 2,5 sinkt die resultierende 3. Hauptspannung zunächst bei einer Vergrößerung der Probenhöhe  $h$  und steigt danach an. Die zylindrische Probe im Maßstab 25 zeigt eine lineare Verringerung der 3. Hauptspannung bei steigender Probenhöhe.

Die Auftragung der 3. Hauptspannung in Abhängigkeit der Verhältnisse von Probenhöhe zu Probendicke  $h/d$  ist für alle Probetypen ohne logarithmisch skalierte  $x$ -Achse übersichtlich darstellbar, da der Verlauf der berechneten Werte im Vergleich zur Auftragung gegen die Probenhöhe  $h$  entlang der  $x$ -Achse breiter ausgedehnt vorliegt (Abbildung 67). Der qualitative Zusammenhang ist somit ähnlich. Bei dieser Auftragung liegen für die geometrischen Grundformen Zylinder und Quader die Werte der 3. Hauptspannung nach Maßstab gestapelt auf einem  $h/d$ -Wert, weshalb hier der Größeneffekt besonders deutlich wird.

Bei Betrachtung der 3. Hauptspannung in Abhängigkeit von der volumenspezifischen Oberfläche  $S_v$  zeigt sich mit steigender volumenspezifischer Oberfläche  $S_v$  eine Abnahme der zugehörigen  $h/d$ -Werte (Abbildung 68). Auch hier ist insbesondere bei der Auftragung aller Maßstäbe in einer Graphik ein deutlicher Maßstabseinfluss zu erkennen. Mit steigender volumenspezifischer Oberfläche  $S_v$  sinkt bei den zylindrischen Proben für die Maßstäbe 1,0 und 2,5 zunächst die resultierende Spannung und steigt dann wieder. Bei den Maßstäben 1,0 und 2,5 sinkt die 3. Hauptspannung mit steigender volumenspezifischer Oberfläche für die Körper mit Quaderform. Die resultierende Spannung zylindrischer und quaderförmiger Körper steigt für beide Grundgeometrien mit steigender volumenspezifischer Oberfläche  $S_v$ . Trotz der leichten Unterschiede im Spannungsverlauf in Abhängigkeit von den hier betrachteten geometrischen Parametern Höhe  $h$ , dem Höhe-zu-Dicke-Verhältnis  $h/d$  und der volumenspezifischen Oberfläche  $S_v$ , lässt sich kein eindeutiger Einfluss der Grundform „quaderförmig“ und „zylindrisch“ auf die resultierenden 3. Hauptspannungen feststellen. Besonders deutlich wird der Größeneffekt,

## Ergebnisse

der mit dem steigenden Maßstab einhergeht. Die durch den Thermoschock resultierenden thermischen Spannungen im Probekörper erhöhen sich mit dem Maßstab.

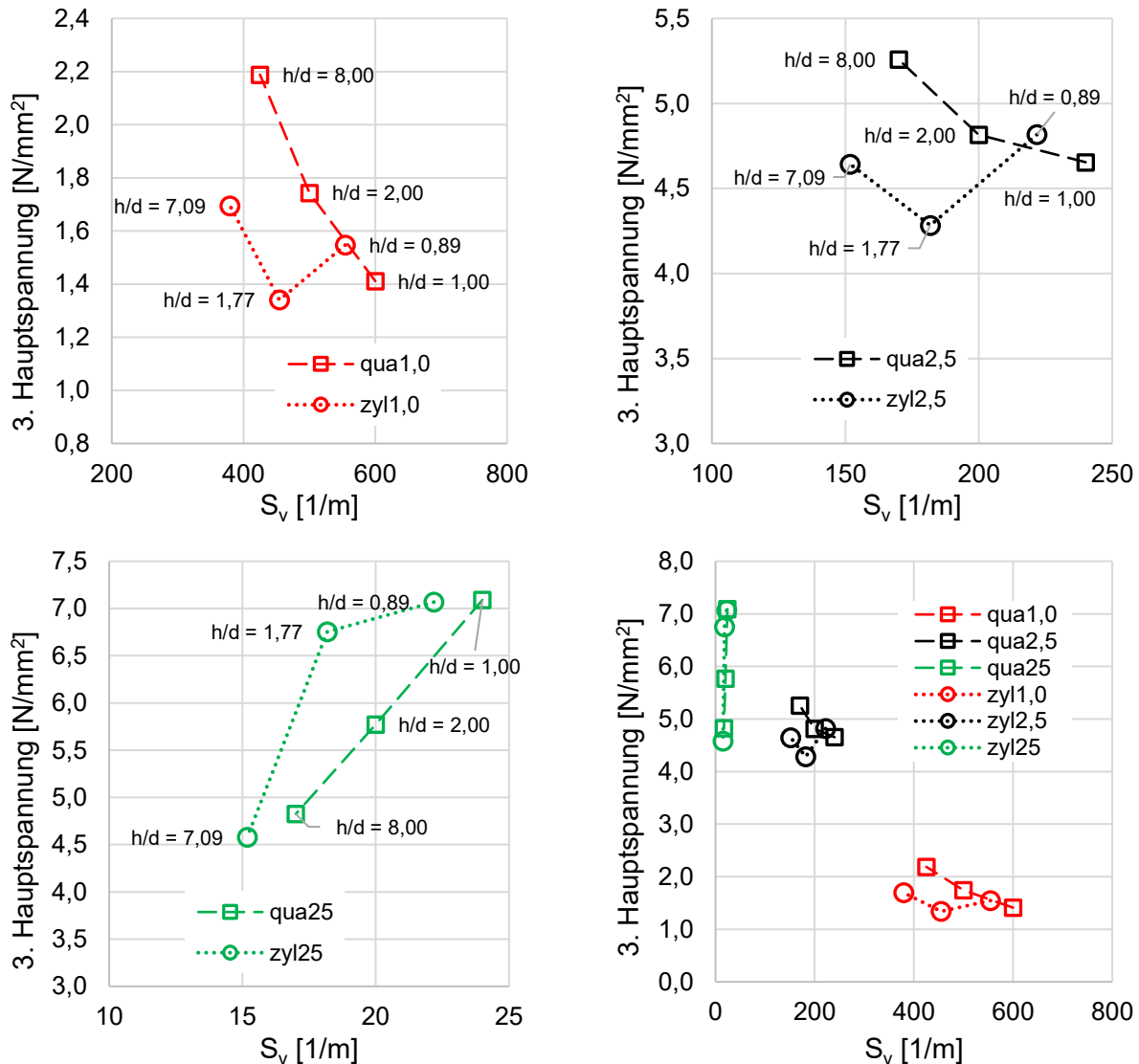


Abbildung 68: Durch den Thermoschock resultierende 3. Hauptspannungen (maximale Spannungen) in den quaderförmigen (qua) und zylindrischen Probekörpern mit den Maßstäben 1:1 (o.l.), 2,5:1 (o.r.) und 25:1 (u.l.) in Abhängigkeit von der volumenspezifischen Oberfläche  $S_v$ . Darstellung aller Maßstäbe in einer Graphik (u.r.) mit linear Skalierung der Abszisse. Bei den Darstellungen mit je einem einzelnen Maßstab in der Graphik sind zu Vergleichszwecken die zugehörigen Werte des Verhältnisses von Höhe zu Dicke  $h/d$  angegeben.

Mit steigendem Maßstab verringert sich die volumenspezifische Oberfläche. Es gibt keine vollständig eindeutige Korrelation zwischen der Größe der volumenspezifischen Oberfläche und der Schwere der Thermoschockbelastung, da die resultierenden

## Ergebnisse

Spannungen im hier betrachteten Fall bei den großen Maßstäben mit steigender volumenspezifischer Oberfläche  $S_v$  steigen und bei kleinen Maßstäben sinken. Bei den zylinderförmigen Proben zeigt sich bei den kleinen Maßstäben keine eindeutige Tendenz. Das gilt ebenso für das Verhältnis von Höhe zu Dicke  $h/d$  und die Probenhöhe  $h$ . Allerdings wirken sich diese voneinander abhängigen Parameter auf die Schwere des Thermoschocks aus, so dass bei den hier gewählten Grundformen „Quader“ und „Zylinder“ zumindest in der Tendenz kleinere Probekörper, mit geringer Höhe  $h$ , geringem Verhältnis von  $h/d$  und großer volumenspezifischer Oberfläche  $S_v$  in der Mehrzahl der Fälle eine geringere Thermoschockbelastung erfahren.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen werden die Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen der experimentell durchgeführten Thermoschocks und den daraus resultierenden Verlusten der Druckfestigkeit verglichen. Dazu wurden quaderförmige und zylindrische Proben hergestellt, bei denen entweder das Volumen auf  $400 \text{ mm}^3$  und  $1600 \text{ mm}^3$  oder die Höhen (Extrusionslängen) auf 10 bzw. 40 mm konstant gehalten wurden. Die Grundflächen der Probekörper wurden nach dem Sintern mittels Lichtmikroskopie bestimmt (Abbildung 69).

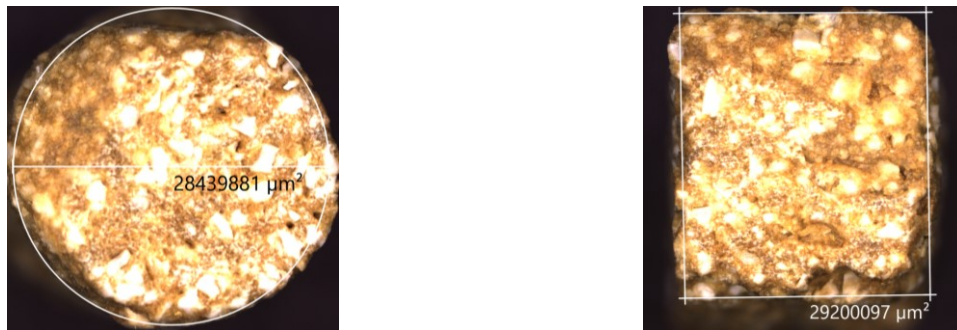


Abbildung 69: Lichtmikroskopische Bestimmung der kreisförmigen (l) und quadratischen (r) Grundflächen der zylindrischen und quaderförmigen Probekörper.

Die Höhen wurden nach dem Sägen und Schleifen mit einer Messschraube bestimmt. Von jedem Probetyp, d.h. einem Probekörper mit festem Volumen und fester Höhe und mit fester Grundform, wurden je 5 Proben ohne Thermoschockeinfluss und 5 Proben nach einem Thermoschock im  $20^\circ \text{C}$  kalten Wasserbad mit einer Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 730 \text{ K}$  nach erfolgter Rücktrocknung einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen und der

## Ergebnisse

prozentuale relative Verlust L der Druckfestigkeit als Maßstab für die Belastung durch den Thermoschock betrachtet (Tabelle 31 und Tabelle 32).

Tabelle 31: Werte für die Grundfläche A, die Probenhöhe h, das Probenvolumen V, das Verhältnis von Höhe zu Dicke h/d, die Bruchkraft beim der Druckfestigkeitsprüfung F, die Druckfestigkeit  $\sigma_{DF}$  und der relative Verlust der Druckfestigkeit durch den Thermoschock L für quaderförmige Proben.

Probetyp	Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]	h/d [-]	F [N]	$\sigma_{DF}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	L [%]
q1NG	q1	29912144	29,9	12,4	370	2,26	1155,5	38,6	16,92
q1NG	q2	28287598	28,3	12,3	347	2,31	1052,3	37,2	
q1NG	q3	29534066	29,5	11,3	334	2,08	1144,2	38,7	
q1NG	q4	28380647	28,4	11,8	335	2,22	738,5	26,0	
q1NG	q5	30271528	30,3	11,1	337	2,02	936,9	30,9	
q1TS	q6	30447291	30,4	10,6	322	1,92	823	27,0	
q1TS	q7	29733326	29,7	10,3	305	1,88	650	21,9	
q1TS	q8	28516803	28,5	11,8	336	2,21	797,9	28,0	
q1TS	q9	31076842	31,1	12,3	383	2,21	977,7	31,5	
q1TS	q10	27752333	27,8	11,4	317	2,17	948,9	34,2	
q2NG	q11	29969475	30,0	45,5	1362	8,30	667,7	22,3	24,22
q2NG	q12	29907173	29,9	45,5	1360	8,32	609,8	20,4	
q2NG	q13	28441280	28,4	44,9	1277	8,42	860,9	30,3	
q2NG	q14	29200097	29,2	45,9	1341	8,50	910,8	31,2	
q2NG	q15	28982772	29,0	43,8	1270	8,14	815	28,1	
q2TS	q16	28183486	28,2	46,0	1297	8,67	439,4	15,6	
q2TS	q17	32047726	32,0	43,8	1402	7,73	703,5	22,0	
q2TS	q18	28764146	28,8	43,9	1262	8,18	696,7	24,2	
q2TS	q19	30105733	30,1	43,5	1308	7,92	755,7	25,1	
q2TS	q20	30252861	30,3	46,2	1397	8,39	404,2	13,4	
q3NG	q21	30171086	30,2	9,8	297	1,79	1282	42,5	17,28
q3NG	q22	30221931	30,2	9,5	286	1,72	1213,1	40,1	
q3NG	q23	28539983	28,5	9,2	261	1,71	1082,8	37,9	
q3NG	q24	29774672	29,8	8,9	265	1,63	706,6	23,7	
q3NG	q25	31493948	31,5	10,6	333	1,89	1377,2	43,7	
q3TS	q26	31006561	31,0	10,0	309	1,79	1063,8	34,3	
q3TS	q27	27360866	27,4	9,2	251	1,76	758,4	27,7	
q3TS	q28	29365817	29,4	10,5	309	1,94	903,9	30,8	
q3TS	q29	28583082	28,6	10,7	305	2,00	809,8	28,3	
q3TS	q30	30407569	30,4	9,6	292	1,74	1046	34,4	
q4NG	q31	28973228	29,0	42,8	1239	7,94	538,3	18,6	23,75
q4NG	q32	31928860	31,9	39,6	1265	7,01	1003,8	31,4	
q4NG	q33	28103475	28,1	39,2	1101	7,39	711	25,3	
q4NG	q34	29533111	29,5	36,5	1078	6,72	795,3	26,9	
q4NG	q35	29546717	29,5	39,4	1163	7,24	822,3	27,8	
q4TS	q36	29443356	29,4	36,0	1058	6,63	653,4	22,2	
q4TS	q37	30149509	30,1	42,5	1280	7,73	489,3	16,2	
q4TS	q38	27632961	27,6	36,8	1018	7,01	494,4	17,9	
q4TS	q39	29925985	29,9	38,2	1142	6,98	833,7	27,9	
q4TS	q40	29841002	29,8	35,8	1067	6,55	447,9	15,0	

## Ergebnisse

Tabelle 32: Werte für die Grundfläche A, die Probenhöhe h, das Probenvolumen V, das Verhältnis von Höhe zu Dicke h/d, die Bruchkraft beim der Druckfestigkeitsprüfung F, die Druckfestigkeit  $\sigma_{DF}$  und der relative Verlust der Druckfestigkeit durch den Thermoschock L für die zylindrischen Proben.

Probetyp	Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]	h/d [-]	F [N]	$\sigma_{DF}$ [N/ $\text{mm}^2$ ]	L [%]
z1NG	z1	28651246	28,7	11,4	327	1,89	675,3	23,6	17,85
z1NG	z2	27548700	27,5	11,7	322	1,97	797,8	29,0	
z1NG	z3	29510291	29,5	11,3	333	1,84	876,5	29,7	
z1NG	z4	27909280	27,9	11,2	311	1,87	777	27,8	
z1NG	z5	27885531	27,9	11,0	307	1,85	963,2	34,5	
z1TS	z6	28558468	28,6	11,5	329	1,91	796,5	27,9	
z1TS	z7	28174968	28,2	11,9	336	1,99	719,3	25,5	
z1TS	z8	28951901	29,0	11,1	322	1,83	537,6	18,6	
z1TS	z9	27890194	27,9	10,9	305	1,83	652,1	23,4	
z1TS	z10	28439881	28,4	12,1	345	2,02	666,3	23,4	
z2NG	z11	27472321	27,5	45,9	1262	7,77	740,7	27,0	23,61
z2NG	z12	28097625	28,1	45,1	1266	7,53	585,8	20,8	
z2NG	z13	27475415	27,5	47,8	1314	8,08	682,2	24,8	
z2NG	z14	28125485	28,1	45,0	1265	7,51	776,8	27,6	
z2NG	z15	28190895	28,2	46,7	1317	7,80	730,7	25,9	
z2TS	z16	27644213	27,6	45,1	1248	7,61	686,4	24,8	
z2TS	z17	28523293	28,5	45,9	1310	7,62	510	17,9	
z2TS	z18	28457150	28,5	47,7	1358	7,93	533	18,7	
z2TS	z19	27647309	27,6	44,0	1216	7,41	513,4	18,6	
z2TS	z20	29118196	29,1	46,5	1354	7,64	477	16,4	
z3NG	z21	27575754	27,6	10,3	285	1,74	819	29,7	14,59
z3NG	z22	27629781	27,6	10,5	290	1,77	686,3	24,8	
z3NG	z23	28150049	28,2	9,9	279	1,65	916	32,5	
z3NG	z24	28479787	28,5	10,9	310	1,81	963,5	33,8	
z3NG	z25	29011306	29,0	1,2	36	0,20	947,8	32,7	
z3TS	z26	28155873	28,2	9,3	262	1,55	761,1	27,0	
z3TS	z27	27210308	27,2	9,1	247	1,54	594,8	21,9	
z3TS	z28	27925756	27,9	10,7	297	1,79	845	30,3	
z3TS	z29	27947898	27,9	10,2	284	1,70	841,5	30,1	
z3TS	z30	28536467	28,5	10,5	299	1,74	625,5	21,9	
z4NG	z31	28871049	28,9	40,7	1175	6,71	778,4	27,0	22,30
z4NG	z32	27297310	27,3	37,2	1014	6,30	569,1	20,8	
z4NG	z33	27611441	27,6	37,2	1028	6,28	685,6	24,8	
z4NG	z34	27505433	27,5	38,4	1056	6,49	644,5	23,4	
z4NG	z35	27183469	27,2	40,0	1087	6,80	704,6	25,9	
z4TS	z36	27643386	27,6	40,1	1110	6,77	397	14,4	
z4TS	z37	28956223	29,0	38,5	1114	6,34	683,9	23,6	
z4TS	z38	28550465	28,6	39,9	1139	6,62	501,1	17,6	
z4TS	z39	28734047	28,7	40,2	1156	6,65	513,8	17,9	
z4TS	z40	29120702	29,1	40,7	1186	6,69	622,6	21,4	

## Ergebnisse

Die Probenbezeichnungen setzen sich folgendermaßen zusammen: q: quaderförmig, 1: Soll-Volumen 400 mm<sup>3</sup>, 2 Soll-Volumen 1600 mm<sup>3</sup>, 3: Soll-Höhe 10 mm, 4: Soll-Höhe 40 mm, NG: nicht geschockt, TS: thermisch geschockt (Tabelle 31 und Tabelle 32).

Beim Auftragen des relativen Druckfestigkeitsverlustes in Abhängigkeit vom Verhältnis von Höhe zu Dicke  $h/d$ , in Abhängigkeit zur Probenhöhe  $h$  und in Abhängigkeit zum Volumen  $V$  zeigt sich ein fast identischer Verlauf (Abbildung 70 und Abbildung 71). Die Ursache dafür ist, dass aufgrund der verwendeten Extrusionsmundstücke die Grundflächen aller quaderförmigen und zylindrischen Proben näherungsweise konstant sein sollten. Qualitative Abweichungen im Verlauf der Messwerte zwischen den beiden Auftragungen sind maßgeblich durch Schwankungen in den Probenhöhen erklärbar.

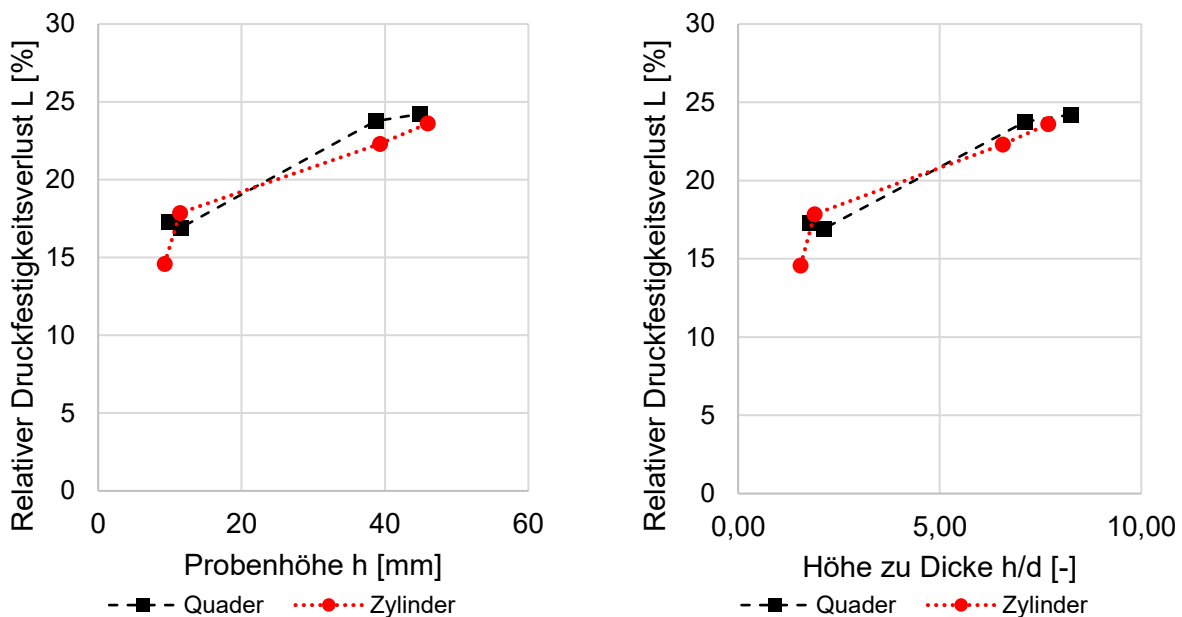


Abbildung 70: Durch den Thermoschock resultierende, experimentell ermittelte relative Druckfestigkeitsverluste  $L$  bei den quaderförmigen und zylindrischen Probekörpern in Abhängigkeit zur Probenhöhe  $h$  (I) und zum Verhältnis von Höhe zu Dicke.

Die Auftragung der relativen Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der volumenspezifischen Oberfläche  $S_v$  zeigt einen gespiegelten Verlauf der Auftragungen von  $L$  in Abhängigkeit von  $h$ ,  $h/d$  oder  $V$ .

## Ergebnisse

Bei den Proben steigt der relative Druckfestigkeitsverlust grundsätzlich mit einem Anstieg von  $h$ ,  $h/d$  und  $V$  sowie einem Absinken von  $S_v$ . Das entspricht grundsätzlich dem Verlauf bei der Simulation für die aus dem Thermoschock resultierenden Spannungen in Abhängigkeit von  $h$ ,  $h/d$  und  $V$  für Proben im kleinen Maßstab von 1,0 und 2,5. Die Größenordnung der Proben für die experimentellen Versuche liegt im Bereich des Maßstabs 1,0 der simulierten Probekörper. Die bei den Simulationen entstehenden Spannungen sind nicht direkt mit dem Festigkeitsverlust gleichzusetzen, jedoch kann die resultierende Spannung als Ursache und der Festigkeitsverlust als mögliche Wirkung angesehen werden. Folglich sollte es bei ausreichend starker resultierender Spannung zu vergleichbaren qualitativen Verläufen kommen.

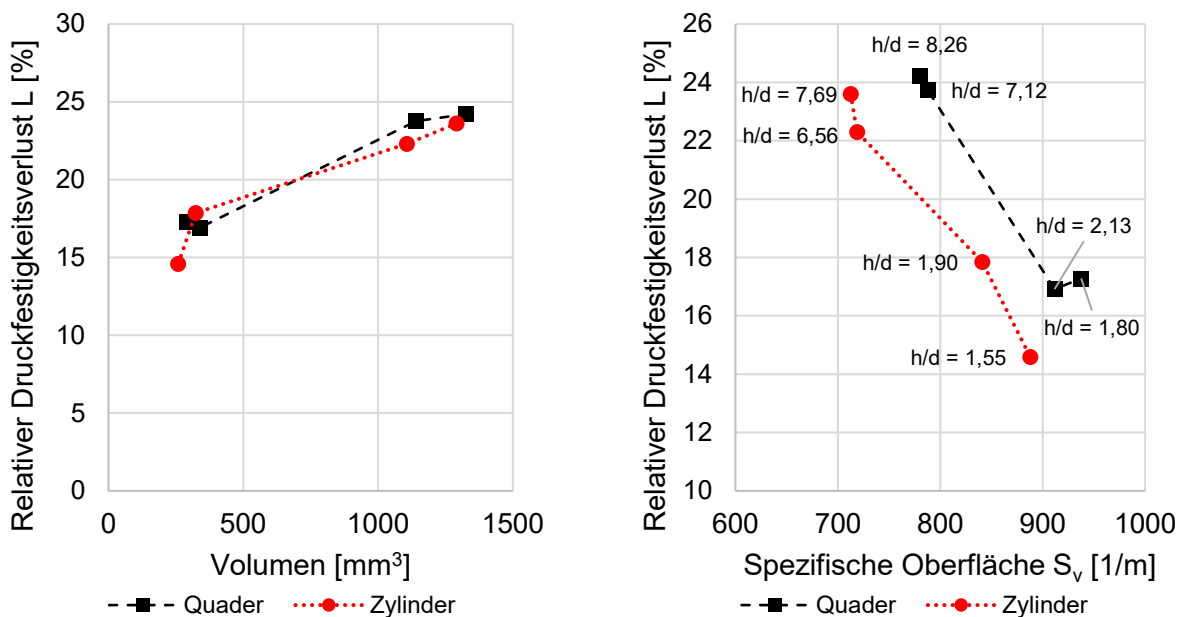


Abbildung 71: Durch den Thermoschock resultierende, experimentell ermittelte relative Druckfestigkeitsverluste  $L$  bei den quaderförmigen und zylindrischen Probekörpern in Abhängigkeit von der Probenhöhe  $h$  (l) und dem Verhältnis von Höhe zu Dicke.

Bei den durchgeführten Simulationen gibt es bei den Maßstäben 1,0 und 2,5 entgegen dem allgemeinen Trend einen Sonderfall bei den zylindrischen Proben, wobei die resultierende Spannung beim Anstieg von  $h$ ,  $h/d$  und  $V$  zunächst sinkt und dann wieder ansteigt. Bei den experimentellen Proben tritt dieser Sonderfall ebenfalls auf, und zwar bei der Auftragung des relativen Druckfestigkeitsverlusts  $L$  in Abhängigkeit von  $h$ ,  $h/d$  und  $V$ .

## Ergebnisse

Dabei sinkt relative Druckfestigkeitsverlust  $L$  mit steigendem  $h$ ,  $h/d$  und  $V$  und steigt dann wieder an, bei weiterer Erhöhung dieser Parameter. Im Gegensatz zur Simulation zeigen dieses Verhalten nicht die zylindrischen, sondern die quaderförmigen Proben. Das anfängliche Absinken des relativen Druckfestigkeitsverlusts  $L$  beim Erhöhen von  $h$ ,  $h/d$  oder  $V$  bei den quaderförmigen Proben findet von 17,18 % auf 16,92 % statt. Diese Diskrepanz kann aufgrund der Streuung der Druckfestigkeits-Messwerte resultieren, insbesondere wenn der Einfluss von  $h$ ,  $h/d$  und  $V$  in diesem Bereich nur einen kleinen Effekt auf den relativen Druckfestigkeitsverlust haben sollten. Im hier betrachteten Fall zeigen die Druckfestigkeitsprüfungen grundsätzlich eine eher höhere Streuung (Abbildung 72).

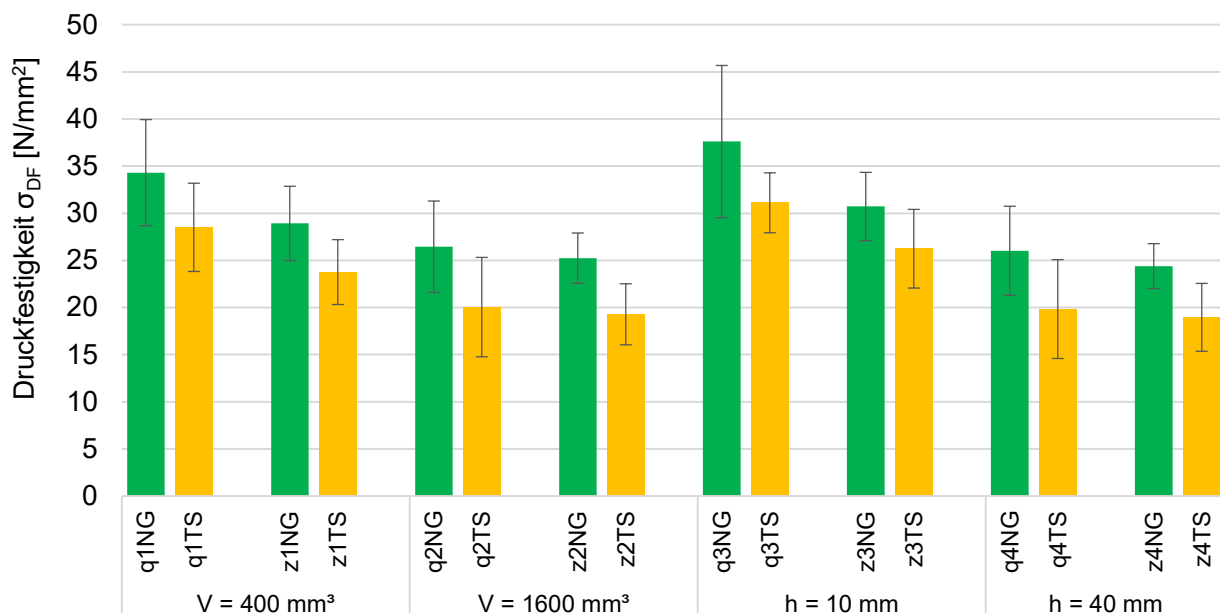


Abbildung 72: Druckfestigkeiten der quaderförmigen (q) und zylindrischen (z) Körper ohne (NG) und mit (TS) Thermoschockbelastung für Probekörper mit einem Soll-Volumen von 400 mm³ (1) und 1600 mm³ (2) oder einer Soll-Höhe von 10 mm (3) und 40 mm (4).

Die nicht geschockten quaderförmigen Proben zeigen grundsätzlich etwas höhere Druckfestigkeiten als die zylindrischen Proben. Die Druckfestigkeiten der nicht geschockten Proben sind für quaderförmige und zylindrische Proben tendenziell bei kleineren Höhen  $h$  und kleineren Volumina  $V$  größer.



Mit der hier durchgeführten Simulationsmethodik sind exakte quantitative Voraussagen zum realen Verhalten nicht vorhersagbar. Es können allerdings grundlegende Tendenzen beim Einfluss der Probengeometrie auf das Thermoschockverhalten abgeschätzt werden, die jedoch stets mit experimentellen Versuchen gegengeprüft werden sollten.

## **6 Diskussion und Zusammenfassung**

### **6.1 Güte und Vergleichbarkeit der porosierten Proben**

Gemäß der Erwartung weist die ohne Porosierungsmittel hergestellte Referenzprobe mit 0,657 W/(mK) eine höhere Scherbenwärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, \text{tr}}$  auf, als die porosierten Proben. Die Höhe der Scherbenwärmeleitfähigkeit ist nicht nur nach der Menge des verwendeten Porosierungsmittels, sondern auch nach der Form der Poren gestaffelt. Innerhalb der porosierten Proben weisen die Proben mit sphärischen Poren die größte  $\lambda_{10, \text{tr}}$  auf, gefolgt von den Proben mit kubischen und zylindrischen Poren. Die mittleren Scherbenwärmeleitfähigkeiten liegen für die Proben mit sphärischen, kubischen und zylindrischen Proben für 5 Vol.-% verwendetem Porosierungsmittel bei 0,627, 0,588 und 0,550 W/(mK), für 10 Vol.-% verwendetem Porosierungsmittel bei 0,587, 0,566 und 0,451 W/(mK), für 15 Vol.-% verwendetem Porosierungsmittel bei 0,553, 0,500 und 0,432 W/(mK) und für 20 Vol.-% verwendetem Porosierungsmittel bei 0,527, 0,395 und 0,375 W/(mK). Eine mögliche Ursache für diese Diskrepanzen ist die in Kap. 5.3 festgestellte Vorzugsorientierung der Zylinderporen in Extrusionsrichtung. Allerdings zeigen die Proben mit kubischen Poren ebenfalls geringere Werte als die Proben mit sphärischen Poren. Da die kubischen Poren näherungsweise würfelförmig sind, sind sie eher mit den kugelsymmetrischen sphärischen Poren vergleichbar als mit den zylinderförmigen Poren, die eine deutliche längste laterale Ausdehnung zeigen. Aufgrund geometrischer Beschränkungen bei der Formgebung, wurde die Scherbenwärmeleitfähigkeit in dieser Arbeit nur in Richtung der z-Achse und für eine Probenmitteltemperatur von 10 °C bestimmt. In zukünftigen Untersuchungen sollten daher mittels Hot-Disk-Methode oder Laser-Flash-Analyse die Richtungs- und Temperaturabhängigkeit der Scherbenwärmeleitfähigkeit näher untersucht werden.

Die mittleren Rohdichten der porosierten Proben liegen mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe bei  $1,83 - 1,84 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,73 - 1,74 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,64 \text{ g/cm}^3$  und  $1,54$  bis  $1,55 \text{ g/cm}^3$  und somit sehr nahe zusammen. Alle porosierten Proben zeigen erwartungsgemäß eine geringere Rohdichte als die nicht mit Porosierungsmittel hergestellte Referenzprobe mit einem mittleren Wert von  $1,94 \text{ g/cm}^3$ . Bei den Reindichten zeigt sich bei den porosierten Proben mit zunehmendem Porosierungsmittelanteil bei der Herstellung ein maßvoller Anstieg. Die mittleren Reindichten liegen für die verwendeten Porosierungsmittelanteile von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% bei  $2,51 - 2,52 \text{ g/cm}^3$ ,  $2,55 - 2,56 \text{ g/cm}^3$ ,  $2,58 - 2,59 \text{ g/cm}^3$  und  $2,59 - 2,60 \text{ g/cm}^3$ , während die ohne Porosierungsmittel hergestellten Referenzproben im Mittel eine Reindichte von  $2,47 \text{ g/cm}^3$  aufweisen. Eine mögliche Ursache für diesen Effekt ist eine stärkere Verdichtung der Rohmasse bei der Extrusion, die durch den Zuschlag des Porosierungsmittels hervorgerufen wird. Dafür spricht auch die Abnahme der intrinsischen Poren mit steigendem Porosierungsmittelzuschlag (Kap. 6.2).

Die eingesetzten Porosierungsmittel zeigen eine gute Übertragbarkeit ihrer Korngeometrie auf die resultierende Porengeometrie nach dem Entbindern. Quantitativ lässt sich das am Vergleich zwischen der volumengewichteten Korngrößenverteilung und der volumengewichteten Porengrößenverteilung feststellen. Der x50-Werte der kubischen und zylindrischen Poren mit  $3,42 \text{ mm}^3$  und  $3,38 \text{ mm}^3$  liegen nahe bei den x50-Werten der entsprechenden Porosierungsmittelkörner mit  $3,35 \text{ mm}^3$  und  $3,34 \text{ mm}^3$ . Die Übereinstimmung liegt bei den Mittelwerten  $V_{sp,m}$  noch etwas höher. Dort zeigen die kubischen und zylindrischen Porosierungsmittelkörner mittlere Volumina von  $3,36 \text{ mm}^3$  und  $3,35 \text{ mm}^3$ , die fast identisch zu den mittleren Volumina der resultierenden zugehörigen Poren mit  $3,35 \text{ mm}^3$  und  $3,36 \text{ mm}^3$  sind. Das Verhältnis der Volumina der sphärischen Porosierungsmittelkörner und den entsprechenden Poren ist hier ein Sonderfall, da die EPS-Kugeln sich beim Extrusionsvorgang verdichten. Es zeigt sich ein volumenbezogener Schrumpfungsfaktor von ca. 4-5, der berücksichtigt werden muss, um Poren mit den erwünschten Zielabmessungen zu erhalten. Der x50-Wert sowie das mittlere Einzelvolumen der sphärischen Poren ist daher mit  $3,35 \text{ mm}^3$  und  $3,16 \text{ mm}^3$  deutlich kleiner als die entsprechenden Werte der Porosierungsmittelkörner mit  $15,46 \text{ mm}^3$  und  $14,84 \text{ mm}^3$ . Das im Median (x50) angestrebte Einzelporenvolumen von  $3,375 \text{ mm}^3 \pm$

0,250 mm<sup>3</sup> ist somit erreicht worden. Zusammen mit der Rohdichte und der Reindichte, die innerhalb eines Porosierungsgrades nahe zusammen liegen variieren die Proben somit in erster Näherung durch ihre Porenform und den davon beeinflussten Kenngrößen.

### 6.2 Porosität

Der Anteil der durch das Porosierungsmittel eingebrachten extrinsischen Poren liegt bei den hergestellten Proben je nach Porosierungsmittel-Zugabe in einem ähnlichen Bereich. Der Anteil extrinsischer Poren liegt für die porosierten Proben mit sphärischen, kubischen und zylindrischen Proben mit 5 Vol.-% verwendetem Porosierungsmittel bei 4,93 – 5,37 Vol.-%, mit 10 Vol.-% verwendetem Porosierungsmittel bei 10,18 – 10,59 Vol.-%, für 15 Vol.-% verwendetem Porosierungsmittel bei 15,22 – 15,61 Vol.-% und für 20 Vol.-% verwendetem Porosierungsmittel bei 20,20 – 20,68 Vol.-%. Bei den intrinsischen Poren zeigt sich eine mäßige Abnahme mit steigendem Porosierungsmittelanteil bei der Herstellung. Die porosierten Proben weisen bei einer Porosierungsmittel-Zugabe von 5 Vol.-% Werte im Bereich von 21,57 – 21,83 Vol.-%, bei 10 Vol.-% Porosierungsmittel Werte von 21,63 – 21,78 Vol.-%, bei 15 Vol.-% Werte von 21,03 – 21,15 Vol.-% und bei 20 Vol.-% Porosierungsmittel Werte im Bereich von 19,97 – 20,23 Vol.-% auf. Da bei der ohne Porosierungsmittel hergestellten Referenzprobe keine extrinsisch eingebrachten Poren vorliegen, ist für sie der Wert der intrinsischen Poren gleich dem Wert der Gesamtporosität. Dieser liegt bei 21,57 Vol.-%.

Bei der Betrachtung der Anteile an offenen bzw. flutbaren und geschlossenen Poren zeigen sich bei den porosierten Proben je nach Porenform deutliche Unterschiede. Die Anteile der offenen Poren liegen bei einer Zugabe von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Porosierungsmittel für die Proben mit sphärischen und kubischen Poren mit 10,30 und 10,32 Vol.-%, 11,66 und 11,71 Vol.-%, 12,13 und 12,92 Vol.-% sowie 12,42 und 13,05 Vol.-% nahe zusammen. Die Proben mit zylindrischen Poren hingegen zeigen für eine Porosierungsmittel-Zugabe von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Anteile der offenen Poren von 11,70, 13,99, 15,53 und 16,06 Vol.-% und somit einen größeren Anteil an offenen Poren als die Proben mit sphärischen und kubischen Poren. Analog umgekehrt sind die Anteile der geschlossenen Poren bei den Proben mit sphärischen und kubischen Proben

größer als bei den Proben mit zylindrischen Poren. Eine mögliche Ursache ist die Vereinigung von offenen und geschlossenen Poren durch die zylindrischen Poren, die aufgrund ihrer langen lateralen Ausdehnung in eine Achsrichtung eine höhere Effizienz im Bilden von Perkulationspfaden aufweisen.

### **6.3 Einfluss der Porengeometrie auf die Thermoschockeigenschaften**

Bei den einfachen Thermoschockversuchen wird die kritische Temperaturdifferenz durch eine Porosierung der Cordierit-Keramik mit sphärischen und zylindrischen Poren bei allen Porosierungsgraden 5, 10, 15 und 20 Vol.-% gegenüber der nicht porierten Referenzprobe verbessert. Während die Referenzprobe eine kritische Temperaturdifferenz bei  $\Delta T_c = 671$  K aufweist, zeigen die Proben mit sphärischen und zylindrischen Poren auch bei einer Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 730$  K noch kein Materialversagen (relativer 3-Punkt-Biegefestigkeitsverlust  $L > 30$  %), so dass die kritischen Temperaturdifferenzen für alle Proben mit sphärischen Poren bei  $\Delta T_c > 730$  K liegen. Bei den Proben mit kubischen Poren wird die kritische Temperaturdifferenz nur bei den Porosierungsgraden mit 10 und 15 Vol.-% mit  $\Delta T_c = 701$  K und  $\Delta T_c = 718$  K gegenüber der Referenzprobe gesteigert. Die Proben mit Porosierungsgraden von 5 und 20 Vol.-% zeigen geringere kritische Temperaturdifferenzen gegenüber der Referenz mit  $\Delta T_c = 651$  K und  $\Delta T_c = 436$  K. Neben dem Porosierungsgrad ist hier ein deutlicher Einfluss der Porenform auf die Höhe von  $\Delta T_c$  festzustellen.

Bei der Beurteilung der Thermoschockeigenschaften nach der Norm DIN EN 820-3 gilt als Bewertungskriterium nur der relative Festigkeitsverlust, z.B. der 3-Punkt-Biegefestigkeitsverlust.<sup>83</sup> Durch die Porosierung werden im hier betrachteten Fall allerdings grundsätzlich die Festigkeiten zum Teil erheblich herabgesetzt. Die 3-Punkt-Biegezugfestigkeiten werden durch die Porosierung um den Bereich von 11,8 % (kubische Porosierung mit Porositätsgrad 5 Vol.-%) bis 85,1 % (zylindrische Poren mit Porositätsgrad 20 Vol.-%) verringert. Bei den Druckfestigkeiten findet gegenüber der nicht porierten Referenz eine Verringerung von 16,3 % (sphärische Porosierung mit Porositätsgrad 5 Vol.-%) bis 82, % (zylindrische Poren mit Porositätsgrad 20 Vol.-%).

Da die Wärmespeichermassen in einem technischen System in den meisten Fällen zyklisch beansprucht, weshalb die Charakterisierung mittels der zyklischen Thermoschockversuche eine gute Annäherung an die Anwendung darstellt. Mit porosierten Probetypen, die mit 5 und 20 Vol.-% Porosierungsmittel hergestellt wurden und nicht porosierten Referenzproben wurden die zyklischen Thermoschockversuche durchgeführt. Bei der nicht porosierten Referenzprobe verringert sich die 3-Punkt-Biegefestigkeit nach 100 zyklisch durchgeführten Thermoschocks bei einer Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 670 \text{ K}$  im Mittel von  $13,70 \text{ N/mm}^2$  auf  $3,82 \text{ N/mm}^2$ . Die Proben mit sphärischen Poren und einem Porositätsgrad von 20 Vol.-% weisen zu Beginn im nicht geschockten Zustand eine 3-Punkt-Biegefestigkeit von  $8,75 \text{ N/mm}^2$  auf, verringern sich im Mittel nach 100 Zyklen jedoch nur auf  $7,00 \text{ N/mm}^2$  und liegen damit sogar als Absolutwert oberhalb der 3-Punkt-Biegefestigkeit der Referenzprobe. Die grundsätzliche Verringerung der 3-Punkt-Biegefestigkeit durch die Porosierung wird in diesem Fall durch die bessere Thermoschockresistenz bei der zyklischen Belastung vollständig kompensiert. Der Probetyp mit 20 Vol.-% sphärischen Poren zeigt somit die beste Thermoschockbeständigkeit bei den zyklischen Thermoschockversuchen.

Entsprechend der interpolierten Werte für die Zyklenzahl bis zum Materialversagen, d.h. bis zu einem relativen Verlust der Biegezugfestigkeit um  $\geq 30 \%$ , schneiden auch Probetypen mit 5 Vol.-% zylindrischen und sphärischen Poren bei den zyklischen Thermoschockversuchen besser ab als die Referenzprobe. Während die nicht porosierte Referenz nach 25 Zyklen Materialversagen zeigt, erreichen die Proben mit 5 Vol.-% zylindrischen und sphärischen Poren 26 bzw. 56 Zyklen bis zum Materialversagen. Allerdings ist bei diesen Proben der vollständige Ausfall einzelner Proben größer als bei der Referenz. Von 8 eingesetzten Proben fallen bei den Proben mit 5 Vol.-% zylindrischen und sphärischen Poren 1 von 8 bzw. 3 von 8 aus, d.h. sie zeigen großflächige Abplatzungen oder ein vollständiges Zerbrechen. Die Proben mit 20 Vol.-% sphärischen Poren und die Referenzprobe zeigen keine Ausfälle über alle 100 Zyklen.

Neben den mechanischen Eigenschaften sind eine konstante mineralogische Zusammensetzung sowie eine gleichbleibende Größenordnung der ein- und ausspeicherbaren Wärmeenergien ebenfalls entscheidende Maßstäbe für eine gute

Zyklenstabilität von Wärmespeichermaterialien. Die Zusammensetzung der gesinterten Probe, bestehend aus den Phasenbestandteilen Cordierit, Mullit und Quarz verändert sich über 100 Zyklen zumindest gemäß der qualitativen XRD-Analyse nicht. Auch der quantitative Quarzanteil der mittels Simultaner Thermischer Analyse nach der Sinterung mit 2 Ma.-% berechnet wurde, bleibt über 100 Zyklen konstant. Eine mechanische Schwächung des Materials durch den Quarzsprung bei Proben die über 573 °C erhitzt und dann abgeschreckt werden, zeigt sich beim verwendeten Probenmaterial nicht. Grundsätzlich steigt der relative Verlust der 3-Punkt-Biegefestigkeit durch den Thermoschock, je höher die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ist. Es ist jedoch kein signifikant stärkerer Anstieg des 3-Punkt-Biegefestigkeitsverlust  $L$  bei Proben die unterhalb des Quarzsprungs mit einer Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 530$  K gegenüber den Proben zu beobachten, die mit  $\Delta T = 630$  und  $730$  K die Fest-Fest-Phasenumwandlung vom Tiefquarz in den Hochquarz durchfahren.

Die ein- und ausspeicher-baren Wärmemengen pro Gramm Probenmaterial zeigen sich weder durch die Porosierung bei der Probenherstellung noch durch die zyklische Beanspruchung erkennbar beeinflusst. Entsprechend dem Dulong-Petit-Gesetz erhöht sich mit steigender Temperatur die Wärmekapazität bis zu einem Grenzwert. Dieses Verhalten ist auch beim vorliegenden Probenmaterial zu beobachten. Die ein- und ausspeicherbaren Wärmemengen steigen mit dem Temperaturniveau, so dass in der Folge auch die Effizienz des Wärmespeichermaterials bei höheren Temperaturen steigt.

### **6.4 Thermoschockparameter**

Der erste und zweite Thermoschockparameter eignet sich bei den hier vorherrschenden Versuchsbedingungen und Probenbeschaffenheiten nicht zu folgerichtigen Voraussagen zum Thermoschockverhalten. Eine Ursache kann sein, dass hier bei den zur Berechnung der Thermoschockparameter verwendeten Messwerten Vereinfachungen vorgenommen wurden. Die Scherbenwärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, tr.}$ , die für eine Probenmitteltemperatur von 10 °C gilt, wurde als temperaturunabhängige und isotrope Größe verwendet. Ebenso ist der dynamische Elastizitätsmodul eine temperaturabhängige Größe. Hier wurde ein Messwert verwendet, der bei Raumtemperatur ermittelt worden ist. Diese Vereinfachungen

können zu einer Ungenauigkeit bei den Thermoschockparametern führen. Die verwendeten Werte für die Wärmeleitfähigkeit können in zukünftigen Untersuchungen mittels Laser-Flash-Analyse oder Hot-Disk-Methode in Abhängigkeit der Temperatur gemessen werden. Zur Berechnung der Thermoschockparameter können die Messwerte dann über den betrachtenden Temperaturbereich gemittelt werden, in dem der Thermoschock stattfindet bzw. dem das Material ausgesetzt sein wird. Für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten wurde ein über alle drei Achsrichtungen und über den Temperaturbereich von 25 bis 800 °C gemittelter Wert verwendet. Ebenfalls könnten Literaturwerte oder Werte aus Datenbanken herangezogen werden. Im Fall von Keramiken wirken sich meistens die genaue Zusammensetzung mit allen Zuschlagstoffen, die Korngröße und die Korngrößenverteilung, die Art der Formgebung sowie die Sinterbedingungen maßgeblich auf die Eigenschaften eines Probekörpers aus, so dass in vielen Fällen ein eigenes Bestimmen der zum Rechnen benötigten Kennwerte nötig ist. Aufgrund der möglichen Ungenauigkeiten bei den Thermoschockparametern ist der Thermoschockversuch zumindest als Ergänzung empfehlenswert.

### **6.5 Einfluss der Bauteilgeometrie auf die Thermoschockeigenschaften**

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Geometrie einen Einfluss auf die resultierenden entstehenden Spannungen im Bauteil hat. Das kann durch die experimentellen Thermoschockversuche bestätigt werden. Die experimentellen Versuche zeigen ebenfalls, dass die Geometrie bereits Auswirkungen auf die Druckfestigkeit der nicht geschockten Probekörper hat. Die quaderförmigen Proben zeigen bei ca. gleichem Probekörpervolumen von 400 mm<sup>3</sup> oder 1600 mm<sup>3</sup> sowie bei gleichen Höhen von entweder 10 mm oder 40 mm eine höhere Druckfestigkeit als die zylinderförmigen Proben. Bei den Geometrien mit einem Volumen von 400 mm<sup>3</sup> ist die Druckfestigkeit der zylindrischen Proben 15,7 % geringer als die der quaderförmigen, bei Probekörpern mit einem 1600 mm<sup>3</sup> ist der Unterschied mit 4,6 % weniger groß. Ähnlich ist das bei den Proben bei denen die Höhe als geometrischer Parameter variiert wird. Bei den Proben mit 10 mm Höhe weisen die zylindrischen Proben eine um 18,3 % geringere Druckfestigkeit als die quaderförmigen Proben, während der Unterschied aufgrund der Probenform bei der Probenhöhe 40 mm geringer ausfällt. Hier zeigen die zylindrischen Proben lediglich

eine um 6,2 % geringere Druckfestigkeit als die Quaderproben. Das liegt sehr wahrscheinlich am Größeneffekt. Mit steigender Größe der Probekörper zeigt sich eine Abnahme der Festigkeit, die in diesem Fall den Einfluss der Probenform überlagern kann. Die quaderförmigen Proben mit einem Volumen von  $1600 \text{ mm}^3$  zeigen eine um 22,9 % geringere Druckfestigkeit als die quaderförmigen Proben mit einem Volumen von  $400 \text{ mm}^3$ . Bei der Variation der Höhe von 10 mm auf 40 mm verringert sich bei den quaderförmigen Proben die Druckfestigkeit um 30,8 %. Bei den zylindrischen Proben fällt der Größeneffekt etwas geringer aus. Hier verringert sich die Druckfestigkeit bei der Erhöhung des Volumens von  $400 \text{ mm}^3$  auf  $1600 \text{ mm}^3$  um 12,7 %, während sich durch die Steigerung der Höhe von 10 mm auf 40 mm eine Druckfestigkeitserniedrigung von 20,6 % ergibt. Daraus folgt die Annahme, dass der Größeneffekt umso stärker auftritt, je höher die Anfangsfestigkeit in absoluten Zahlen ist. Grundsätzlich sind die Verringerungen der Druckfestigkeit durch den Größeneffekt im betrachteten Fall in den meisten Fällen größer als durch den Einfluss der Probenform.

Bei zeigt sich eine Abhängigkeit der im Bauteil resultierenden Spannung durch den Thermoschock von der Probenhöhe, der Probenform und des Maßstabs. Mit wachsender Probenhöhe von 10 mm auf 20 mm und von 10 mm auf 80 mm zeigt sich bei der quaderförmigen Probe bei einer konstanten Probendicke von 10 mm eine Erhöhung der 3. Hauptspannung um 23,5 % und um 55,1 %. Bei einer Maßstabsvergrößerung um den Faktor 2,5 weisen die quaderförmigen Proben die konstante Probendicke von 25 mm auf, während die Höhe von 25 mm auf 50 mm sowie von 25 auf 200 mm variiert wird. Bei der Verdopplung der Probenhöhe steigt die 3. Hauptspannung um 3,5 %, während sie bei der Verachtfachung auf 200 mm um 13 % steigt. Der Einfluss der Höhe als Variationsparameter nimmt bei den quaderförmigen Proben folglich mit steigendem Maßstab ab. Bei einer Maßstabsvergrößerung um den Faktor 25 kehrt sich der spannungssteigernde Effekt durch die Vergrößerung der Probenhöhe um. Die Probenhöhe der quaderförmigen Proben mit einer konstanten Probendicke von 250 mm wird einmal von 250 mm auf 500 mm verdoppelt und im nächsten Fall von 250 mm auf 2000 mm verachtfacht. Bei der Verdopplung der Probenhöhe verringert sich die im Bauteil auftretende Spannung durch den Thermoschock um 18,6 %. Bei der Vergrößerung der Probenhöhe um den Faktor 8 sinkt die 3. Hauptspannung um 32,6 % ab. Bei den



quaderförmigen Proben gibt es daher möglicherweise einen Umkehrpunkt bei der Maßstabsvergrößerung, ab dem durch die Vergrößerung der Probenhöhe bei konstanter Probendicke zu einer Verringerung der aus dem Thermoschock resultierenden Spannung führt. Der Einfluss der Probenform zeigt sich bei der analogen Betrachtung der Variation der Probenhöhe bei konstanter Probendicke für die 3 Maßstäbe bei den zylinderförmigen Proben. Hier zeigt sich bei allen Maßstäben überwiegend der Effekt einer Verringerung der Spannung mit zunehmender Probenhöhe. Eine Zylinderprobe mit konstanter Probendicke von 11,3 mm, bei der die Probenhöhe in der ersten Betrachtung von 10 mm auf 20 mm und bei der zweiten Betrachtung von 10 mm auf 80 mm vergrößert wird, zeigt bei der Höhenverdopplung eine Reduzierung der resultierenden Spannung um 13,4 %, während sie bei der Verachtfachung der Probenhöhe eine Erhöhung der Spannung um 9,6 % aufweist. Bei einer Maßstabsvergrößerung um den Faktor 2,5 werden die Probekörper mit der konstanten Probendicke von 28,2 mm nun von einer Probenhöhe von 25 mm auf 50 mm vergrößert und in einem weiteren Fall von 25 mm auf die Probenhöhe von 200 mm verlängert. Im ersten Fall verringert sich die 3. Hauptspannung um 11,1 %, bei der Streckung der Höhe um den Faktor 8 verringert sie sich um 3,6 %. Bei einer 25fachen Maßstabsvergrößerung liegen Probekörper mit der konstanten Dicke von 282,1 mm vor, deren Höhe im ersten Fall von 250 mm auf 500 mm verzweifacht und im zweiten Fall mit dem Faktor 8 von 250 mm auf 2000 mm vergrößert wird. Im ersten Fall resultiert eine Verringerung der betragsmäßig höchsten Hauptspannung um 4,4 %, im zweiten Fall verringert sich die Spannung um 35,2 %. Die Veränderungen der Hauptspannung bei den Zylinderproben wirken in Abhängigkeit der Probenhöhe willkürlich, so dass entweder eine Überlagerung einer oder mehrere Einflussgrößen vorliegt.

Bei der vorherigen Betrachtung, einer Vergrößerung der Höhe bei konstantem Volumen, verändert sich das  $h/d$ -Verhältnis und somit die geometrische Grundform. Bei der Betrachtung der Maßstabsvergrößerung gegenüber den Proben mit einem konstanten Verhältnis von Probenhöhe zu Probendicke  $h/d$  zeigt sich ein konsistenterer Zusammenhang. Hierbei ändert sich die Grundform nicht, d.h. hier wird bei gleichen Verhältnissen der Probenabmessungen zueinander, der alleinige Einfluss des Maßstabs untersucht. Eine Maßstabsvergrößerung bei quaderförmigen Proben mit einem konstanten  $h/d$ -Verhältnis von 1 und einer Ausgangshöhe von 10 mm um die Faktoren 2,5 und 25

sorgt für eine Erhöhung der 3. Hauptspannung um 229,8 % und 402,4 %. Diese Tendenz der Erhöhung der Spannung mit steigendem Maßstab bei konstantem  $h/d$ -Verhältnis von 0,89 (zum Zweck konstanter Volumina und damit einer besseren Vergleichbarkeit der quader- und zylinderförmigen Proben zueinander, gibt es einen Unterschied beim  $h/d$ -Verhältnis zwischen Zylindern und Quadern) und der Ausgangshöhe 10 mm zeigt sich ebenso bei den zylindrischen Proben. Dort sorgt die Maßstabsvergrößerung um den Faktor 2,5 und 25 um Erhöhungen der 3. Hauptspannung um 211,4 % und 356,9 %. Beim dem nächsthöheren  $h/d$ -Verhältnis von 2 zeigt sich bei den quaderförmigen Proben ein ähnlicher Zusammenhang. Wird der Maßstab der Proben mit der Ausgangshöhe 20 mm um den Faktor 2,5 sowie 25 erhöht, so weisen sie eine Vergrößerung der 3. Hauptspannung um 176,2 % und 231,0 % auf. Auch bei den zylinderförmigen Proben ist der qualitative Verlauf nun vergleichbar. Die Proben mit den konstanten  $h/d$ -Verhältnis von 1,77 und der Ausgangshöhe von 20 mm werden im Maßstab um den Faktor 2,5 und 25 vergrößert. Dabei zeigt sich im ersten Fall eine Erhöhung der 3. Hauptspannung um 219,6 % und im zweiten Fall um 404,0 %. Beim konstanten  $h/d$ -Verhältnis von 8 für die quaderförmigen Poren und 7,09 für die zylindrischen Proben zeigt sich eine Veränderung des Größeneffekts. Die Vergrößerung um den Faktor 25 sorgt in diesen Fällen für eine geringere Steigerung der 3. Hauptspannung als die Vergrößerung um den Faktor 2,5. So ergeben sich für die quaderförmigen Poren mit  $h/d = 8$  und einer Ausgangshöhe von 80 mm bei den Maßstabsvergrößerungen um die Faktoren 2,5 und 25 Erhöhungen der Spannung um 140,3 % und 120,5 %. Ebenso sorgt bei den zylinderförmigen Proben mit  $h/d = 7,09$  und einer Ausgangshöhe von 80 mm die Maßstabsvergrößerung um den Faktor 25 für eine geringere Spannungssteigerung um 170,2 % als die durch die Maßstabsvergrößerung um den Faktor 2,5 resultierende Spannungserhöhung um 173,8 %.

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass sich ab einem bestimmten  $h/d$ -Verhältnis der Einfluss der Maßstabsvergrößerung auf die resultierenden Spannungen umkehrt und ab diesem  $h/d$ -Verhältnis mit einer weiteren Erhöhung der Maßstabsvergrößerung nur noch eine geringere Erhöhung der Spannung gegenüber des Ursprungskörpers möglich ist. Die vergleichbare qualitative Abfolge der Erhöhungen durch die Variation des Parameters „Maßstab“ ist ein Hinweis darauf, dass die Körperform in dieser Betrachtung zumindest

nicht für einen Unterschied sorgt. Der Einfluss der Form ist damit jedoch nicht ausgeschlossen. Die jeweils verglichenen Proben weisen für gleiche Probetypen jeweils das gleiche Volumen und die gleiche Höhe auf. Dennoch unterscheiden sich die relativen Steigerungen in ihren Werten und auch die absoluten Werte der 3. Hauptspannung bei unterschiedlicher Grundform.

Die volumenspezifische Oberfläche sich bei gleichem Volumen eines Körpers in Abhängigkeit der Körperform unterscheiden.

Beim Auftragen aller berechneten Werte in Abhängigkeit der volumenspezifischen Oberfläche  $S_v$  steigt für die größten Probekörper im Maßstab 25, mit den geringsten Werten für  $S_v$ , zunächst die resultierende Spannung für steigende Werte von  $S_v$ . Bei den Maßstäben 2,5 und 1,0 sinkt die 3.Hauptspannung grundsätzlich mit steigender  $S_v$ . Allerdings kommt es bei den zylindrischen Proben bei den Maßstäben 1,0 und 2,5 bei einem Absenken des  $h/d$ -Verhältnisses von 1,77 zu 0,89 trotz sinkender  $S_v$  zu einem Anstieg der 3. Hauptspannung. Da dies nicht bei den quaderförmigen Körpern der Fall ist, kann hier auch ein Einfluss der Probenform selbst ursächlich sein. Ein Zusammenspiel mehrerer Einflussparameter auf die resultierende Spannung ist wahrscheinlich. Tendenziell sinkt für die hier simulierten quaderförmigen und zylindrischen Probekörper die thermische Belastung durch die resultierende Spannung für kleinere Probekörper, mit geringer Höhe  $h$ , geringem Verhältnis von  $h/d$  und großer  $S_v$  in den meisten Fällen.

Dieser Zusammenhang lässt sich bei den praktisch durchgeführten Versuchen bestätigen. Zwar dient in diesem Fall nicht die resultierende Spannung im Bauteil, sondern der durch den Thermoschock resultierende Druckfestigkeitsverlust, jedoch führt eine höhere thermisch induzierte Spannung im Bauteil zu einer größeren mechanischen Belastung und kann Risse verursachen, die in der Folge die Druckfestigkeit des Körpers herabsetzen. Mit steigender volumenspezifischer Oberfläche sinkt sowohl für die zylindrischen als auch für die quaderförmigen Proben tendenziell der relative Verlust der Druckfestigkeit. Mit sinkendem Verhältnis von  $h/d$  sinkt bei den Simulationen in der Mehrzahl die resultierende Spannung und auch bei den experimentellen Versuchen sinkt mit einem abnehmenden  $h/d$ -Verhältnis der resultierende relative Verlust der Druckfestigkeit. Bei der Simulation gibt

es bei den zylindrischen Proben die Sonderfälle, dass für die Maßstäbe 1,0 und 2,5 bei einem Anstieg des  $h/d$ -Verhältnis von 0,89 auf 1,77 und trotz sinkender  $S_v$  die resultierende Spannung sinkt. Einen solchen Sonderfall gibt es auch bei den experimentellen Versuchen. Dort sinkt im Gegensatz zur allgemeinen Tendenz mit dem Anstieg des  $h/d$ -Verhältnisses von 1,80 auf 2,13 und sinkender  $S_v$  von 938 1/m auf 912 1/m der resultierende relative Druckfestigkeitsverlust von 17,28 % auf 16,92 %. Der Unterschied zwischen diesen beiden relativen Verlusten ist eher gering, so dass es nicht ausgeschlossen ist, dass diese Diskrepanz zur allgemeinen Tendenz eine Folge der Streuung der Druckfestigkeits-Messwerte ist. Aus den experimentellen Versuchen ergibt sich das gleiche Fazit wie aus den Simulationen: Mit sinkender Höhe  $h$ , einem abnehmenden Verhältnis von Höhe zu Dicke  $h/d$  und einem Anstieg der volumenspezifischen Oberfläche  $S_v$  zeigen die Proben in der Mehrzahl eine verbesserte Thermoschockresistenz. Somit können Simulationen als Grundlage zur geometrischen Optimierung von Wärmespeichermassen dienen. Die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen ersetzen jedoch nicht den experimentellen Versuch, um konkrete absolute Werte zu erfassen und die Zusammenhänge der Simulationsergebnisse zu bestätigen.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Heinrichs, H., and Michelsen, G. "Nachhaltigkeitswissenschaften," Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2014.
2. Kalide, W., Sigloch, H., and Gehrke, V. "Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen: Kolbenmaschinen - Strömungsmaschinen - Kraftwerke," 12., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, München, Hanser, 2023, 529 pp.
3. Posch, W., Vorbach, S., Zsifkovits, H. E., et al., eds. "Erfolg durch nachhaltiges Energie- und Ressourcenmanagement," 1. Auflage, Baden-Baden, Nomos, 2023, 243 pp.
4. Krebs, H.-A., and Hagenweiler, P. "Energy resilience and climate protection: energy systems, critical infrastructures, and sustainability goals," Wiesbaden [Heidelberg], Springer Vieweg, 2022, 108 pp.
5. Burger, B. "Downloads | Energy-Charts." Available at: <https://www.energy-charts.info/downloads.html>. Accessed March 9, 2025.
6. "§ 1 EEG 2023 - Einzelnorm." Available at: [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/\\_\\_1.html](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/__1.html). Accessed April 21, 2023.
7. Klimaschutz, B.-B. für W. und. "Energieeffizienz lohnt sich." Available at: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/energieeffizienz.html>. Accessed March 5, 2024.
8. Klimaschutz, B.-B. für W. und. "Energieeinsparrecht." Available at: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/gebaeude-energieeinsparrecht.html>. Accessed March 5, 2024.
9. "Verordnung (EU) 2017/1369 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2017 zur Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung und zur Aufhebung der Richtlinie 2010/30/EU (Text von Bedeutung für den EWR. )," v. vol. 198, 2017.
10. Klimaschutz, B.-B. für W. und. "Ein Stromnetz für die Energiewende." Available at: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/netze-und-netzausbau.html>. Accessed March 5, 2024.
11. BDEW. "Was bedeutet die Digitalisierung für die Energiewirtschaft?" Available at: <https://www.bdew.de/energie/digitalisierung/was-bedeutet-der-trend-der-digitalisierung-fuer-die-energiewirtschaft/>. Accessed March 5, 2024.
12. Sahling, U., ed. "Klimaschutz und Energiewende in Deutschland: Herausforderungen - Lösungsbeiträge - Zukunftsperspektiven," Berlin [Heidelberg], Springer Spektrum, 2022, 871 pp.

13. Adler, B. "Moderne Energiesysteme – ein Beitrag zur Energiewende," Berlin [Heidelberg], Springer Spektrum, 2019, 142 pp.
14. "Stromproduktion | Energy-Charts." Available at: <https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=de&c=DE&year=2022&week=02>. Accessed April 21, 2023.
15. "Stromproduktion | Energy-Charts." Available at: <https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=de&c=DE&year=2022&week=28&download-format=application%2Fxlsx>. Accessed April 21, 2023.
16. "KWKG 2023 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz." Available at: <https://www.buzer.de/s1.htm?g=Kraft-W%C3%A4rme-Kopplungsgesetz+-+KWKG&f=1>. Accessed March 6, 2024.
17. Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., et al. "Waste heat recovery technologies and applications," *Thermal Science and Engineering Progress*, V. 6, 2018, pp. 268–89.
18. Sterner, M., and Stadler, I., eds. "Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration," 2., korrigierte und ergänzte Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2017, 861 pp.
19. Moser, A. "Bewertung des Beitrags von Speichern und Pumpspeichern in der Schweiz, Österreich und Deutschland zur elektrischen Energieversorgung," *Wissenschaftliche Studie im Auftrag des österreichischen Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend*, 2013.
20. Fritz, W., Ladermann, A., Willemsen, S., et al. "Batteriespeicher in Netzen," 2022.
21. "Thermische Energiespeicher für Quartiere." Available at: <https://www.dena.de/infocenter/thermische-energiespeicher-fuer-quartiere/>. Accessed March 9, 2025.
22. Fleiter, T., Manz, P., Neuwirth, M., et al. "Documentation on excess heat potentials of industrial sites including open data file with selected potentials," 2020, p. S. 47.
23. Brückner, S. "Industrielle Abwärme in Deutschland: Bestimmung von gesichertem Aufkommen und technischer bzw. wirtschaftlicher Nutzbarkeit." PhD Thesis, Technische Universität München, 2016.
24. Manz, P., Fleiter, T., and Aydemir, A. "Developing a georeferenced database of energy-intensive industry plants for estimation of excess heat potentials," *Eceee industrial summer study proceedings*, 2018.
25. "Energieverbrauch der Industrie 2022 um 9,1 % gegenüber dem Vorjahr gesunken." Statistisches Bundesamt. Available at:

- [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/11/PD23\\_432\\_435.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/11/PD23_432_435.html)  
. Accessed March 7, 2024.
26. Schmiegel, A. U. "Energiespeicher für die Energiewende: Auslegung und Betrieb von Speichersystemen," 3., vollständig überarbeitete Auflage, München, Hanser, 2023, 259 pp.
  27. Zahoransky, R. A., Allelein, H.-J., Bollin, E., et al. "Energiespeicherung." In: Zahoransky, R., ed. *Energietechnik*. Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. pp. 419–45.
  28. Blum, U., Rosenthal, E., and Diekmann, B. "Energie – Grundlagen für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Machbarkeiten, Grenzen und Umweltauswirkungen," Wiesbaden [Heidelberg], Springer Vieweg, 2020, 161 pp.
  29. Wesselak, V., Schabbach, T., Fischer, J., et al. "Handbuch Regenerative Energietechnik," 3. Auflage, Berlin [Heidelberg], Springer Vieweg, 2017, 943 pp.
  30. Bailera, M., Lisbona, P., Peña, B., et al. "Energy Storage: Hybridization of Power-to-Gas Technology and Carbon Capture," Cham, Springer International Publishing, 2020.
  31. "Wichtigste Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland nach installierter Leistung 2023." Statista. Available at: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/310041/umfrage/wichtigste-pumpspeicherkraftwerke-in-deutschland-nach-installierter-leistung/>. Accessed March 8, 2024.
  32. "DIP - Situation der Energiespeicher in Deutschland." Available at: <https://dip.bundestag.de/vorgang/situation-der-energiespeicher-in-deutschland/278737>. Accessed March 9, 2025.
  33. Klimaschutz, B.-B. für W. und. "Bundesbericht Energieforschung 2021." Available at: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/bundesbericht-energieforschung-2021.html>. Accessed March 9, 2025.
  34. "Rotationskinetischer Speicher mit einer Kapazität von 500 kWh | TU Dresden." Available at: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/ess/ressourcen/dateien/vortraege-hws-2022/05-Robin-Garbe-Rotationskinetischer-Speicher-mit-einer-Kapazitaet-von-500-kWh.pdf?lang=de>. Accessed March 9, 2025.
  35. Ose, R. "Elektrotechnik für Ingenieur:innen: Grundlagen," 7., überarbeitete und erweiterte Auflage, München, Hanser, 2022, 414 pp.
  36. "Energiespeicher | Energie-Grundlagen." Available at: <https://home.uni-leipzig.de/energy/energie-grundlagen/22.html>. Accessed March 11, 2024.

37. Petrovic, S. "Battery technology crash course: a concise introduction," Cham, Springer Nature, 2021, 117 pp.
38. Mortimer, C. E., and Müller, U. "Chemie: das Basiswissen der Chemie," 13., vollständig überarbeitete Auflage, Stuttgart New York, Georg Thieme Verlag, 2020, 713 pp.
39. Börger, A., and Wenzl, H. "Batterien: Grundlagen, Systeme, Anwendungen," Weinheim, Wiley-VCH, 2023, 543 pp.
40. Birke, P., and Schiemann, M. "Akkumulatoren: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft elektrochemischer Energiespeicher," München, Herbert Utz Verlag, 2013, 421 pp.
41. Kuchling, H., and Kuchling, T. "Taschenbuch der Physik," 22., aktualisierte Auflage, München, Hanser, 2022, 714 pp.
42. Koçak, B., Fernandez, A. I., and Paksoy, H. "Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects," *Solar Energy*, V. 209, 2020, pp. 135–69.
43. Wollstein-Lehmkuhl, A.-E. "Wärmeversorgungssysteme mit saisonalen Wärmespeichern," Tübingen, expert, 2020, 286 pp.
44. Bauer, T., Steinmann, W.-D., Laing, D., et al. "THERMAL ENERGY STORAGE MATERIALS AND SYSTEMS," *Annual Review of Heat Transfer*, V. 15, No. 15, 2012, pp. 131–77.
45. Steinmann, W.-D. "Thermal energy storage for medium and high temperatures: concepts and applications," Wiesbaden, Germany, Springer, 2022.
46. Herwig, H., and Moschallski, A. "Wärmeübertragung: physikalische Grundlagen und ausführliche Anleitung zum Lösen von Aufgaben," 4., überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden [Heidelberg], Springer Vieweg, 2019, 366 pp.
47. Ali, H. M., Jamil, F., and Babar, H. "Thermal energy storage: storage techniques, advanced materials, thermophysical properties and applications," Singapore, Springer, 2021, 117 pp.
48. Maier, H. J., Niendorf, T., and Bürgel, R. "Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik: Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen und -beschichtungen," 6., überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden [Heidelberg], Springer Vieweg, 2019, 599 pp.
49. Goeke, J. "Thermische Energiespeicher in der Gebäudetechnik: sensible Speicher, latente Speicher, Systemintegration," Wiesbaden, Springer Vieweg, 2021, 565 pp.



50. González-Roubaud, E., Pérez-Osorio, D., and Prieto, C. "Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 80, 2017, pp. 133–48.
51. Gasia, J., Miró, L., and Cabeza, L. F. "Review on system and materials requirements for high temperature thermal energy storage. Part 1: General requirements," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 75, 2017, pp. 1320–38.
52. Fernández, A. I., Barreneche, C., Martínez, M., et al. "Thermal Energy Storage Materials Challenges and Availability." In: Yan, J., ed. *Handbook of Clean Energy Systems*. 1st ed. Wiley, 2015. pp. 1–11.
53. Herwig, H. "Wärmeübertragung A-Z: Systematische und ausführliche Erläuterungen wichtiger Größen und Konzepte," Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: Imprint: Springer, 2000.
54. Langeheinecke, K., Kaufmann, A., Langeheinecke, K.-J., et al. "Thermodynamik für Ingenieure," 11. Auflage, Berlin] Wiesbaden [Heidelberg, Springer Vieweg, 2020, 541 pp.
55. "DIN EN 12667:2001-05, Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN\_12667:2001," Beuth Verlag GmbH, 2001.
56. Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen and Verein deutscher Ingenieure, eds. "VDI-Wärmeatlas: VDI," 11. bearb. und erw. Aufl, Berlin [u.a.], Springer Vieweg, 2013.
57. Katekar, V. P., Rao, A. B., and Sardeshpande, V. R. "An experimental investigation to optimise pebbles-based sensible heat storage system: An exploration to improve thermal efficiency of solar devices," *Journal of Energy Storage*, V. 73, 2023, p. 108964.
58. Seyitini, L., Belgasim, B., and Enweremadu, C. C. "Solid state sensible heat storage technology for industrial applications – A review," *Journal of Energy Storage*, V. 62, 2023, p. 106919.
59. Li, Y.-C., Zhang, L., and Feng, B. "Optimization of thermal performance of high temperature sensible heat thermal energy storage system for direct steam generation: A simulation work," *Applied Thermal Engineering*, V. 217, 2022, p. 119225.
60. Mabrouk, R., Naji, H., Benim, A. C., et al. "A State of the Art Review on Sensible and Latent Heat Thermal Energy Storage Processes in Porous Media: Mesoscopic Simulation," *Applied Sciences*, V. 12, No. 14, 2022, p. 6995.

61. Aggarwal, A., Goyal, N., and Kumar, A. "Thermal characteristics of sensible heat storage materials applicable for concentrated solar power systems," *Materials Today: Proceedings*, V. 47, 2021, pp. 5812–7.
62. Kocak, B., Fernandez, A. I., and Paksoy, H. "Benchmarking study of demolition wastes with different waste materials as sensible thermal energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 219, 2021, p. 110777.
63. Suresh, C., and Saini, R. P. "Thermal performance of sensible and latent heat thermal energy storage systems," *International Journal of Energy Research*, V. 44, No. 6, 2020, pp. 4743–58.
64. Koçak, B., and Paksoy, H. "Using demolition wastes from urban regeneration as sensible thermal energy storage material," *International Journal of Energy Research*, V. 43, No. 12, 2019, pp. 6454–60.
65. Lugolole, R., Mawire, A., Lentswe, K. A., et al. "Thermal performance comparison of three sensible heat thermal energy storage systems during charging cycles," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, V. 30, 2018, pp. 37–51.
66. Tiskatine, R., Oaddi, R., Ait El Cadi, R., et al. "Suitability and characteristics of rocks for sensible heat storage in CSP plants," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 169, 2017, pp. 245–57.
67. Nkhonjera, L., Bello-Ochende, T., John, G., et al. "A review of thermal energy storage designs, heat storage materials and cooking performance of solar cookers with heat storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 75, 2017, pp. 157–67.
68. Li, G. "Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 53, 2016, pp. 897–923.
69. Dinker, A., Agarwal, M., and Agarwal, G. D. "Heat storage materials, geometry and applications: A review," *Journal of the Energy Institute*, V. 90, No. 1, 2017, pp. 1–11.
70. Salomoni, V. A., Majorana, C. E., Giannuzzi, G. M., et al. "Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants," *Solar Energy*, V. 103, 2014, pp. 303–15.
71. Miró, L., Navarro, M. E., Suresh, P., et al. "Experimental characterization of a solid industrial by-product as material for high temperature sensible thermal energy storage (TES)," *Applied Energy*, V. 113, 2014, pp. 1261–8.
72. Khare, S., Dell'Amico, M., Knight, C., et al. "Selection of materials for high temperature sensible energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 115, 2013, pp. 114–22.

73. Navarro, M. E., Martínez, M., Gil, A., et al. "Selection and characterization of recycled materials for sensible thermal energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 107, 2012, pp. 131–5.
74. Py, X., Calvet, N., Olives, R., et al. "Recycled Material for Sensible Heat Based Thermal Energy Storage to be Used in Concentrated Solar Thermal Power Plants," *Journal of Solar Energy Engineering*, V. 133, No. 3, 2011, p. 031008.
75. Laing, D., Steinmann, W.-D., and Tamme, R. "Sensible Heat Storage for Medium and High Temperatures." In: Goswami, D. Y., Zhao, Y., eds. *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2008. pp. 2731–5.
76. Laing, D., Steinmann, W.-D., Tamme, R., et al. "Solid media thermal storage for parabolic trough power plants," *Solar Energy*, V. 80, No. 10, 2006, pp. 1283–9.
77. Wang, K. Y., West, R. E., Kreith, F., et al. "High-temperature sensible-heat storage options," *Energy*, V. 10, No. 10, 1985, pp. 1165–75.
78. Salmang, H., and Scholze, H. "Keramik: mit 551 Abbildungen und 132 Tabellen," 7., vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin Heidelberg, Springer, 2007, 1 p.
79. Hering, E., Martin, R., and Stohrer, M. "Taschenbuch der Mathematik und Physik," 6. Aufl. 2017, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2017, 1 p.
80. Kruger, M. "FLEXI-TES, Kraftwerksflexibilisierung durch Thermische Energiespeicher–Öffentlicher Schlussbericht (Final Report–Public)," *Project 03ET7055A,-B,-C,-D,-E,-F,-G, Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages*, V. 30, 2019.
81. Schmidt, T., Roth, J., Worlitschek, J., et al. "Handbuch Energiespeicher: SCCER Heat and Electricity Storage," ETH Zurich, 2020.
82. Hasselman, D. P. H. "Unified Theory of Thermal Shock Fracture Initiation and Crack Propagation in Brittle Ceramics," *Journal of the American Ceramic Society*, V. 52, No. 11, 1969, pp. 600–4.
83. "DIN EN 820-3:2004-11, Hochleistungskeramik - Prüfverfahren für monolithische Keramik - Thermomechanische Eigenschaften - Teil 3: Bestimmung der Thermoschockbeständigkeit mit dem Wasserabschreckversuch; Deutsche Fassung EN 820-3:2004," Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2004.
84. Leplay, P., Réthoré, J., Meille, S., et al. "Damage law identification of a quasi brittle ceramic from a b ending test using digital image correlation," *EPJ Web of Conferences*, V. 6, 2010, p. 31011.

85. Salvini, V. R., Pandolfelli, V. C., and Spinelli, D. "Mechanical Properties of Porous Ceramics." In: Al-Naib, U. M. B., ed. *Recent Advances in Porous Ceramics*. InTech, 2018.
86. De La Rosa, Á., and Ruiz, G. "A new approach to the study of the size and the geometry effect on compressive strength in concrete," *Results in Engineering*, V. 25, 2025, p. 104261.
87. Del Viso, J. R., Carmona, J. R., and Ruiz, G. "Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 38, No. 3, 2008, pp. 386–95.
88. Abasi, A., Hassanli, R., Vincent, T., et al. "Influence of prism geometry on the compressive strength of concrete masonry," *Construction and Building Materials*, V. 264, 2020, p. 120182.
89. Salmang, H., and Scholze, H. "Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Keramik," Fünfte völlig neubearbeitete Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer, 1968.
90. Soltan, A. M., Pöllmann, H., Kaden, R., et al. "Degradation of Aluminosilicate Refractories: An Integrated Approach," *Journal of the European Ceramic Society*, V. 35, No. 16, 2015, pp. 4573–92.
91. Hildebrand, J. S., Seibold, J., Hertlein, K., et al. "Influence of pore geometry on the thermal insulation properties of porosified heavy clay blocks," *Ziegelindustrie International*, No. 04/2021, 2021, pp. 14–25.
92. Maochang, C., Xianyou, Z., Limin, D., et al. "Thermal Shock Resistance of Porous Alumina Ceramics with Different Internal and External Porosity," *Journal of Ceramic Processing Research*, V. 22, No. 4, 2021, pp. 377–85.
93. Jin, X., Dong, L., Xu, H., et al. "Effects of Porosity and Pore Size on Mechanical and Thermal Properties as well as Thermal Shock Fracture Resistance of Porous ZrB<sub>2</sub>–SiC Ceramics," *Ceramics International*, V. 42, No. 7, 2016, pp. 9051–7.
94. Lu, X., Wei, Y., Wang, H., et al. "Porosity and Oxide Layer Dependence of Thermal Shock Behavior of Porous Silicon Nitride Ceramics," *Journal of Materials Science and Technology*, V. 30, No. 12, 2014, pp. 1217–22.
95. Jin, X., Chen, L., Dong, L., et al. "Thermal Shock Resistance of Porous ZrB<sub>2</sub>–SiC Ceramic after Oxidation," *Advances in Applied Ceramics*, V. 119, No. 1, 2020, pp. 15–21.
96. Li, B., Yan, Y., Jin, X., et al. "Microstructure and Mechanical and Thermal Shock Properties of Hierarchically Porous Ceramics," *Ceramics International*, V. 47, No. 17, 2021, pp. 24887–94.

97. Chen, M., Wang, H., Jin, H., et al. "Transient Thermal Shock Behavior Simulation of Porous Silicon Nitride Ceramics," *Ceramics International*, V. 42, No. 2, 2016, pp. 3130–7.
98. Li, Z., Wang, B. L., Wang, K. F., et al. "A Multi-Scale Model for Predicting the Thermal Shock Resistance of Porous Ceramics with Temperature-Dependent Material Properties," *Journal of the European Ceramic Society*, V. 39, No. 8, 2019, pp. 2720–30.
99. Shyam, A., Bruno, G., Watkins, T. R., et al. "The Effect of Porosity and Microcracking on the Thermomechanical Properties of Cordierite," *Journal of the European Ceramic Society*, V. 35, No. 16, 2015, pp. 4557–66.
100. Hildebrand, J. S., Thieme, L., Kröger, J., et al. "Influence of Pore Shape on the Thermal Shock Resistance of Cordierite Ceramic," *Ceramic forum international: cfi; Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, V. cfi 102, No. (1), 2025, pp. 30–7.
101. Liu, J., Huo, W., Zhang, X., et al. "Optimal Design on the High-Temperature Mechanical Properties of Porous Alumina Ceramics Based on Fractal Dimension Analysis," *Journal of Advanced Ceramics*, V. 7, No. 2, 2018, pp. 89–98.
102. Ashizuka, M., and Ishida, E. "Thermal Shock Fracture Behavior of Alumina Ceramics Containing Pores," *Journal of the Ceramic Society of Japan*, V. 110, No. 1286, 2002, pp. 937–41.
103. Luo, Y., Gu, H., Zhang, M., et al. "Research on Thermal Shock Resistance of Porous Refractory Material by Strain-Life Fatigue Approach," *Ceramics International*, V. 46, No. 10, 2020, pp. 14884–93.
104. Shao, Y., Du, R., Wu, X., et al. "Effect of Porosity on the Crack Pattern and Residual Strength of Ceramics after Quenching," *Journal of Materials Science*, V. 48, No. 18, 2013, pp. 6431–6.
105. Schröcke, H. "Mineralogie: Ein Lehrbuch auf systematischer Grundlage," Berlin, Boston, De Gruyter Inc, 1981, 964 pp.
106. Jin, X., Zhang, X., Han, J., et al. "Thermal Shock Behavior of Porous ZrB<sub>2</sub>–SiC Ceramics," *Materials Science and Engineering: A*, V. 588, 2013, pp. 175–80.
107. Cheng, T., Li, W., Shi, Y., et al. "Effects of In-Plane Geometric Shapes on Thermal Shock Resistance of Ultra-High Temperature Ceramic Components," *Transactions of the Indian Ceramic Society*, V. 74, No. 1, 2015, pp. 6–10.
108. Zeng, T., Yan, S., Gu, Y., et al. "Effect of Sample Shape and Size on the Thermal Shock Resistance for Ultra-High Temperature Ceramics," *Advanced Materials Research*, V. 177, 2010, pp. 223–5.

109. Glandus, J. C., and Boch, P. "Influence of the size factor on the thermal shock resistance of ceramic samples," *International Journal of Thermophysics*, V. 2, No. 1, 1981, pp. 89–101.
110. Swain, M. V. "R-Curve Behavior and Thermal Shock Resistance of Ceramics," *Journal of the American Ceramic Society*, V. 73, No. 3, 1990, pp. 621–8.
111. Ding, S., Zeng, Y.-P., and Jiang, D. "Thermal shock resistance of in situ reaction bonded porous silicon carbide ceramics," *Materials Science and Engineering: A*, V. 425, Nos. 1–2, 2006, pp. 326–9.
112. Telle, R. "Keramik," 7th ed., Berlin, Heidelberg, Springer, 2007, 1165 pp.
113. Kobayashi, Y., Katayama, M., Kato, M., et al. "Effect of Microstructure on the Thermal Expansion Coefficient of Sintered Cordierite Prepared from Sol Mixtures," *Journal of the American Ceramic Society*, V. 96, No. 6, 2013, pp. 1863–8.
114. Agrawal, D. K., Stubican, V. S., and Mehrotra, Y. "Germanium-Modified Cordierite Ceramics with Low Thermal Expansion," *Journal of the American Ceramic Society*, V. 69, No. 12, 1986, pp. 847–51.
115. Beals, R. J., and Cook, R. L. "Low-Expansion Cordierite Porcelains," *Journal of the American Ceramic Society*, V. 35, No. 2, 1952, pp. 53–7.
116. Wu, J., Leng, G., Xu, X., et al. "In-Situ Synthesis of a Cordierite-Andalusite Composite for Solar Thermal Storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 108, 2013, pp. 9–16.
117. Xu, X., Zhang, Y., Wu, J., et al. "Preparation and Performance Study of Cordierite/Mullite Composite Ceramics for Solar Thermal Energy Storage," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, V. 14, No. 2, 2017, pp. 162–72.
118. Cheng, H., Ye, F., Chang, J., et al. "In Situ Synthesis and Thermal Shock Resistance of a Cordierite-Mullite Composite for Solar Thermal Storage," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, V. 16, No. 2, 2019, pp. 772–80.
119. Lao, X., Xu, X., Jiang, W., et al. "Effect of Excess MgO on Microstructure and Thermal Properties of Cordierite Ceramics for High-Temperature Thermal Storage," *Ceramics International*, V. 45, No. 17, 2019, pp. 22264–72.
120. Wu, J., Lu, C., Xu, X., et al. "Preparation of Cordierite-Mullite Ceramics for Solar Thermal Storage," *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, V. 34, No. 5, 2019, pp. 1062–70.
121. Lao, X., Xu, X., Jiang, W., et al. "Influences of Impurities and Mineralogical Structure of Different Kaolin Minerals on Thermal Properties of Cordierite Ceramics for High-Temperature Thermal Storage," *Applied Clay Science*, V. 187, 2020, p. 105485.

122. Xu, X., Zhang, Y., Wu, J., et al. "In Situ Synthesis of SiC-Bonded Cordierite-Mullite Ceramics for Solar Thermal Energy Storage," *Ceramics International*, V. 42, No. 15, 2016, pp. 17503–12.
123. Lao, X., Xu, X., Jiang, W., et al. "Effect of Aluminum on Performances of Cordierite-SiCw Composite Ceramics for High-Temperature Sensible Thermal Storage," *Journal of Alloys and Compounds*, V. 780, 2019, pp. 378–87.
124. Erkinaci, T., and Baytas, F. "CFD Investigation of a Sensible Packed Bed Thermal Energy Storage System with Different Porous Materials," *International Journal of Heat and Technology*, V. 35, No. Special Issue1, 2017, pp. 281–7.
125. Herwig, H., and Moschallski, A. "Wärmeübertragung: Physikalische Grundlagen und ausführliche Anleitung zum Lösen von Aufgaben," Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2019.
126. "PLA Filament Sicherheitsdatenblatt." Available at: [https://filamentworld.de/fact-sheets/Filamentworld\\_PLA\\_Sicherheitsdatenblatt.pdf](https://filamentworld.de/fact-sheets/Filamentworld_PLA_Sicherheitsdatenblatt.pdf). Accessed March 9, 2025.
127. "Sicherheitsdatenblatt gemäß 2001/58/EG Perlschaum 2-4mm 15Kg/m3." Available at: <https://restado.de/wp-content/uploads/products/2023/06/f5ac5737-perlschaum-2-4mm.pdf>. Accessed March 9, 2025.
128. "Safety Data Sheet according to Regulation (EC) No. 1907/2006 (REACH) Plastic granulate PA6 natura." Available at: [https://www.swarco.com/sites/default/files/public/downloads/2018-11/SDS-Kunststoffgranulat%20PA6-SWARCO-Vestglas-SW-2500-swarco\\_-\\_XXV-GHS\\_1\\_0-en.pdf](https://www.swarco.com/sites/default/files/public/downloads/2018-11/SDS-Kunststoffgranulat%20PA6-SWARCO-Vestglas-SW-2500-swarco_-_XXV-GHS_1_0-en.pdf). Accessed March 9, 2025.
129. "DIN EN 1936:2007-02, Prüfverfahren für Naturstein\_ - Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität; Deutsche Fassung EN\_1936:2006," DIN Media GmbH, 2007.
130. "DIN 66137-1:2019-03, Bestimmung der Dichte fester Stoffe\_ - Teil\_1: Grundlagen," DIN Media GmbH, 2019.
131. "Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration." Available at: <https://www.astm.org/c1259-21.html>. Accessed February 20, 2025.
132. "Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Sonic Resonance." Available at: <https://www.astm.org/e1875-13.html>. Accessed February 20, 2025.
133. "Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration." Available at: <https://www.astm.org/e1876-22.html>. Accessed February 20, 2025.

134. "DIN EN 843-1:2008-08, Hochleistungskeramik - Mechanische Eigenschaften monolithischer Keramik bei Raumtemperatur - Teil 1: Bestimmung der Biegefestigkeit; Deutsche Fassung EN 843-1:2006," Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2008.
135. "DIN EN 772-1:2016-05, Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit; Deutsche und Englische Fassung EN\_772-1:2011+A1:2015," DIN Media GmbH, 2016.
136. "DIN 51006:2024-02, Thermische Analyse (TA) - Thermogravimetrie (TG) - Grundlagen," DIN Media GmbH, 2024.
137. "DIN 51007:2019-04, Thermische Analyse (TA) - Differenz-Thermoanalyse (DTA) und Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) - Allgemeine Grundlagen," Beuth Verlag GmbH, 2019.
138. Wittenburg, J. "Festigkeitslehre: Ein Lehr- und Arbeitsbuch," Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
139. Arndt, K.-D., Ihme, J., and Turk, H. "Klausurentainer zur Festigkeitslehre für Wirtschaftsingenieure: mit Formelsammlung," 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2020.
140. Ghiorso, M. S., Carmichael, I. S. E., and Moret, L. K. "Inverted high-temperature quartz: Unit cell parameters and properties of the  $\alpha$ - $\beta$  inversion," *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 68, No. 3, 1979, pp. 307–23.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nettostromerzeugung in Deutschland 2024 in TWh und prozentuale Verteilung. <sup>5</sup>	1
Abbildung 2: Der Anteil der einzelnen Energieträger an der Gesamtheit der erneuerbaren Energien bei der Nettostromerzeugung in Deutschland 2024. <sup>5</sup>	2
Abbildung 3: Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland in der zweiten Woche des Jahres 2022. <sup>14</sup>	3
Abbildung 4: Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland in 28. Woche des Jahres 2022. <sup>15</sup>	3
Abbildung 5: Vereinfachtes Fließschema eines Pumpspeicherkraftwerks, das zum Ausgleich bei Schwankungen der Energieversorgung dient.	8
Abbildung 6: Schematischer prinzipieller Aufbau einer Spule (l) und eines Kondensators (r) als Beispiele für elektrische Energiespeicher. <sup>18,26,35</sup>	9
Abbildung 7: Schematischer Aufbau einer Li-Ionen-Batterie. Beim Entladen werden die Li <sup>+</sup> -Ionen in das Kathodenmaterial und analog umgekehrt beim Laden in das Anodenmaterial interkaliert. <sup>18</sup>	11
Abbildung 8: Schematischer Aufbau einer Redox-Flow-Batterie am Beispiel eines Vanadiumoxid-Systems und den allgemeinen Gleichungen für die Anoden- und Kathodenseite. <sup>26</sup>	12
Abbildung 9: Energetische Nutzungsmöglichkeiten der chemischen Speicherung mittels Power-to-Gas-Systemen zur Erzeugung von Wasserstoff und Methan.	13
Abbildung 10: Routen von Power-to-Liquid-Prozessen zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen mittels Fischer-Tropsch- und Methanolsynthese. <sup>18,38</sup>	15
Abbildung 11: Die energetischen Grundlagen sensibler, latenter und thermochemischer Wärmespeicher.	17
Abbildung 12: Sensible, latente und thermochemische Wärmespeicher, kategorisiert nach den Aggregatzuständen ihrer Bestandteile sowie nach Art des Prozesses. <sup>44</sup>	18
Abbildung 13: Vereinfachtes Schema eines biogasbetriebenen, stromgeführten Blockheizkraftwerks mit Betriebsoptimierung der Wärmeversorgung durch einen sensiblen Wärmespeicher.	20
Abbildung 14: Verwendete organische Porosierungsmittel zur Erzeugung von Poren mit einfachen Geometrien in Cordierit-Keramik. Siebfraktion von EPS-Kügelchen zwischen 2,0 mm und 2,5 mm Maschenweite	



## Abbildungsverzeichnis

(l). PLA-Zylinder mit einer Höhe von 5,3 mm und einem Durchmesser von 0,9 mm (m). Kubisches PA6-Granulat mit einer Kantenlänge von 1,5 mm (r).	37
Abbildung 15: Extruder 3devo NEXT der Firma 3devo	39
Abbildung 16: Schematische Darstellung des Extrudiervorgangs (l). Festlegung der drei Raumachsen für die Zuordnung richtungsabhängiger Messgrößen. Die Länge des Tonrohlings wird entlang der x-Achse abgemessen. Fertig extrudierte Tonrohlinge (r).	40
Abbildung 17: Mundstücke für den manuellen Extruder zur Herstellung von Probekörpern mit quadratischen und kreisförmigen Grundflächen.	41
Abbildung 18: Temperatur-Zeit-Programm zur Trocknung. Die Rohlinge werden unmittelbar nach der Formgebung durch Extrusion für je 24 h bei Raumtemperatur (23 °C) und danach stufenweise ebenfalls für je 24 h bei den Temperaturen 60, 75, 90, 105 und 120 °C getrocknet.	41
Abbildung 19: Temperatur-Zeit-Programm des Entbinderungsbrands zum schonenden thermischen Zersetzen der organischen Porosierungsmittel in den Rohlingen.	42
Abbildung 20: Sintern der Formkörper in einem Erdgas-befeuerten Hochtemperatur-Kammerofen der Firma L. Riedhammer.	43
Abbildung 21: Temperatur-Zeit-Programm des Sinterbrandes. In einem Gasofen werden die porosierten Formkörper zunächst mit einer Heizrate von 195,81 °C/h in 5,5 h von Raumtemperatur (23 °C) auf 1100 °C erhitzt. Die Heizrate wird auf 41,81 °C/h verringert, um in weiteren 5,5 h die Zieltemperatur von 1330 °C zu erreichen.	43
Abbildung 22: Elektrisch betriebener Hochtemperaturofen der Firma Nabertherm vom Typ LHT 08/16 für die Sinterung der manuell extrudierten Probekörper.	44
Abbildung 23: Kappsäge der Firma HeDia (o.l.), Oberflächenschleifmaschine der Firma G&N (o.m.) und fertig nachbehandelte Proben zur Bestimmung der Scherbenwärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ mittels der Guarded Hot Plate Methode mit den Maßen 100 mm x 100 mm x 25 mm (u).	45
Abbildung 24: Probekörper mit den Maßen 20 mm x 120 mm x 25 mm zur Messung der dynamischen E-Moduln und der 3-Punkt-Biegefestigkeiten (l) und würfelförmige Proben mit der Kantenlänge 20 mm zur Bestimmung der Druckfestigkeit (r).	46
Abbildung 25: Säge zur Präparation kleiner Probekörper vom Typ WOCO 50P (l), stabförmige Proben mit den Maßen 25 x 5 x 5 mm zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten (m) und Probekörper mit quadratischem und kreisförmigem Querschnitt zur Untersuchung des Einflusses der äußeren Geometrie auf die Thermoschockeigenschaften.	47
Abbildung 26: Schematische Darstellung der einfachen Thermoschockversuche mit stabförmigen Probekörpern mit den zugehörigen Probetypen, Temperaturdifferenzen und der nachfolgenden Analytik.	48
Abbildung 27: Schematische Darstellung der experimentell durchgeführten einfachen Thermoschockversuche zur Untersuchung des Einflusses der Bauteilgeometrie, die zum Abgleich mit den Ergebnissen aus den FEM-Simulationen dienen.	49
Abbildung 28: Schematischer Aufbau für die Bestimmung der 3-Punkt-Biegefestigkeit.	54
Abbildung 29: Universalprüfmaschine der Firma Weissgerber/Seidner-GmbH und Co zur Analyse der Druckfestigkeit.	54
Abbildung 30: Im Schubstangen-Dilatometer platzierter Cordierit-Probekörper (l), Nahaufnahme eines Probekörpers mit kubischen Poren (m). Aussägen der Proben mit je einer längsten lateralen Ausdehnung entlang einer der drei Achsrichtungen (r).	55
Abbildung 31: Temperatur-Zeit-Profil zur Simultanen Thermischen Analyse der fertig gesinterten Proben.	56
Abbildung 32: Prinzip des geometrischen Designs für die FEM-Parameterstudie.	59
Abbildung 33: Qualitative Darstellung zur Gültigkeit der drei Vergleichsspannungshypothesen Gestaltänderungshypothese, Schubspannungshypothese und Normalspannungshypothese je nach Kombination von Belastungsgeschwindigkeit und Materialeigenschaft. <sup>138,139</sup>	61
Abbildung 34: Bestimmung der relevanten Abmessungen für die Berechnung der Volumina der einzelnen Porosierungsmittel-Körner per Lichtmikroskop für sphärische (l), kubische (m) und zylindrische (r) Porosierungsmittel-Geometrien.	63
Abbildung 35: Volumengewichtete Korngrößenverteilung sphärischer (o), kubischer (m) und zylindrischer Porosierungsmittel (u) mit Volumenanteil der Einzelkörner am Gesamtvolumen $\phi$ , Summenverteilung Q3 sowie x10-, x50- und x90-Werten und Halbwertsbreiten (HWB).	64
Abbildung 36: Vierfache Bestimmung der endothermen Energie bei der Fest-Fest-Phasenumwandlung von $\alpha$ -Quarz in $\beta$ -Quarz bei 573 °C.	67
Abbildung 37: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Cordierit-Probe. Die Zylinderporen zeigen eine Vorzugsorientierung entlang ihrer längsten lateralen Ausdehnung in Extrusionsrichtung (x-Achse).	68
Abbildung 38: Zuordnung der Vorzugsorientierung der längsten lateralen Ausdehnung der zylindrischen Poren (l). Auswertung der Anzahlverteilung nach Achsenorientierung für eine Probe mit 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe (r).	68
Abbildung 39: Druckfestigkeit für die nicht porosierte Cordierit-Referenzprobe (N.P) und für Cordierit-Proben, die mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Porosierungsmittel mit sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und	

## Abbildungsverzeichnis

- zylindrischen Poren (ZYL) hergestellt wurden. Messwerte für jede der 3 Achsrichtungen x, y, z und über alle Achsrichtungen gemittelt sowie die Standardabweichung, dargestellt als Fehlerbalken. 70
- Abbildung 40: Druckfestigkeiten gemittelt über die 3 Raumachsen für Proben mit sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen (ZYL) Poren für alle Porosierungsgrade sowie für die nicht porosierte Referenzprobe mit der relativen Minderung der Druckfestigkeit gegenüber der Referenzprobe und den absoluten Druckfestigkeitswerten. 71
- Abbildung 41: Mittelwerte der Rohdichte  $\rho_R$  mit den zugehörigen Standardabweichungen als Fehlerbalken für die nicht porosierte Referenzprobe (N.P.) und die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen Pore (ZYL). 72
- Abbildung 42: Anteile der extrinsischen und intrinsischen Poren sowie der Gesamtporosität in Abhängigkeit von der Porosierungsmittel-Zugabe für Cordierit-Proben mit sphärischen (o.l.), kubischen (o.r.) und zylindrischen Poren (u). In den Graphiken ist jeweils die nicht porosierte Probe (N.P.) eingezeichnet. 75
- Abbildung 43: Anteile der offenen und geschlossenen Poren sowie der Gesamtporenanteil für Cordierit-Proben mit sphärischen (o), kubischen (n) und zylindrischen (u) Porengeometrien im Vergleich mit der nicht porosierten Referenzprobe (N.P.) 76
- Abbildung 44: Anteile der offenen (l) und geschlossenen (r) Porosität in Abhängigkeit des Porosierungsgrades für Cordierit-Proben mit sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen (ZYL) Porengeometrien. 78
- Abbildung 45: Volumengewichtete Porengrößenverteilung für sphärische (o), kubische (m) und zylindrische Poren (u) bestehend aus dem Volumenanteil der Einzelporen am Gesamtvolumen  $\phi$  und der Summenverteilung Q3 sowie die für jede Porenform ermittelten x10-, x50- und x90-Werte für Proben mit 5 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe. 81
- Abbildung 46: Volumengewichtete Porengrößenverteilung für sphärische (o), kubische (m) und zylindrische Poren (u) bestehend aus dem Volumenanteil der Einzelporen am Gesamtvolumen  $\phi$  und der Summenverteilung Q3 sowie die für jede Porenform ermittelten x10-, x50- und x90-Werte für Proben mit 10 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe. 82
- Abbildung 47: Volumengewichtete Porengrößenverteilung für sphärische (o), kubische (m) und zylindrische Poren (u) bestehend aus dem Volumenanteil der Einzelporen am Gesamtvolumen  $\phi$  und der Summenverteilung Q3 sowie die für jede Porenform ermittelten x10-, x50- und x90-Werte für Proben mit 15 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe. 83
- Abbildung 48: Volumengewichtete Porengrößenverteilung für sphärische (o), kubische (m) und zylindrische Poren (u) bestehend aus dem Volumenanteil der Einzelporen am Gesamtvolumen  $\phi$  und der Summenverteilung Q3 sowie die für jede Porenform ermittelten x10-, x50- und x90-Werte für Proben mit 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe. 84
- Abbildung 49: Bestimmung der relevanten Maße zur Berechnung der Volumina der einzelnen Porenvolumina per Lichtmikroskop für sphärische (l), kubische (m) und zylindrische (r) Poren in Cordierit-Keramik. 85
- Abbildung 50: Vergleich der mittleren Scherbenwärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, tr}$  mit zugehörigen Standardabweichungen sowie die jeweilige prozentuale Absenkung der Scherbenwärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, tr}$  in Abhängigkeit von der Porosierungsmittel-Zugabe 87
- Abbildung 51: Mittlere Scherbenwärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, tr}$  aller Cordierit-Proben in Abhängigkeit von den korrelierenden mittleren Rohdichten  $\rho_R$  im Vergleich mit der unporosierten Nullprobe. 88
- Abbildung 52: Mittlere thermische Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  der unporosierten Cordierit-Referenzprobe (o.l.) sowie der Proben mit sphärischen (o.r.), kubischen (u.r.) und zylindrischen Poren (u.l.) entlang der x-, y- und z-Achse, in Abhängigkeit von der Temperatur  $\vartheta$ . 89
- Abbildung 53: Über alle drei Achsen gemittelte thermische Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  der unporosierten Referenzproben sowie der Proben mit 20 Vol.-% sphärischen, 20 Vol.-% kubischen und 20 Vol.-% zylindrischen Poren in Abhängigkeit von der Temperatur  $\vartheta$ . 90
- Abbildung 54: 3-Punkt-Biegefestigkeiten und dynamische E-Moduln der Cordierit-Proben mit sphärischen (o), kubischen (m) und zylindrischen Poren (u) in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen heißem Probekörper und Wasserbad beim Abschreckversuch mit Fehlerbalken der Gaußschen Fehlerfortpflanzung 92
- Abbildung 55: Mittlere 3-Punkt-Biegefestigkeiten aufgetragen gegen die korrelierenden dynamischen E-Moduln. Das Bestimmtheitsmaß weist einen Wert von  $R^2 = 0,93$  auf. 93
- Abbildung 56: Relativer 3-Punkt-Biegefestigkeitsverlust L für die Proben mit sphärischen (o.l.), kubischen (o.r.) und zylindrischen Poren (u) sowie jeweils für die nicht porosierte Referenzprobe. 94
- Abbildung 57: Prozentualer Verlust der 3-Punktbiegefestigkeit L gegenüber den gleichartigen ungeschockten Probetypen mit sphärischen Poren sowie der unporosierten Nullprobe für die Temperaturdifferenzen  $\Delta T = 330, 430, 530, 630$  und  $730$  K. 96
- Abbildung 58: Prozentualer Verlust der 3-Punktbiegefestigkeit L gegenüber den gleichartigen ungeschockten Probetypen mit kubischen Poren sowie der unporosierten Nullprobe für die Temperaturdifferenzen  $\Delta T = 330, 430, 530, 630$  und  $730$  K. 97

## Tabellenverzeichnis

Abbildung 59: Prozentualer Verlust der 3-Punktbiegefestigkeit L gegenüber den gleichartigen ungeschockten Probetypen mit zylindrischen Poren sowie der unporierten Nullprobe für die Temperaturdifferenzen $\Delta T = 330, 430, 530, 630$ und $730$ K.	98
Abbildung 60: Mittels Simultaner Thermischer Analyse zwischen $200\text{ °C}/400\text{ °C}$ , $400\text{ °C}/600\text{ °C}$ und $600\text{ °C}/800\text{ °C}$ ein- und ausgespeicherten massenspezifische Wärmen und die daraus resultierenden Effizienzen für nicht geschockte ( $\Delta T = 0$ K) Proben, die ohne (N.P.) oder mit je 20 Vol.-% sphärischem (SPH 20), kubischem (KUB 20) und zylindrischem Porosierungsmittel hergestellt wurden.	99
Abbildung 61: Die mittels Simultaner Thermischer Analyse zwischen $200\text{ °C}/400\text{ °C}$ , $400\text{ °C}/600\text{ °C}$ und $600\text{ °C}/800\text{ °C}$ ein- und ausgespeicherten massenspezifische Wärmen und die daraus resultierenden Effizienzen für geschockte ( $\Delta T = 730$ K) Proben, die ohne (N.P.) oder mit je 20 Vol.-% sphärischem (SPH 20), kubischem (KUB 20) und zylindrischem Porosierungsmittel hergestellt wurden.	100
Abbildung 62: Berechnete mittlere 3-Punkt-Biegefestigkeiten (I) und relative 3-Punkt-Biegefestigkeits-Verluste L (B) der Proben mit sphärischen, zylindrischen und kubischen Poren sowie nicht porierte Referenzproben in Abhängigkeit von der Anzahl der Thermoschock-Zyklen N.	102
Abbildung 63: Mittels Simultaner Thermischer Analyse zwischen $200\text{ °C}/400\text{ °C}$ , $400\text{ °C}/600\text{ °C}$ und $600\text{ °C}/800\text{ °C}$ von nicht porierten Cordierit-Proben ein- und ausgespeicherte massenspezifische Wärmemengen und die daraus resultierenden Effizienzen in Abhängigkeit der Thermoschock-Zykluszahl ( $\Delta T = 670$ K).	104
Abbildung 64: Vierfache Bestimmung der endothermen Energie bei der Fest-Fest-Phasenumwandlung von $\alpha$ -Quarz in $\beta$ -Quarz bei $573\text{ °C}$ des 100fach zyklisch geschockten Probenmaterials.	106
Abbildung 65: Spannungsprofil der 3. Hauptspannung bei der transienten Simulation eines Thermoschocks an kubischen (I) und zylindrischen (r) Geometrien.	109
Abbildung 66: Durch den Thermoschock resultierende maximale Spannungen in den quaderförmigen (qua) und zylindrischen Probekörpern mit den Maßstäben 1:1 (o.l.), 2,5:1 (o.r.) und 25:1 (u.l.) in Abhängigkeit der Probenhöhe h. Darstellung aller Maßstäbe in einer Graphik (u.r.) mit logarithmischer Skalierung der Abszisse.	111
Abbildung 67: Durch den Thermoschock resultierende maximale Spannungen in den quaderförmigen (qua) und zylindrischen Probekörpern mit den Maßstäben 1:1 (o.l.), 2,5:1 (o.r.) und 25:1 (u.l.) in Abhängigkeit vom Verhältnis von Höhe zu Dicke h/d h. Darstellung aller Maßstäbe in einer Graphik (u.r.) mit linear skalierten Abszisse.	112
Abbildung 68: Durch den Thermoschock resultierende 3. Hauptspannungen (maximale Spannungen) in den quaderförmigen (qua) und zylindrischen Probekörpern mit den Maßstäben 1:1 (o.l.), 2,5:1 (o.r.) und 25:1 (u.l.) in Abhängigkeit von der volumenspezifischen Oberfläche $S_v$ . Darstellung aller Maßstäbe in einer Graphik (u.r.) mit linear Skalierung der Abszisse. Bei den Darstellungen mit je einem einzelnen Maßstab in der Graphik sind zu Vergleichszwecken die zugehörigen Werte des Verhältnisses von Höhe zu Dicke h/d angegeben.	114
Abbildung 69: Lichtmikroskopische Bestimmung der kreisförmigen (I) und quadratischen (r) Grundflächen der zylindrischen und quaderförmigen Probekörper.	115
Abbildung 70: Durch den Thermoschock resultierende, experimentell ermittelte relative Druckfestigkeitsverluste L bei den quaderförmigen und zylindrischen Probekörpern in Abhängigkeit zur Probenhöhe h (I) und zum Verhältnis von Höhe zu Dicke.	118
Abbildung 71: Durch den Thermoschock resultierende, experimentell ermittelte relative Druckfestigkeitsverluste L bei den quaderförmigen und zylindrischen Probekörpern in Abhängigkeit von der Probenhöhe h (I) und dem Verhältnis von Höhe zu Dicke.	119
Abbildung 72: Druckfestigkeiten der quaderförmigen (q) und zylindrischen (z) Körper ohne (NG) und mit (TS) Thermoschockbelastung für Probekörper mit einem Soll-Volumen von $400\text{ mm}^2$ (1) und $1600\text{ mm}^2$ oder einer Soll-Höhe von 10 mm (3) und 40 mm (4).	120
Abbildung 73: Graphische Auftragung der relativen prozentualen Verluste der 3-Punkt-Biegefestigkeit und der Elastizitätsmoduln sowie die kritische Temperaturdifferenz für einen 3-Punkt-Biegefestigkeitsverlust von 30 %.	153

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Energiespeicher unterteilt nach physikalisch-energetischer Klassifizierung mit Beispielen.	7
Tabelle 2: Definitionen der Temperaturbereiche für Wärmespeicher aus der Fachliteratur.	19
Tabelle 3: Typische Einsatztemperaturbereiche von sensiblen, latenten und thermochemischen Wärmespeichern. <sup>44</sup>	19
Tabelle 4: Wichtige Kriterien zur Beurteilung von Wärmespeichersystemen. <sup>50</sup>	22
Tabelle 5: Wichtige Kriterien und die erwünschte Eigenschaften für die Beurteilung von Wärmespeichersystemen. <sup>52</sup>	23
Tabelle 6: Eigenschaften zur Charakterisierung von Energiespeichersystemen.	23

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 7: Zusammenfassung des Einflusses der Porosität auf elektrische, magnetische, thermische und mechanische Werkstoffeigenschaften.	32
Tabelle 8: Zusammensetzung der plastischen Ausgangsmasse zur Herstellung der Cordierit-Keramikproben.	37
Tabelle 9: Zersetzungstemperaturen der eingesetzten Porosierungsmittel.	38
Tabelle 10: Sollmaße für Extrusionsflächen A, Volumina V und Höhen h der gesinterten Probekörper mit quadratischen und kreisförmigen Grundflächen zur Untersuchung des Einflusses von Form und Größe auf die Thermoschockseigenschaften	46
Tabelle 11: Alle 18 Probengeometrien, die auf Basis quadratischer und kreisförmiger Grundflächen konstruiert wurden, für die FEM-Parameterstudie mit den zugehörigen Abmessungen.	58
Tabelle 12: Einstellungen, Parameter und Modelle für die durchgeführten Thermoschocksimulationen im Programm Fluent zur Bestimmung des transienten Temperaturprofils.	60
Tabelle 13: Set aller Materialdaten, die als technische Daten für den Probekörper in der transienten Strukturmechanik verwendet wurden.	62
Tabelle 14: Verwendete Optionen und Einstellungen des transienten Strukturmechanik-Modells.	62
Tabelle 15: Das jeweilige arithmetische Mittel $V_{pm}$ der Einzelporenvolumina der Porosierungsmittelkörner mit den dazugehörigen Standardabweichungen sowie die x10-, x50- und x90-Werte aus der volumengewichteten Korngrößenverteilung.	65
Tabelle 16: Tabellarische Auflistung der Phasen zu den detektierten Hauptpeaks der XRD-Messung mit der Software HighScore Plus.	65
Tabelle 17: Ergebnis der Bestimmung des mittleren Massenanteils und der Standardabweichung von Quarz im fertig gesinterten Probenmaterial.	67
Tabelle 18: Anzahl der ausgezählten Poren N und prozentuale Verteilung gemäß der Orientierung der längsten lateralen Ausdehnung von Cordierit-Proben entlang der x-, y- und z-Achse für Cordierit-Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe und zylindrischen Poren.	69
Tabelle 19: Rohdichten, Reindichten und berechnete Anteile der extrinsischen und intrinsischen Poren sowie die Gesamtporositäten unterschiedlich porosierter Cordierit-Keramik-Proben.	74
Tabelle 20: Rohdichten, Reindichten und berechnete Porositäten für offene und geschlossene Poren sowie Gesamtporenanteile für alle Cordierit-Probentypen. <sup>129</sup>	77
Tabelle 21: Die arithmetischen Mittel $V_{sp,m}$ der Einzelporenvolumina mit den dazugehörigen Standardabweichungen s sowie die x10-, x50- und x90-Werte aus der volumengewichteten Porengrößenverteilung für die Porosierungsmittel-Zugaben (PM-Zugabe) von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sowie der Korngrößenverteilung der zugehörigen Porosierungsmittel.	79
Tabelle 22: Mittelwerte der Scherbenwärmeleitfähigkeiten sowie Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Porosierungsmittel-Zugabe und Vergleich mit der nicht porosierten Referenzprobe.	86
Tabelle 23: Kritische Temperaturdifferenzen $\Delta T_c$ für die nicht porosierte Referenzprobe und die Proben mit kubischen Poren. Die Proben mit sphärischen und zylindrischen Poren zeigen im einfachen Thermoschockversuch keine kritische Temperaturdifferenz und sind daher nicht erfasst.	95
Tabelle 24: Mit linearer Interpolation bestimmte Zyklenzahlen, bis zu denen für die nicht porosierte Referenz sowie die mit 5 und 20 Vol.-% sphärischem, kubischem und zylindrischen Porosierungsmittel hergestellten Proben ein Biegefestigkeits-Verlust $\geq 30\%$ stattfindet.	102
Tabelle 25: Anzahl und Anteil intakter Probekörper für bei den Probezyklen 0, 1, 3, 7, 15, 25, 37, 60 und 100 der nicht porosierten Referenzprobe (N.P.) sowie der mit 5 und 20 Vol.-% sphärisch (S5, S20), kubisch (K5, K20) und zylindrisch (Z5, Z20) porosierten Proben.	103
Tabelle 26: Tabellarische Auflistung der Phasen zu den detektierten Hauptpeaks der XRD-Messung mit der Software HighScore Plus nach 100 Thermoschockzyklen.	105
Tabelle 27: Ergebnis der Bestimmung des mittleren Massenanteils und der Standardabweichung von Quarz im Probenmaterial nach 100 Thermoschockzyklen.	107
Tabelle 28: Erster und zweiter Thermoschockparameter R und R' sowie kritische Temperaturdifferenz $\Delta T_c$ und linear interpolierte Anzahl der Zyklen N beim Abschrecken im Wasserbad mit $\Delta T = 670\text{ K}$ bis zum Materialversagen bzw. bis zu einem 3-Punkt-Biegefestigkeitsverlust von $> 30\%$ für die nicht porosierte Referenzprobe und für die Probekörper, die mit je 20 Vol.-% sphärischem (SPH), kubischem (KUB) und zylindrischem (ZYL) Porosierungsmittel hergestellt wurden.	107
Tabelle 29: Kenngrößen zur Charakterisierung der mit 5 Vol.-% sphärischen oder zylindrischen (SPH 5 und ZYL 5) sowie mit 20 Vol.-%s sphärischen (SPH 20) Porosierungsmitteln hergestellten Wärmespeichermassen und deren prozentualen Verbesserungen/Verschlechterungen gegenüber der nicht porosierten Referenz.	108
Tabelle 30: Maximale Beträge der 3. Hauptspannung (HS) und die Werte der möglichen Einflussvariablen Körperhöhe h, das Verhältnis von Höhe zu Dicke h/d, Volumen V, Körperoberfläche S sowie die volumenspezifische Oberfläche $S_v$ für alle Probentypen und Maßstäbe.	110
Tabelle 31: Werte für die Grundfläche A, die Probenhöhe h, das Probenvolumen V, das Verhältnis von Höhe zu Dicke h/d, die Bruchkraft beim Druckfestigkeitsprüfung F, die Druckfestigkeit $\sigma_{DF}$ und der relative Verlust der Druckfestigkeit durch den Thermoschock L für quaderförmige Proben.	116

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 32: Werte für die Grundfläche A, die Probenhöhe h, das Probenvolumen V, das Verhältnis von Höhe zu Dicke h/d, die Bruchkraft beim der Druckfestigkeitsprüfung F, die Druckfestigkeit $\sigma_{DF}$ und der relative Verlust der Druckfestigkeit durch den Thermoschock L für die zylindrischen Proben.	117
Tabelle 33: Abmessungen, Masse und Dichte sowie die Elastizitätsmoduln und die 3-Punkt-Biegefestigkeit für Ziegelproben vor und nach dem Abschrecken im Wasserbad bei den Temperaturdifferenzen $\Delta T = 80\text{ K}, 180\text{ K}, 280\text{ K}, 380\text{ K}, 480\text{ K}$ und $580\text{ K}$ .	152
Tabelle 34: Berechnete Werte für die relativen prozentualen Verluste der E-Moduln und der 3-Punktbiegefestigkeit nach einem einzelnen Thermoschock ( $N = 1$ ).	153
Tabelle 35: Per Lichtmikroskop gemessene Durchmesser und daraus berechnete Volumina des sphärischen Porosierungsmittels aus EPS.	154
Tabelle 36: Per Lichtmikroskop bestimmte Querschnittsfläche und daraus berechnete Volumina des kubischen Porosierungsmittels aus PA6.	156
Tabelle 37: Per Lichtmikroskop bestimmte Durchmesser und Höhen sowie die daraus berechnete Volumina des zylindrischen Porosierungsmittels aus PLA.	159
Tabelle 47: Druckfestigkeiten $\sigma_{DF}$ der fertig gesinterten, stabförmigen Proben in x-, y- und z-Richtung für die nicht porosieren Referenzproben (N.P.) sowie für die porosierte Proben mit sphärischen, kubischen und zylindrischen Poren mit den Porosierungsgraden 5, 10, 15 und 20 Vol.-%.	162
Tabelle 48: Mittlere Druckfestigkeiten der Messwerte aus Tabelle 47 für alle 3 Achsrichtungen x, y und z mit den zugehörigen Standardabweichungen und den über alle 3 Achsrichtungen gemittelten Werten.	163
Tabelle 49: Die mittleren Rohdichten $\rho_R$ , gemittelt aus je 10 Rohdichtewerten, die aus der Masse m und den gemittelten Probeabmessungen Höhe $h_m$ , Länge $l_m$ und Breite $b_m$ berechnet wurden, sowie die jeweiligen Standardabweichungen $s(\rho_R)$ für die nicht porosierte Referenzproben und die daraus berechneten extrinsischen Porenanteile $P_e$ .	163
Tabelle 50: Die mittleren Rohdichten $\rho_R$ , gemittelt aus je 10 Rohdichtewerten, die aus der Masse m und den gemittelten Probeabmessungen Höhe $h_m$ , Länge $l_m$ und Breite $b_m$ berechnet wurden, sowie die jeweiligen Standardabweichungen $s(\rho_R)$ für die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sphärischen Poren und die daraus berechneten extrinsischen Porenanteile $P_e$ .	164
Tabelle 51: Die mittleren Rohdichten $\rho_R$ , gemittelt aus je 10 Rohdichtewerten, die aus der Masse m und den gemittelten Probeabmessungen Höhe $h_m$ , Länge $l_m$ und Breite $b_m$ berechnet wurden, sowie die jeweiligen Standardabweichungen $s(\rho_R)$ für die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% kubischen Poren und die daraus berechneten extrinsischen Porenanteile $P_e$ .	165
Tabelle 52: Die mittleren Rohdichten $\rho_R$ , gemittelt aus je 10 Rohdichtewerten, die aus der Masse m und den gemittelten Probeabmessungen Höhe $h_m$ , Länge $l_m$ und Breite $b_m$ berechnet wurden, sowie die jeweiligen Standardabweichungen $s(\rho_R)$ für die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% zylindrischen Poren und die daraus berechneten extrinsischen Porenanteile $P_e$ .	166
Tabelle 53: Die mittels He-Pyknometer sechsfach bestimmten, gemittelten Reindichten $\rho$ mit den zugehörigen Standardabweichungen für die nicht porosierte Referenzproben sowie die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sphärischen, kubischen und zylindrischen Poren.	167
Tabelle 54: Maße der nicht porosierte Proben für die Archimedes-Messungen. Höhe h, Breite b und Länge l wurden für jede Probe dreifach bestimmt und daraus die Mittelwerte $h_m$ , $b_m$ sowie $l_m$ und die zugehörigen Standardabweichungen $s(h)$ , $s(b)$ und $s(l)$ berechnet.	167
Tabelle 55: Maße der Proben mit einem Porenanteil (PA) von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% mit sphärischer Porenform für die Archimedes-Messungen. Höhe h, Breite b und Länge l wurden für jede Probe dreifach bestimmt und daraus die Mittelwerte $h_m$ , $b_m$ sowie $l_m$ und die zugehörigen Standardabweichungen $s(h)$ , $s(b)$ und $s(l)$ berechnet.	168
Tabelle 56: Maße der Proben mit einem Porenanteil (PA) von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% mit kubischer Porenform (PF) für die Archimedes-Messungen. Höhe h, Breite b und Länge l wurden für jede Probe dreifach bestimmt und daraus die Mittelwerte $h_m$ , $b_m$ sowie $l_m$ und die zugehörigen Standardabweichungen $s(h)$ , $s(b)$ und $s(l)$ berechnet.	169
Tabelle 57: Maße der Proben mit einem Porenanteil (PA) von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% mit zylindrischer Porenform (PF) für die Archimedes-Messungen. Höhe h, Breite b und Länge l wurden für jede Probe dreifach bestimmt und daraus die Mittelwerte $h_m$ , $b_m$ sowie $l_m$ und die zugehörigen Standardabweichungen $s(h)$ , $s(b)$ und $s(l)$ berechnet.	170
Tabelle 58: Mit den Maßen aus Tabelle 54 und den Massen des nassen, trockenen und unter Wasser gewogenen Probekörpers $m_n$ , $m_{tr}$ und $m_{uw}$ nach Archimedes berechnetes Brutto-, Netto- und Porenvolumen $V_B$ , $V_N$ und $V_P$ sowie die daraus bestimmte offene Porosität $P_{of}$ für die ohne Porosierungsmittel hergestellten Referenzproben.	170
Tabelle 59: Mit den Maßen aus Tabelle 55 und den Massen des nassen, trockenen und unter Wasser gewogenen Probekörpers $m_n$ , $m_{tr}$ und $m_{uw}$ nach Archimedes berechnetes Brutto-, Netto- und Porenvolumen $V_B$ , $V_N$ und $V_P$ sowie die daraus bestimmte offene Porosität $P_{of}$ für die mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sphärischem Porosierungsmittel hergestellten Proben.	172

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 60: Mit den Maßen aus Tabelle 56 und den Massen des nassen, trockenen und unter Wasser gewogenen Probekörpers $m_n$ , $m_{tr}$ und $m_{uw}$ nach Archimedes berechnetes Brutto-, Netto- und Porenvolumen $V_B$ , $V_N$ und $V_P$ sowie die daraus bestimmte offene Porosität $P_{of}$ für die mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% kubischem Porosierungsmittel hergestellten Proben.	173
Tabelle 61: Mit den Maßen aus Tabelle 57 und den Massen des nassen, trockenen und unter Wasser gewogenen Probekörpers $m_n$ , $m_{tr}$ und $m_{uw}$ nach Archimedes berechnetes Brutto-, Netto- und Porenvolumen $V_B$ , $V_N$ und $V_P$ sowie die daraus bestimmte offene Porosität $P_{of}$ für die mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% zylindrischem Porosierungsmittel hergestellten Proben.	174
Tabelle 62: Per Lichtmikroskop gemessene Durchmesser und daraus berechnete Volumina der sphärischen Poren von Proben mit 5 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.	175
Tabelle 63: Per Lichtmikroskop bestimmte Querschnittsfläche und daraus berechnete Volumina der kubischen Poren von Proben mit 5 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.	177
Tabelle 64: Per Lichtmikroskop bestimmte Durchmesser und Höhen sowie die daraus berechnete Volumina der zylindrischen Poren von Proben mit 5 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.	180
Tabelle 62: Per Lichtmikroskop gemessene Durchmesser und daraus berechnete Volumina der sphärischen Poren von Proben mit 10 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.	183
Tabelle 63: Per Lichtmikroskop bestimmte Querschnittsfläche und daraus berechnete Volumina der kubischen Poren von Proben mit 10 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.	185
Tabelle 64: Per Lichtmikroskop bestimmte Durchmesser und Höhen sowie die daraus berechnete Volumina der zylindrischen Poren von Proben mit 10 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.	188
Tabelle 62: Per Lichtmikroskop gemessene Durchmesser und daraus berechnete Volumina der sphärischen Poren von Proben mit 15 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.	191
Tabelle 63: Per Lichtmikroskop bestimmte Querschnittsfläche und daraus berechnete Volumina der kubischen Poren von Proben mit 15 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.	193
Tabelle 64: Per Lichtmikroskop bestimmte Durchmesser und Höhen sowie die daraus berechnete Volumina der zylindrischen Poren von Proben mit 15 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.	196
Tabelle 62: Per Lichtmikroskop gemessene Durchmesser und daraus berechnete Volumina der sphärischen Poren von Proben mit 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.	199
Tabelle 63: Per Lichtmikroskop bestimmte Querschnittsfläche und daraus berechnete Volumina der kubischen Poren von Proben mit 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.	201
Tabelle 64: Per Lichtmikroskop bestimmte Durchmesser und Höhen sowie die daraus berechnete Volumina der zylindrischen Poren von Proben mit 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.	204
Tabelle 65: Scherbenwärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ für die nicht porierten Referenzproben und die Probe mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe an sphärischem, kubischem und zylindrischem Porosierungsmittel. Aus je 3 Messungen DIN EN 12667 an Platten mit den Maßen 10 x 10 x 2,5 cm wurden die Mittelwerte und die zugehörigen Standardabweichungen gebildet.	206
Tabelle 66: Thermischer Ausdehnungskoeffizient der nicht porierten Referenzprobe in x-, y- und z-Richtung, gemessen in Abhängigkeit der Temperatur. Aus je 2 Werten wurde ein der Mittelwert gebildet.	207
Tabelle 67: Thermischer Ausdehnungskoeffizient der mit 20 Vol.-% sphärischem Porosierungsmittel porierten Probe in x-, y- und z-Richtung, gemessen in Abhängigkeit der Temperatur. Aus je 2 Werten wurde ein der Mittelwert gebildet.	212
Tabelle 68: Thermischer Ausdehnungskoeffizient der mit 20 Vol.-% kubischem Porosierungsmittel porierten Probe in x-, y- und z-Richtung, gemessen in Abhängigkeit der Temperatur. Aus je 2 Werten wurde ein der Mittelwert gebildet.	217
Tabelle 69: Thermischer Ausdehnungskoeffizient der mit 20 Vol.-% zylindrischem Porosierungsmittel porierten Probe in x-, y- und z-Richtung, gemessen in Abhängigkeit der Temperatur. Aus je 2 Werten wurde ein der Mittelwert gebildet.	222
Tabelle 70: STA-Ergebnisse der einfachen Thermoschockversuche für ungeschockte Proben mit der Temperaturdifferenz $\Delta T = 0$ K und mit der Temperaturdifferenz $\Delta T = 730$ K geschockte Proben, die ohne Porosierungsmittel hergestellt wurden (N.P.) oder mit 20 Vol.-% sphärischem (SPH), kubischem (KUB) oder zylindrischem (ZYL) poriert wurden. Dargestellt sind die ein- und ausgespeicherten Wärmemengen $Q_{m, ein}$ und $Q_{m, aus}$ sowie die daraus resultierende Effizienz $\eta$ für die Temperaturbereiche 200 °C/400 °C, 400 °C/600 °C und 600 °C/800 °C.	227
Tabelle 71: Die 3-Punkt-Biegefestigkeiten und die mittels Impulserregung bestimmten E-Moduln der einfachen Thermoschockversuche für die nicht porierten Referenzproben (N.P.) sowie die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Porosierungsmittelanteil (PA) für die sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen (ZYL) Porenformen (PF). Die zur Berechnung notwendigen Werte Höhe h, Breite b und Länge l wurden für jede Probe dreifach bestimmt und daraus die Mittelwerte $h_m$ , $b_m$ sowie $l_m$ berechnet. Weiterhin aufgelistet sind die mit der Impulserregung bestimmten Poisson-Zahlen $\mu$ und Frequenzen f sowie die berechneten Korrekturterme T, die gewogenen Massen m und die beim 3-Punkt-Biegeversuch aufgenommenen Bruchkräfte F.	228

## Tabellenverzeichnis

---

- Tabelle 72: Die aus Tabelle 71 gemittelten 3-Punkt-Biegefestigkeiten und E-Moduln einfachen Thermoschockversuche für die nicht porosierten Referenzproben (N.P.) sowie die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Porosierungsmittelanteil (PA) für die sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen (ZYL) Porenformen (PF) sowie ihre Standardabweichungen  $s$  und die Gaußsche Fehlerfortpflanzung FFP nach Gleichung 18 Für die 3-Punkt-Biegefestigkeit mit den dazu nötigen Größen und Ableitungen. 239
- Tabelle 73: Die bei den Zyklenversuchen gemessenen Frequenzen  $f_{\text{Flexural}}$  und daraus bestimmten E-Moduln sowie die aus den E-Moduln nach der Korrelation aus Abbildung 55 berechneten 3-Punkt-Biegefestigkeiten  $\sigma_{3P, \text{calc}}$  für die nicht porosierten Referenzproben (N.P.) sowie Proben mit 5 und 20 Vol.-% Porosierungsmittelanteil (PA) für die sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen (ZYL) Porenformen (PF). 242
- Tabelle 74: STA-Ergebnisse der zyklischen Thermoschockversuche für geschockte Proben mit der Temperaturdifferenz  $\Delta T = 650 \text{ K}$  und mit der ohne Porosierungsmittel hergestellt wurden. Dargestellt die Einzelwerte aus Messung 1 und 2 sowie die daraus resultierenden Mittelwerte der ein- und ausgespeicherten Wärmemengen  $Q_{m, \text{ein}}$  und  $Q_{m, \text{aus}}$  und den daraus resultierenden Effizienzen  $\eta$  für die Temperaturbereiche  $200 \text{ °C}/400 \text{ °C}$ ,  $400 \text{ °C}/600 \text{ °C}$  und  $600 \text{ °C}/800 \text{ °C}$ . 247
- Tabelle 75: Zusammengefasste Maße, geometrische Größen und Ergebnisse der FEM-Simulation zur Untersuchung des Einflusses der Bauteilgeometrie auf die Thermoschockeigenschaften. Betrag der 3. Hauptspannung, Oberfläche  $S$ , volumenspezifische Oberfläche  $S_v$ , Maßstab  $M$ , Höhe-zu-Dicke-Verhältnis  $h/d$ , Maße in  $x$ ,  $y$  und  $z$ -Richtung, Volumen  $V$  und Querschnittsfläche der Extrusion  $A$  für die zylindrischen und quaderförmigen Körper. 248
- Tabelle 76: Maße, berechnete Größen und Messwerte der Versuche zum Einfluss der Bauteilgeometrie für die quadratischen (q) geschockten (TS) und nicht geschockten (NG) Proben. Extrusionsquerschnittsfläche  $A$ , Kantenlänge  $a$ , Höhe bzw. Extrusionslänge  $h$ , Volumen  $V$ , Höhe-zu-Dicke-Verhältnis  $h/d$ , Bruchkraft  $F$ , Druckfestigkeit  $\sigma_{DF}$  mit den zugehörigen Mittelwerten und Standardabweichungen  $s$  sowie den berechneten relativen prozentualen Verlusten der Druckfestigkeit  $L$ . 249
- Tabelle 77: Maße, berechnete Größen und Messwerte der Versuche zum Einfluss der Bauteilgeometrie für die quadratischen (z) geschockten (TS) und nicht geschockten (NG) Proben. Extrusionsquerschnittsfläche  $A$ , Durchmesser  $d$ , Höhe bzw. Extrusionslänge  $h$ , Volumen  $V$ , Höhe-zu-Dicke-Verhältnis  $h/d$ , Bruchkraft  $F$ , Druckfestigkeit  $\sigma_{DF}$  mit den zugehörigen Mittelwerten und Standardabweichungen  $s$  sowie den berechneten relativen prozentualen Verlusten der Druckfestigkeit  $L$ . 250

## 10 Anlage / Anhang

### 10.1 Vorversuche

Bei Vorversuchen mit Ziegelproben wurden die Probekörper auf 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C oder 600 °C aufgeheizt. Nach 1 Stunde Haltezeit wurden die Proben in Wasser abgeschreckt, das auf 20 °C temperiert war. Daraus resultieren die Temperaturdifferenzen  $\Delta T = 80 \text{ K}$ , 180 K, 280 K, 380 K, 480 K und 580 K (Tabelle 33).

Tabelle 33: Abmessungen, Masse und Dichte sowie die Elastizitätsmoduln und die 3-Punkt-Biegefestigkeit für Ziegelproben vor und nach dem Abschrecken im Wasserbad bei den Temperaturdifferenzen  $\Delta T = 80 \text{ K}$ , 180 K, 280 K, 380 K, 480 K und 580 K.

Proben nach einem Thermoschock N = 1										
$\Delta T$ [K]	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Masse [g]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	$E_{N=0}$ [GPa]	$E_{N=1}$ [GPa]	$\Delta E$ [%]	$\sigma_{3P}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
80	112,2	29,6	19,1	63,2	116,6	1,85	10,9	10,5	3,8	10,3
180	113,0	30,2	17,8	60,8	113,0	1,86	10,9	10,1	7,2	8,8
280	113,5	33,1	21,3	79,8	147,6	1,85	9,8	8,6	12,8	6,9
380	112,9	31,3	17,3	61,2	112,0	1,83	9,9	8,6	13,1	5,4
480	112,8	30,5	17,1	58,7	107,5	1,83	9,6	7,8	19,3	4,5
580	113,2	29,5	19,2	64,3	120,8	1,88	10,4	6,8	34,0	3,3
Nicht geschockte Proben N = 0										
$\Delta T$ [K]	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Masse [g]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	$E_{N=0}$ [GPa]	$E_{N=1}$ [GPa]	$\Delta E$ [%]	$\sigma_{3P}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0	113,5	29,3	19,8	65,6	120,7	1,84	10,3	10,8	-4,9	11,7
0	112,3	29,5	20,0	66,2	124,7	1,88	-	-	-	10,7

Vor und nach dem Einzelschock wurde der Elastizitätsmodul mit der Impulserregungstechnik gemessen. Die 3-Punkt-Biegefestigkeit der Probekörper wurde nach den Einzelschocks und nach der Analyse der Elastizitätsmoduln bestimmt. Da die Messung der 3-Punkt-Biegefestigkeit zerstörend ist, wurden zum Berechnen des relativen Verlusts der 3-Punkt-Biegefestigkeit die Werte von nicht geschockten Proben als Referenz verwendet. Da die Impulserregungstechnik nicht zerstörend ist, wurde für den jeweiligen relativen Verlust beim Elastizitätsmodul jeweils der Messwert vor und nach dem Thermoschock bestimmt (Tabelle 34).



Tabelle 34: Berechnete Werte für die relativen prozentualen Verluste der E-Moduln und der 3-Punktbiegefestigkeit nach einem einzelnen Thermoschock ( $N = 1$ ).

<b>N = 1</b>		
$\Delta T$ [K]	$L(E)$ [%]	$L(\sigma_{3P})$ [%]
80	3,85	7,63
180	7,24	21,11
280	12,84	38,34
380	13,10	51,45
480	19,27	60,12
580	34,04	70,59

Mittels linearer Interpolation wurde die kritische Temperaturdifferenz  $\Delta T_c$  bestimmt und in der graphischen Auftragung der relativen prozentualen Verluste  $L$  der E-Modul- und 3-Punkt-Biegefestigkeit dargestellt (Abbildung 73).

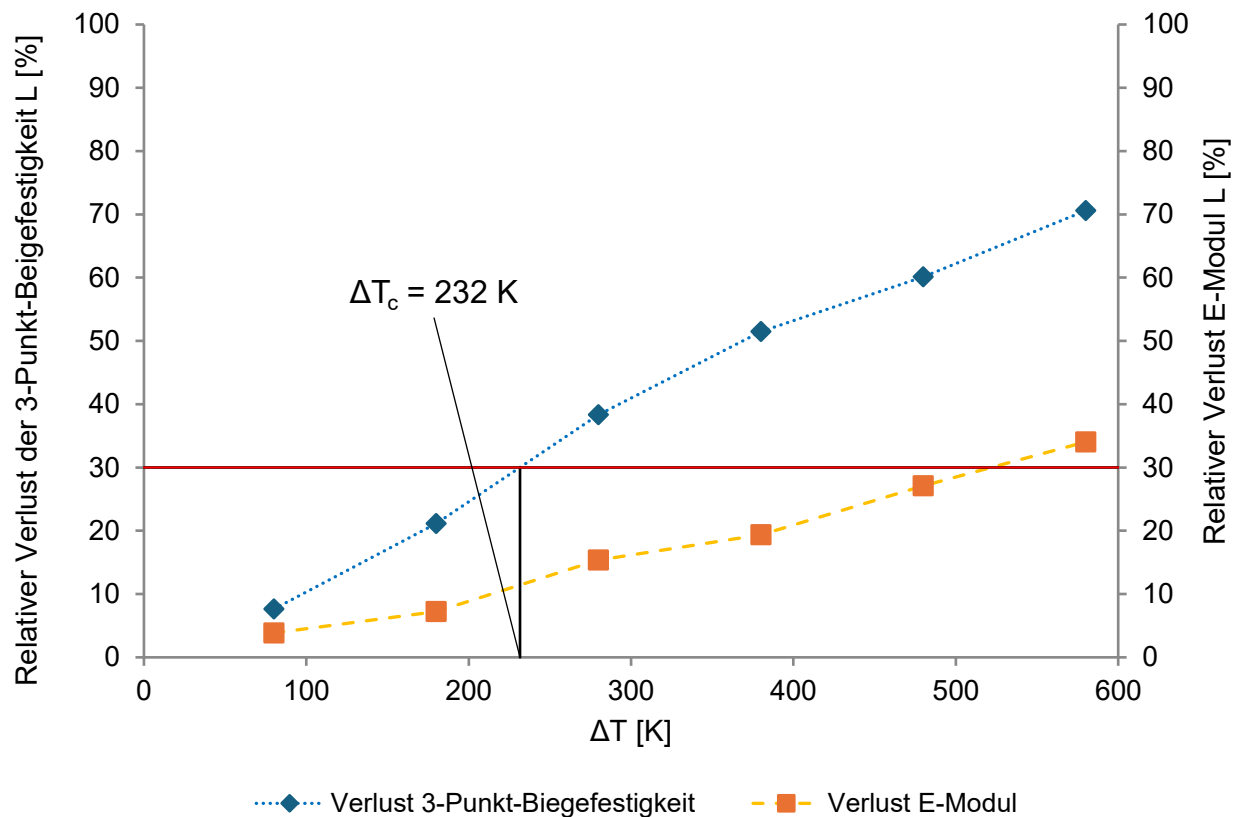


Abbildung 73: Graphische Auftragung der relativen prozentualen Verluste der 3-Punkt-Biegefestigkeit und der Elastizitätsmoduln sowie die kritische Temperaturdifferenz für einen 3-Punkt-Biegefestigkeitsverlust von 30 %.

Die kritische Temperaturdifferenz der Ziegelkeramik ist mit  $\Delta T_c = 232 \text{ K}$  deutlich zu niedrig für Anwendungen im Hochtemperaturbereich.

## 10.2 Daten

Tabelle 35: Per Lichtmikroskop gemessene Durchmesser und daraus berechnete Volumina des sphärischen Porosierungsmittels aus EPS.

Nr.	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
1	2494	2,49	8,12
2	2514	2,51	8,32
3	2608	2,61	9,29
4	2641	2,64	9,65
5	2678	2,68	10,06
6	2729	2,73	10,64
7	2745	2,75	10,83
8	2781	2,78	11,26
9	2799	2,80	11,48
10	2802	2,80	11,52
11	2819	2,82	11,73
12	2841	2,84	12,01
13	2843	2,84	12,03
14	2851	2,85	12,13
15	2854	2,85	12,17
16	2855	2,86	12,18
17	2863	2,86	12,29
18	2867	2,87	12,34
19	2873	2,87	12,42
20	2877	2,88	12,47
21	2883	2,88	12,55
22	2893	2,89	12,68
23	2899	2,90	12,76
24	2916	2,92	12,98
25	2917	2,92	13,00
26	2921	2,92	13,05
27	2924	2,92	13,09
28	2924	2,92	13,09
29	2927	2,93	13,13
30	2930	2,93	13,17
31	2942	2,94	13,33
32	2943	2,94	13,35
33	2944	2,94	13,36
34	2965	2,97	13,65

Nr.	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
35	2971	2,97	13,73
36	2976	2,98	13,80
37	2991	2,99	14,01
38	2998	3,00	14,11
39	3002	3,00	14,17
40	3003	3,00	14,18
41	3004	3,00	14,19
42	3010	3,01	14,28
43	3012	3,01	14,31
44	3018	3,02	14,39
45	3021	3,02	14,44
46	3034	3,03	14,62
47	3039	3,04	14,70
48	3042	3,04	14,74
49	3046	3,05	14,80
50	3057	3,06	14,96
51	3058	3,06	14,97
52	3066	3,07	15,09
53	3070	3,07	15,15
54	3080	3,08	15,30
55	3081	3,08	15,31
56	3083	3,08	15,34
57	3086	3,09	15,39
58	3090	3,09	15,45
59	3092	3,09	15,48
60	3092	3,09	15,48
61	3094	3,09	15,51
62	3106	3,11	15,69
63	3117	3,12	15,86
64	3125	3,13	15,98
65	3132	3,13	16,09
66	3134	3,13	16,12
67	3137	3,14	16,16
68	3139	3,14	16,19
69	3145	3,15	16,29
70	3145	3,15	16,29
71	3149	3,15	16,35
72	3162	3,16	16,55
73	3164	3,16	16,58
74	3176	3,18	16,77
75	3177	3,18	16,79
76	3178	3,18	16,81
77	3183	3,18	16,89

Nr.	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
78	3196	3,20	17,09
79	3196	3,20	17,09
80	3200	3,20	17,16
81	3201	3,20	17,17
82	3201	3,20	17,17
83	3209	3,21	17,30
84	3209	3,21	17,30
85	3210	3,21	17,32
86	3219	3,22	17,46
87	3222	3,22	17,51
88	3239	3,24	17,79
89	3249	3,25	17,96
90	3256	3,26	18,07
91	3284	3,28	18,54
92	3287	3,29	18,60
93	3290	3,29	18,65
94	3313	3,31	19,04
95	3316	3,32	19,09
96	3336	3,34	19,44
97	3338	3,34	19,47
98	3342	3,34	19,54
99	3372	3,37	20,08
100	3374	3,37	20,11

Tabelle 36: Per Lichtmikroskop bestimmte Querschnittsfläche und daraus berechnete Volumina des kubischen Porosierungsmittels aus PA6.

Nr.	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
1	1972911	1,97	2,77
2	1997144	2,00	2,82
3	2016555	2,02	2,86
4	2029203	2,03	2,89
5	2036494	2,04	2,91
6	2039889	2,04	2,91
7	2052951	2,05	2,94
8	2058590	2,06	2,95
9	2064260	2,06	2,97
10	2069308	2,07	2,98
11	2069483	2,07	2,98
12	2073268	2,07	2,99
13	2080527	2,08	3,00
14	2087188	2,09	3,02

## Anlage / Anhang

Nr.	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
15	2091342	2,09	3,02
16	2105194	2,11	3,05
17	2110158	2,11	3,07
18	2110503	2,11	3,07
19	2116672	2,12	3,08
20	2117394	2,12	3,08
21	2119346	2,12	3,09
22	2125434	2,13	3,10
23	2126582	2,13	3,10
24	2137608	2,14	3,13
25	2144614	2,14	3,14
26	2147944	2,15	3,15
27	2149918	2,15	3,15
28	2150314	2,15	3,15
29	2151823	2,15	3,16
30	2152768	2,15	3,16
31	2161396	2,16	3,18
32	2172063	2,17	3,20
33	2173901	2,17	3,21
34	2176369	2,18	3,21
35	2178151	2,18	3,21
36	2180562	2,18	3,22
37	2181251	2,18	3,22
38	2185595	2,19	3,23
39	2194379	2,19	3,25
40	2197259	2,20	3,26
41	2198594	2,20	3,26
42	2201107	2,20	3,27
43	2201924	2,20	3,27
44	2203160	2,20	3,27
45	2208701	2,21	3,28
46	2212055	2,21	3,29
47	2215885	2,22	3,30
48	2216510	2,22	3,30
49	2224063	2,22	3,32
50	2228419	2,23	3,33
51	2236724	2,24	3,35
52	2240083	2,24	3,35
53	2241301	2,24	3,36
54	2242137	2,24	3,36
55	2248602	2,25	3,37
56	2249243	2,25	3,37
57	2249657	2,25	3,37

## Anlage / Anhang

Nr.	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
58	2254756	2,25	3,39
59	2257309	2,26	3,39
60	2264628	2,26	3,41
61	2266543	2,27	3,41
62	2267072	2,27	3,41
63	2268768	2,27	3,42
64	2268997	2,27	3,42
65	2269916	2,27	3,42
66	2270261	2,27	3,42
67	2271765	2,27	3,42
68	2274970	2,27	3,43
69	2295568	2,30	3,48
70	2300318	2,30	3,49
71	2315627	2,32	3,52
72	2315885	2,32	3,52
73	2319986	2,32	3,53
74	2323468	2,32	3,54
75	2326767	2,33	3,55
76	2329738	2,33	3,56
77	2330431	2,33	3,56
78	2338482	2,34	3,58
79	2341348	2,34	3,58
80	2345228	2,35	3,59
81	2349853	2,35	3,60
82	2356054	2,36	3,62
83	2369837	2,37	3,65
84	2373777	2,37	3,66
85	2380267	2,38	3,67
86	2381896	2,38	3,68
87	2387791	2,39	3,69
88	2392800	2,39	3,70
89	2400848	2,40	3,72
90	2406704	2,41	3,73
91	2412561	2,41	3,75
92	2456894	2,46	3,85
93	2463382	2,46	3,87
94	2473805	2,47	3,89
95	2476443	2,48	3,90
96	2483172	2,48	3,91
97	2486269	2,49	3,92
98	2548775	2,55	4,07
99	2710829	2,71	4,46
100	2718401	2,72	4,48

Tabelle 37: Per Lichtmikroskop bestimmte Durchmesser und Höhen sowie die daraus berechnete Volumina des zylindrischen Porosierungsmittels aus PLA.

Nr.	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
1	937	3163	0,94	3,16	2,18
2	852	5234	0,85	5,23	2,98
3	847	5309	0,85	5,31	2,99
4	866	5129	0,87	5,13	3,02
5	863	5236	0,86	5,24	3,06
6	881	5093	0,88	5,09	3,10
7	900	4903	0,90	4,90	3,12
8	860	5389	0,86	5,39	3,13
9	867	5310	0,87	5,31	3,13
10	879	5187	0,88	5,19	3,15
11	884	5143	0,88	5,14	3,16
12	876	5240	0,88	5,24	3,16
13	875	5254	0,88	5,25	3,16
14	896	5044	0,90	5,04	3,18
15	876	5299	0,88	5,30	3,19
16	901	5017	0,90	5,02	3,20
17	914	4888	0,91	4,89	3,21
18	886	5204	0,89	5,20	3,21
19	900	5049	0,90	5,05	3,21
20	876	5335	0,88	5,34	3,22
21	879	5318	0,88	5,32	3,23
22	872	5408	0,87	5,41	3,23
23	888	5246	0,89	5,25	3,25
24	896	5154	0,90	5,15	3,25
25	896	5157	0,90	5,16	3,25
26	887	5280	0,89	5,28	3,26
27	904	5091	0,90	5,09	3,27
28	882	5354	0,88	5,35	3,27
29	890	5259	0,89	5,26	3,27
30	898	5170	0,90	5,17	3,27
31	886	5315	0,89	5,32	3,28
32	887	5327	0,89	5,33	3,29
33	888	5319	0,89	5,32	3,29
34	902	5165	0,90	5,17	3,30
35	890	5307	0,89	5,31	3,30
36	909	5091	0,91	5,09	3,30
37	900	5198	0,90	5,20	3,31
38	902	5176	0,90	5,18	3,31
39	899	5229	0,90	5,23	3,32
40	906	5152	0,91	5,15	3,32

Nr.	d [µm]	h [µm]	d [mm]	h [mm]	V [mm³]
41	902	5201	0,90	5,20	3,32
42	895	5284	0,90	5,28	3,32
43	895	5300	0,90	5,30	3,33
44	895	5302	0,90	5,30	3,34
45	892	5341	0,89	5,34	3,34
46	905	5189	0,91	5,19	3,34
47	892	5344	0,89	5,34	3,34
48	903	5233	0,90	5,23	3,35
49	906	5202	0,91	5,20	3,35
50	905	5215	0,91	5,22	3,35
51	898	5300	0,90	5,30	3,36
52	903	5242	0,90	5,24	3,36
53	889	5410	0,89	5,41	3,36
54	898	5303	0,90	5,30	3,36
55	899	5292	0,90	5,29	3,36
56	891	5394	0,89	5,39	3,36
57	898	5313	0,90	5,31	3,36
58	902	5274	0,90	5,27	3,37
59	900	5304	0,90	5,30	3,37
60	902	5288	0,90	5,29	3,38
61	902	5288	0,90	5,29	3,38
62	900	5319	0,90	5,32	3,38
63	905	5261	0,91	5,26	3,38
64	907	5244	0,91	5,24	3,39
65	903	5294	0,90	5,29	3,39
66	909	5231	0,91	5,23	3,39
67	905	5278	0,91	5,28	3,40
68	901	5325	0,90	5,33	3,40
69	903	5303	0,90	5,30	3,40
70	909	5235	0,91	5,24	3,40
71	905	5285	0,91	5,29	3,40
72	903	5309	0,90	5,31	3,40
73	900	5352	0,90	5,35	3,40
74	901	5352	0,90	5,35	3,41
75	902	5346	0,90	5,35	3,42
76	908	5282	0,91	5,28	3,42
77	897	5413	0,90	5,41	3,42
78	926	5084	0,93	5,08	3,42
79	902	5385	0,90	5,39	3,44
80	926	5126	0,93	5,13	3,45
81	913	5276	0,91	5,28	3,45
82	906	5361	0,91	5,36	3,46
83	909	5326	0,91	5,33	3,46



Nr.	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
84	907	5350	0,91	5,35	3,46
85	912	5300	0,91	5,30	3,46
86	918	5325	0,92	5,33	3,52
87	895	5605	0,90	5,61	3,53
88	914	5404	0,91	5,40	3,55
89	923	5352	0,92	5,35	3,58
90	925	5400	0,93	5,40	3,63
91	939	5242	0,94	5,24	3,63
92	936	5294	0,94	5,29	3,64
93	944	5220	0,94	5,22	3,65
94	915	5558	0,92	5,56	3,65
95	940	5348	0,94	5,35	3,71
96	950	5252	0,95	5,25	3,72
97	958	5275	0,96	5,28	3,80
98	964	5317	0,96	5,32	3,88
99	967	5366	0,97	5,37	3,94
100	998	5307	1,00	5,31	4,15

## Anlage / Anhang

Tabelle 38: Druckfestigkeiten  $\sigma_{DF}$  der fertig gesinterten, stabförmigen Proben in x-, y- und z-Richtung für die nicht porosieren Referenzproben (N.P.) sowie für die porosierten Proben mit sphärischen, kubischen und zylindrischen Poren mit den Porosierungsgraden 5, 10, 15 und 20 Vol.-%.

Achsrichtung		x	y	z
Porosierungsgrad [Vol.-%]	Porenform	$\sigma_{DF}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{DF}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{DF}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0	N.P.	81,32	64,00	48,84
0	N.P.	77,92	70,72	37,24
0	N.P.	87,68	60,96	40,44
0	N.P.	79,16	65,52	41,76
0	N.P.	85,36	61,44	39,92
5	kubisch	53,96	60,08	21,52
5	kubisch	59,12	64,16	22,16
5	kubisch	38,28	51,48	28,64
5	kubisch	25,24	51,48	27,92
5	kubisch	28,44	48,68	23,20
10	kubisch	36,40	28,84	18,44
10	kubisch	31,84	26,56	19,68
10	kubisch	19,44	19,52	24,52
10	kubisch	26,32	18,24	17,52
10	kubisch	38,24	31,04	23,04
15	kubisch	28,68	19,16	35,16
15	kubisch	29,84	16,20	17,04
15	kubisch	32,84	27,12	23,20
15	kubisch	46,24	22,44	16,16
15	kubisch	25,16	20,80	25,24
20	kubisch	11,04	15,96	11,56
20	kubisch	12,52	17,96	11,04
20	kubisch	16,40	13,52	12,20
20	kubisch	17,52	18,84	17,84
20	kubisch	14,80	11,04	11,24
5	sphärisch	60,00	78,28	32,56
5	sphärisch	61,00	73,56	19,00
5	sphärisch	74,60	60,24	28,52
5	sphärisch	55,92	66,84	28,84
5	sphärisch	62,12	59,96	26,88
10	sphärisch	69,72	21,08	42,12
10	sphärisch	35,92	37,24	25,92
10	sphärisch	50,56	58,40	29,24
10	sphärisch	43,00	42,84	31,32
10	sphärisch	39,24	47,72	21,40
15	sphärisch	33,52	36,36	21,00
15	sphärisch	16,20	44,92	18,64
15	sphärisch	34,32	43,12	22,80
15	sphärisch	33,88	39,04	24,64
15	sphärisch	31,84	42,32	21,36
20	sphärisch	33,36	34,92	23,08
20	sphärisch	35,04	28,12	28,20
20	sphärisch	25,84	33,44	21,56
20	sphärisch	35,72	29,40	28,52
20	sphärisch	33,32	33,60	24,44
5	zylindrisch	45,16	49,68	22,32
5	zylindrisch	32,56	23,16	23,12
5	zylindrisch	45,08	30,64	22,96
5	zylindrisch	44,04	20,84	22,88
5	zylindrisch	49,64	41,56	21,52
10	zylindrisch	29,84	39,24	12,40
10	zylindrisch	30,36	30,04	12,52
10	zylindrisch	30,88	23,52	16,04
10	zylindrisch	31,68	30,16	13,72
10	zylindrisch	27,16	32,00	13,68
15	zylindrisch	19,44	29,72	8,44
15	zylindrisch	21,44	10,72	11,24
15	zylindrisch	15,04	21,24	9,08
15	zylindrisch	22,76	27,96	10,92
15	zylindrisch	19,64	28,72	10,36
20	zylindrisch	10,56	11,16	7,08
20	zylindrisch	15,24	23,00	7,12
20	zylindrisch	10,64	16,00	8,48
20	zylindrisch	10,76	11,80	5,60
20	zylindrisch	10,08	11,72	8,00

## Anlage / Anhang

Tabelle 39: Mittlere Druckfestigkeiten der Messwerte aus Tabelle 38 für alle 3 Achsrichtungen x, y und z mit den zugehörigen Standardabweichungen und den über alle 3 Achsrichtungen gemittelten Werten.

<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>	<b>gemittelt</b>
$\sigma_{DF}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{DF}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{DF}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{DF}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
82,29	64,53	41,64	62,82
62,73	67,78	27,16	52,55
47,69	41,46	30,00	39,71
29,95	41,15	21,69	30,93
32,66	31,90	25,16	29,90
41,01	55,18	24,69	40,29
30,45	24,84	20,64	25,31
32,55	21,14	23,36	25,69
14,46	15,46	12,78	14,23
43,30	33,18	22,56	33,01
29,98	30,99	13,67	24,88
19,66	23,67	10,01	17,78
11,46	14,74	7,26	11,15
<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>	
STABW [N/mm <sup>2</sup> ]	STABW [N/mm <sup>2</sup> ]	STABW [N/mm <sup>2</sup> ]	
4,13	3,93	4,35	-
15,08	6,60	3,34	-
7,69	5,68	3,01	-
8,13	4,06	7,66	-
2,68	3,21	2,86	-
7,04	8,10	5,01	-
13,47	13,80	7,74	-
7,74	3,42	2,23	-
3,95	2,95	3,10	-
6,38	12,26	0,65	-
1,72	5,62	1,46	-
2,92	7,97	1,20	-
2,13	5,01	1,10	-

Tabelle 40: Die mittleren Rohdichten  $\rho_R$ , gemittelt aus je 10 Rohdichtewerten, die aus der Masse m und den gemittelten Probeabmessungen Höhe  $h_M$ , Länge  $l_M$  und Breite  $b_M$  berechnet wurden, sowie die jeweiligen Standardabweichungen  $s(\rho_R)$  für die nicht porosierte Referenzproben und die daraus berechneten extrinsischen Porenanteile  $P_e$ .

Probe	Nr.	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_M$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_M$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_M$	m	$\rho_R$	$s(\rho_R)$	$P_e$
		[mm]	[mm]	[mm]	[cm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm]	[g]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[Vol.-%]
N.P.	1	119,42	118,84	118,71	11,90	118,99	98,87	98,00	10,53	25,01	25,10	25,22	2,51	611,86	1,94	0,01	0,00
	2	119,25	119,31	118,96	11,92	119,17	100,85	100,09	10,67	24,77	24,64	24,95	2,48	608,64			
	3	118,07	119,00	119,51	11,89	118,86	101,81	101,32	10,73	23,49	23,07	23,80	2,35	579,85			
	4	119,26	118,75	118,32	11,88	118,78	99,80	98,55	10,57	24,67	25,25	25,25	2,51	610,33			
	5	119,92	119,44	118,56	11,93	119,31	103,40	102,92	10,85	25,39	25,00	25,35	2,52	634,92			
	6	119,75	119,22	119,01	11,93	119,33	99,15	98,53	10,57	24,61	24,88	25,15	2,49	609,86			
	7	119,31	119,10	118,98	11,91	119,13	101,00	100,98	10,70	25,38	25,21	25,50	2,54	623,22			
	8	117,80	118,50	119,39	11,86	118,56	100,22	99,85	10,62	24,97	24,83	24,73	2,48	606,30			
	9	120,24	120,13	120,47	12,03	120,28	101,52	101,26	10,77	25,30	25,20	25,60	2,54	636,62			
	10	119,92	120,21	120,46	12,02	120,20	102,56	102,13	10,83	24,96	24,96	25,29	2,51	633,41			

# Anlage / Anhang

Tabelle 41: Die mittleren Rohdichten  $\rho_R$ , gemittelt aus je 10 Rohdichtewerten, die aus der Masse  $m$  und den gemittelten Probeabmessungen Höhe  $h_m$ , Länge  $l_m$  und Breite  $b_m$  berechnet wurden, sowie die jeweiligen Standardabweichungen  $s(\rho_R)$  für die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sphärischen Poren und die daraus berechneten extrinsischen Porenanteile  $P_e$ .

Probe	Nr.	$l_1$ [mm]	$l_2$ [mm]	$l_3$ [mm]	$l_m$ [cm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]	$b_3$ [mm]	$b_m$ [cm]	$h_1$ [mm]	$h_2$ [mm]	$h_3$ [mm]	$h_m$ [cm]	$m$ [g]	$\rho_R$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$s(\rho_R)$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$P_e$ [Vol.-%]
SPH 5	1	120,17	119,72	119,00	11,96	119,63	99,40	100,13	10,64	25,37	25,40	25,42	2,54	597,96	1,84	0,01	5,18
	2	120,40	119,98	120,01	12,01	120,13	102,40	102,09	10,82	24,97	25,00	24,89	2,50	594,56			
	3	119,46	119,59	118,25	11,91	119,10	100,33	99,31	10,62	25,14	25,22	25,17	2,52	581,42			
	4	119,29	119,33	119,69	11,94	119,44	102,29	102,00	10,79	24,82	24,92	25,00	2,49	594,02			
	5	119,91	119,90	119,30	11,97	119,70	98,51	98,03	10,54	25,17	25,36	25,55	2,54	589,77			
	6	118,71	119,07	118,92	11,89	118,90	100,51	101,04	10,68	25,05	25,44	25,16	2,52	590,25			
	7	118,16	118,22	118,77	11,84	118,38	99,25	99,95	10,59	25,05	24,90	24,76	2,49	569,26			
	8	118,80	119,65	119,94	11,95	119,46	100,08	99,65	10,64	24,93	24,93	25,10	2,50	582,47			
	9	120,57	119,39	119,19	11,97	119,72	98,54	98,16	10,55	25,25	25,51	25,34	2,54	592,23			
	10	119,71	119,12	118,37	11,91	119,07	100,66	100,00	10,66	25,04	25,23	25,42	2,52	585,25			
SPH 10	1	118,42	118,42	118,42	11,84	117,40	117,52	117,49	11,75	22,95	22,96	22,94	2,30	554,86	1,74	0,01	10,18
	2	117,98	117,97	117,98	11,80	101,13	101,04	101,23	10,11	23,46	23,45	23,47	2,35	484,80			
	3	120,33	120,34	120,34	12,03	112,65	112,54	112,75	11,26	23,47	23,45	23,46	2,35	559,07			
	4	120,34	120,34	120,34	12,03	120,24	120,15	120,15	12,02	24,66	24,64	24,65	2,47	615,32			
	5	118,58	118,58	118,57	11,86	103,00	103,11	102,88	10,30	24,35	24,35	24,37	2,44	519,08			
	6	118,12	118,13	118,13	11,81	98,44	98,34	98,34	9,84	24,95	24,96	24,96	2,50	508,68			
	7	118,75	118,75	118,74	11,87	103,58	103,68	103,67	10,36	23,17	23,18	23,19	2,32	500,39			
	8	118,72	118,72	118,73	11,87	112,34	112,23	112,25	11,23	23,31	23,32	23,31	2,33	540,09			
	9	117,67	117,67	117,67	11,77	99,83	99,73	99,72	9,98	22,93	22,93	22,95	2,29	462,30			
	10	118,04	118,04	118,03	11,80	119,54	119,65	119,43	11,95	25,52	25,54	25,52	2,55	629,96			
SPH 15	1	117,51	117,51	117,51	11,75	107,81	107,71	107,71	10,77	24,80	24,79	24,80	2,48	513,93	1,64	0,01	15,22
	2	118,36	118,36	118,37	11,84	115,37	115,47	115,28	11,54	25,37	25,36	25,38	2,54	564,18			
	3	118,08	118,09	118,08	11,81	98,74	98,83	98,63	9,87	24,45	24,45	24,47	2,45	475,46			
	4	120,50	120,50	120,50	12,05	103,04	103,13	103,15	10,31	25,27	25,28	25,28	2,53	514,41			
	5	118,18	118,18	118,18	11,82	97,92	98,01	98,01	9,80	24,91	24,92	24,89	2,49	476,73			
	6	119,78	119,77	119,78	11,98	105,21	105,12	105,12	10,52	23,42	23,44	23,43	2,34	486,31			
	7	117,59	117,59	117,59	11,76	109,79	109,68	109,89	10,98	23,69	23,67	23,71	2,37	498,90			
	8	119,37	119,36	119,37	11,94	111,70	111,59	111,61	11,16	25,08	25,07	25,08	2,51	543,35			
	9	119,41	119,41	119,41	11,94	98,20	98,11	98,09	9,81	24,09	24,08	24,10	2,41	465,49			
	10	118,95	118,95	118,94	11,89	107,36	107,46	107,27	10,74	24,08	24,09	24,08	2,41	509,01			
SPH 20	1	119,94	119,94	119,94	11,99	103,04	103,14	102,96	10,30	23,31	23,29	23,29	2,33	452,63	1,55	0,01	20,20
	2	118,87	118,87	118,87	11,89	106,66	106,57	106,76	10,67	24,25	24,26	24,24	2,43	470,12			
	3	118,82	118,82	118,82	11,88	113,83	113,72	113,74	11,38	24,51	24,50	24,52	2,45	516,18			
	4	119,57	119,57	119,57	11,96	114,91	115,02	114,80	11,49	23,91	23,90	23,90	2,39	507,75			
	5	119,78	119,78	119,78	11,98	118,00	117,91	118,09	11,80	23,87	23,88	23,86	2,39	516,87			
	6	117,95	117,95	117,95	11,80	105,55	105,44	105,64	10,55	23,93	23,94	23,92	2,39	456,09			
	7	120,04	120,04	120,04	12,00	110,50	110,60	110,40	11,05	24,17	24,17	24,18	2,42	497,32			
	8	118,00	118,00	118,00	11,80	109,31	109,40	109,23	10,93	22,94	22,93	22,93	2,29	454,37			
	9	120,28	120,28	120,28	12,03	103,67	103,57	103,79	10,37	23,63	23,64	23,62	2,36	456,15			
	10	117,67	117,67	117,67	11,77	105,76	105,64	105,67	10,57	24,40	24,40	24,39	2,44	474,84			

# Anlage / Anhang

Tabelle 42: Die mittleren Rohdichten  $\rho_R$ , gemittelt aus je 10 Rohdichtewerten, die aus der Masse  $m$  und den gemittelten Probeabmessungen Höhe  $h_m$ , Länge  $l_m$  und Breite  $b_m$  berechnet wurden, sowie die jeweiligen Standardabweichungen  $s(\rho_R)$  für die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% kubischen Poren und die daraus berechneten extrinsischen Porenanteile  $P_e$ .

Probe	Nr.	$l_1$ [mm]	$l_2$ [mm]	$l_3$ [mm]	$l_m$ [cm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]	$b_3$ [mm]	$b_m$ [cm]	$h_1$ [mm]	$h_2$ [mm]	$h_3$ [mm]	$h_m$ [cm]	$m$ [g]	$\rho_R$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$s(\rho_R)$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$P_e$ [Vol.-%]
KUB 5	1	118,48	118,96	119,45	11,90	118,96	99,63	99,96	10,62	25,03	25,40	25,12	2,52	588,84	1,84	0,01	4,93
	2	119,60	119,40	119,56	11,95	119,52	102,03	101,99	10,78	25,32	24,80	25,34	2,52	594,62			
	3	119,99	119,56	118,96	11,95	119,50	102,62	102,09	10,81	25,09	25,05	25,08	2,51	592,59			
	4	120,04	119,81	119,46	11,98	119,77	102,25	101,82	10,79	24,82	24,77	24,83	2,48	593,97			
	5	119,66	120,00	120,40	12,00	120,02	100,87	100,10	10,70	24,68	24,62	24,85	2,47	586,25			
	6	118,63	118,80	118,81	11,87	118,75	97,61	98,17	10,48	25,24	25,21	25,21	2,52	581,81			
	7	119,74	119,47	119,10	11,94	119,44	100,78	101,70	10,73	24,63	24,68	24,59	2,46	579,01			
	8	119,20	119,99	120,45	11,99	119,88	100,27	100,43	10,69	25,37	24,71	24,69	2,49	582,68			
	9	119,62	119,35	119,44	11,95	119,47	101,30	100,71	10,72	25,32	25,12	25,36	2,53	598,43			
	10	120,59	120,13	120,00	12,02	120,24	98,55	98,40	10,57	24,80	25,20	24,78	2,49	586,57			
KUB 10	1	118,51	118,51	118,52	11,85	117,56	117,67	117,45	11,76	23,94	23,94	23,94	2,39	570,36	1,73	0,03	10,59
	2	120,12	120,13	120,12	12,01	105,94	106,06	105,83	10,59	23,33	23,33	23,31	2,33	503,11			
	3	119,63	119,63	119,63	11,96	104,99	104,88	105,11	10,50	24,87	24,89	24,86	2,49	553,60			
	4	118,62	118,62	118,62	11,86	106,79	106,69	106,69	10,67	24,02	24,02	24,04	2,40	538,37			
	5	120,17	120,17	120,17	12,02	117,49	117,61	117,41	11,75	25,23	25,25	25,21	2,52	613,47			
	6	119,94	119,94	119,94	11,99	109,54	109,46	109,44	10,95	25,18	25,16	25,19	2,52	574,91			
	7	120,33	120,32	120,33	12,03	101,24	101,36	101,35	10,13	23,29	23,29	23,30	2,33	497,52			
	8	119,14	119,14	119,13	11,91	116,30	116,41	116,39	11,64	25,25	25,23	25,27	2,53	603,14			
	9	119,49	119,49	119,49	11,95	98,67	98,78	98,58	9,87	25,37	25,36	25,36	2,54	518,56			
	10	118,02	118,03	118,02	11,80	111,93	111,83	111,82	11,19	22,90	22,91	22,92	2,29	518,11			
KUB 15	1	118,51	118,50	118,51	11,85	112,03	112,12	111,93	11,20	24,88	24,87	24,87	2,49	537,59	1,64	0,01	15,61
	2	120,07	120,07	120,07	12,01	109,41	109,51	109,31	10,94	25,54	25,55	25,56	2,56	547,78			
	3	118,13	118,13	118,13	11,81	108,21	108,11	108,11	10,81	24,50	24,49	24,49	2,45	512,85			
	4	118,41	118,42	118,41	11,84	115,08	115,17	114,97	11,51	22,93	22,95	22,95	2,29	510,21			
	5	119,99	119,99	119,98	12,00	101,31	101,19	101,21	10,12	25,08	25,10	25,07	2,51	502,43			
	6	118,46	118,46	118,47	11,85	99,50	99,60	99,61	9,96	23,47	23,46	23,47	2,35	452,84			
	7	118,90	118,91	118,91	11,89	119,48	119,36	119,38	11,94	24,48	24,48	24,49	2,45	565,58			
	8	117,93	117,94	117,94	11,79	103,22	103,33	103,33	10,33	25,04	25,05	25,03	2,50	499,65			
	9	117,52	117,52	117,52	11,75	101,15	101,05	101,24	10,11	24,76	24,78	24,75	2,48	483,63			
	10	119,37	119,37	119,37	11,94	115,15	115,07	115,06	11,51	24,95	24,96	24,96	2,50	560,25			
KUB 20	1	117,66	117,65	117,66	11,77	104,49	104,39	104,38	10,44	25,29	25,28	25,30	2,53	475,38	1,54	0,02	20,51
	2	117,91	117,91	117,92	11,79	117,11	117,21	117,00	11,71	22,82	22,81	22,82	2,28	478,58			
	3	118,16	118,16	118,16	11,82	114,54	114,64	114,42	11,45	24,62	24,63	24,63	2,46	518,25			
	4	119,13	119,14	119,13	11,91	99,87	99,98	99,77	9,99	25,24	25,23	25,25	2,52	460,68			
	5	119,94	119,94	119,94	11,99	98,06	97,97	97,97	9,80	24,71	24,69	24,71	2,47	439,61			
	6	120,03	120,03	120,03	12,00	99,95	99,85	100,07	10,00	23,39	23,38	23,41	2,34	432,23			
	7	120,54	120,55	120,54	12,05	111,87	111,77	111,78	11,18	24,98	24,97	25,00	2,50	514,50			
	8	118,54	118,54	118,55	11,85	100,83	100,72	100,72	10,08	23,33	23,32	23,32	2,33	442,66			
	9	117,68	117,68	117,68	11,77	109,04	109,15	109,16	10,91	23,21	23,20	23,19	2,32	454,01			
	10	118,04	118,04	118,04	11,80	112,44	112,33	112,55	11,24	23,58	23,59	23,59	2,36	493,06			

# Anlage / Anhang

Tabelle 43: Die mittleren Rohdichten  $\rho_R$ , gemittelt aus je 10 Rohdichtewerten, die aus der Masse  $m$  und den gemittelten Probeabmessungen Höhe  $h_m$ , Länge  $l_m$  und Breite  $b_m$  berechnet wurden, sowie die jeweiligen Standardabweichungen  $s(\rho_R)$  für die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% zylindrischen Poren und die daraus berechneten extrinsischen Porenanteile  $P_e$ .

Probe	Nr.	$l_1$ [mm]	$l_2$ [mm]	$l_3$ [mm]	$l_m$ [cm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]	$b_3$ [mm]	$b_m$ [cm]	$h_1$ [mm]	$h_2$ [mm]	$h_3$ [mm]	$h_m$ [cm]	$m$ [g]	$\rho_R$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$s(\rho_R)$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$P_e$ [Vol.-%]
ZYL 5	1	119,16	118,87	119,28	11,91	119,10	99,46	99,39	10,60	25,24	24,85	25,33	2,51	587,70	1,83	0,01	5,37
	2	119,31	119,48	120,12	11,96	119,64	100,44	100,26	10,68	24,45	25,32	25,32	2,50	583,22			
	3	119,99	119,76	119,41	11,97	119,72	101,70	101,42	10,76	24,81	24,91	24,91	2,49	588,11			
	4	119,83	119,64	120,00	11,98	119,82	100,75	100,92	10,72	25,36	25,09	24,88	2,51	592,95			
	5	119,91	119,81	119,77	11,98	119,83	104,11	103,77	10,92	24,60	24,71	24,73	2,47	590,87			
	6	119,66	119,66	119,66	11,97	107,33	107,43	107,43	10,74	23,10	23,08	23,09	2,31	545,10			
	7	119,34	119,34	119,33	11,93	103,47	103,59	103,58	10,35	25,56	25,57	25,56	2,56	576,49			
	8	120,34	120,34	120,34	12,03	116,88	116,78	116,98	11,69	25,06	25,05	25,08	2,51	647,59			
	9	119,35	119,35	119,35	11,94	117,69	117,78	117,79	11,78	23,68	23,67	23,68	2,37	612,59			
	10	118,39	118,39	118,40	11,84	119,53	119,65	119,41	11,95	24,20	24,22	24,20	2,42	624,49			
ZYL 10	1	119,85	119,85	119,85	11,99	112,77	112,88	112,88	11,28	24,56	24,55	24,57	2,46	580,28	1,74	0,02	10,27
	2	119,33	119,33	119,33	11,93	110,28	110,37	110,19	11,03	23,57	23,57	23,59	2,36	533,96			
	3	120,43	120,43	120,42	12,04	102,18	102,30	102,10	10,22	23,07	23,07	23,08	2,31	497,21			
	4	118,54	118,55	118,54	11,85	118,54	118,43	118,65	11,85	23,34	23,32	23,34	2,33	564,29			
	5	118,33	118,33	118,33	11,83	106,32	106,42	106,42	10,64	25,57	25,55	25,55	2,56	562,70			
	6	119,77	119,76	119,76	11,98	104,40	104,51	104,51	10,45	23,19	23,18	23,21	2,32	502,04			
	7	118,49	118,49	118,49	11,85	113,17	113,28	113,08	11,32	24,90	24,88	24,88	2,49	573,03			
	8	120,09	120,09	120,09	12,01	110,91	111,00	110,80	11,09	24,70	24,69	24,71	2,47	579,31			
	9	120,00	120,00	120,00	12,00	102,17	102,07	102,29	10,22	23,68	23,67	23,67	2,37	510,28			
	10	118,69	118,70	118,69	11,87	98,94	98,82	98,85	9,89	23,86	23,85	23,88	2,39	486,43			
ZYL 15	1	119,77	119,77	119,77	11,98	120,28	120,18	120,18	12,02	23,34	23,36	23,33	2,33	554,22	1,64	0,02	15,60
	2	117,61	117,61	117,61	11,76	101,33	101,43	101,42	10,14	23,48	23,47	23,49	2,35	453,31			
	3	118,64	118,65	118,64	11,86	97,81	97,71	97,69	9,77	22,88	22,86	22,89	2,29	429,74			
	4	120,54	120,53	120,54	12,05	97,80	97,71	97,71	9,77	23,72	23,73	23,70	2,37	466,71			
	5	118,37	118,37	118,36	11,84	115,45	115,36	115,57	11,55	24,03	24,05	24,02	2,40	538,99			
	6	119,79	119,80	119,79	11,98	104,15	104,25	104,04	10,41	24,54	24,54	24,53	2,45	495,30			
	7	119,87	119,87	119,87	11,99	106,25	106,14	106,34	10,62	23,99	24,00	23,97	2,40	496,10			
	8	118,67	118,67	118,67	11,87	110,16	110,25	110,07	11,02	24,73	24,73	24,73	2,47	533,42			
	9	119,29	119,30	119,29	11,93	105,03	105,12	105,14	10,51	24,70	24,71	24,71	2,47	506,14			
	10	117,95	117,95	117,94	11,79	115,60	115,51	115,71	11,56	24,63	24,61	24,64	2,46	548,69			
ZYL 20	1	119,37	119,37	119,37	11,94	102,54	102,45	102,44	10,25	23,77	23,77	23,75	2,38	447,08	1,54	0,01	20,68
	2	118,80	118,80	118,80	11,88	112,95	113,06	112,85	11,30	23,94	23,93	23,92	2,39	497,40			
	3	119,37	119,37	119,37	11,94	113,81	113,90	113,90	11,39	24,31	24,30	24,30	2,43	509,73			
	4	119,46	119,46	119,46	11,95	103,62	103,73	103,71	10,37	24,89	24,90	24,89	2,49	477,62			
	5	120,27	120,27	120,27	12,03	117,14	117,05	117,04	11,71	24,71	24,69	24,69	2,47	531,36			
	6	120,14	120,13	120,14	12,01	107,29	107,19	107,38	10,73	25,17	25,18	25,16	2,52	499,60			
	7	119,02	119,02	119,03	11,90	118,75	118,85	118,64	11,87	22,84	22,85	22,85	2,28	491,46			
	8	119,77	119,78	119,77	11,98	107,20	107,12	107,09	10,71	24,62	24,62	24,64	2,46	486,03			
	9	117,73	117,73	117,72	11,77	112,32	112,43	112,43	11,24	24,04	24,05	24,02	2,40	484,70			
	10	120,41	120,41	120,41	12,04	99,36	99,24	99,45	9,94	24,63	24,65	24,61	2,46	454,93			

## Anlage / Anhang

Tabelle 44: Die mittels He-Pyknometer sechsfach bestimmten, gemittelten Reindichten  $\rho$  mit den zugehörigen Standardabweichungen für die nicht porierten Referenzproben sowie die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sphärischen, kubischen und zylindrischen Poren.

Reindichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]									
Porenart	Porenanteil	1	2	3	4	5	6	Mittelwert	STABW
Nicht poriert	0 Vol.-%	2,4682	2,4732	2,4729	2,4728	2,4719	2,4692	2,4714	0,0021
Sphärisch	5 Vol.-%	2,5072	2,5102	2,5074	2,5101	2,5109	2,5098	2,5093	0,0016
	10 Vol.-%	2,5500	2,5540	2,5546	2,5543	2,5544	2,5505	2,5530	0,0021
	15 Vol.-%	2,5771	2,5773	2,5776	2,5788	2,5782	2,5779	2,5778	0,0006
	20 Vol.-%	2,5917	2,5921	2,5911	2,5881	2,5882	2,5858	2,5895	0,0025
Kubisch	5 Vol.-%	2,5196	2,5166	2,5175	2,5155	2,5142	2,5137	2,5162	0,0022
	10 Vol.-%	2,5584	2,5615	2,5617	2,5611	2,5603	2,5583	2,5602	0,0015
	15 Vol.-%	2,5855	2,5875	2,5875	2,5870	2,5864	2,5858	2,5866	0,0009
	20 Vol.-%	2,5999	2,6020	2,6009	2,6004	2,5991	2,5985	2,6001	0,0013
Zylindrisch	5 Vol.-%	2,5120	2,5127	2,5113	2,5111	2,5095	2,5094	2,5110	0,0013
	10 Vol.-%	2,5553	2,5584	2,5581	2,5700	2,5596	2,5560	2,5596	0,0054
	15 Vol.-%	2,5856	2,5875	2,5863	2,5854	2,5845	2,5831	2,5854	0,0015
	20 Vol.-%	2,5769	2,5932	2,5943	2,5940	2,5929	2,5916	2,5905	0,0067

Tabelle 45: Maße der nicht porierten Proben für die Archimedes-Messungen. Höhe  $h$ , Breite  $b$  und Länge  $l$  wurden für jede Probe dreifach bestimmt und daraus die Mittelwerte  $h_m$ ,  $b_m$  sowie  $l_m$  und die zugehörigen Standardabweichungen  $s(h)$ ,  $s(b)$  und  $s(l)$  berechnet.

$h_1$ [mm]	$h_2$ [mm]	$h_3$ [mm]	$h_m$ [mm]	$s(h)$ [mm]	$l_1$ [mm]	$l_2$ [mm]	$l_3$ [mm]	$l_m$ [mm]	$s(l)$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]	$b_3$ [mm]	$b_m$ [mm]	$s(b)$ [mm]
20,65	20,60	20,68	20,64	0,04	116,04	116,07	116,12	116,08	0,04	25,38	25,25	25,25	25,29	0,08
20,37	20,26	20,28	20,30	0,06	118,63	118,67	118,68	118,63	0,03	26,25	26,10	26,28	26,21	0,10
20,45	20,45	20,28	20,39	0,10	117,90	117,91	118,00	117,90	0,06	26,06	26,06	25,96	26,03	0,06
20,36	20,49	20,30	20,38	0,10	117,84	117,79	117,90	117,84	0,06	25,76	25,78	25,62	25,72	0,09
20,33	20,29	20,31	20,31	0,02	117,19	117,31	117,10	117,19	0,11	25,37	25,49	25,47	25,44	0,06
20,51	20,47	20,46	20,48	0,03	115,90	116,01	116,02	115,90	0,07	25,28	25,35	25,27	25,30	0,04
20,33	20,25	20,32	20,30	0,04	117,82	117,95	117,92	117,82	0,07	25,35	25,40	25,30	25,35	0,05
20,58	20,52	20,64	20,58	0,06	116,31	116,40	116,33	116,31	0,05	25,52	25,44	25,56	25,51	0,06
20,37	20,32	20,29	20,33	0,04	116,47	116,56	116,37	116,47	0,10	26,34	26,41	26,30	26,35	0,06
20,15	20,17	20,09	20,14	0,04	118,43	118,38	118,29	118,43	0,07	25,36	25,30	25,28	25,31	0,04
20,35	20,31	20,31	20,32	0,02	118,16	118,17	118,21	118,16	0,03	26,22	26,30	26,08	26,20	0,11
20,44	20,36	20,52	20,44	0,08	117,55	117,66	117,51	117,55	0,08	25,36	25,33	25,32	25,34	0,02
19,97	19,93	19,86	19,92	0,06	118,24	118,20	118,24	118,24	0,02	26,39	26,31	26,37	26,36	0,04
20,12	20,18	20,09	20,13	0,05	117,13	117,15	116,94	117,13	0,12	24,91	24,87	25,02	24,93	0,08

# Anlage / Anhang

Tabelle 46: Maße der Proben mit einem Porenanteil (PA) von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% mit sphärischer Porenform für die Archimedes-Messungen. Höhe h, Breite b und Länge l wurden für jede Probe dreifach bestimmt und daraus die Mittelwerte  $h_m$ ,  $b_m$  sowie  $l_m$  und die zugehörigen Standardabweichungen  $s(h)$ ,  $s(b)$  und  $s(l)$  berechnet.

PA	$h_1$ [mm]	$h_2$ [mm]	$h_3$ [mm]	$h_m$ [mm]	$s(h)$ [mm]	$l_1$ [mm]	$l_2$ [mm]	$l_3$ [mm]	$l_m$ [mm]	$s(l)$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]	$b_3$ [mm]	$b_m$ [mm]	$s(b)$ [mm]
5 Vol.-%	20,44	20,41	20,34	20,40	0,05	116,57	116,53	116,50	116,53	0,04	26,15	26,14	26,15	26,15	0,01
	19,82	19,70	19,78	19,77	0,06	115,92	115,83	115,79	115,85	0,07	25,70	25,85	25,76	25,77	0,08
	20,06	20,17	20,11	20,11	0,06	116,67	116,65	116,61	116,64	0,03	25,29	25,41	25,28	25,33	0,07
	20,30	20,27	20,30	20,29	0,02	118,50	118,55	118,53	118,53	0,03	25,70	25,67	25,73	25,70	0,03
	20,65	20,53	20,59	20,59	0,06	116,78	116,83	116,67	116,76	0,08	25,16	25,05	25,18	25,13	0,07
	19,90	20,00	19,86	19,92	0,07	116,45	116,48	116,54	116,49	0,05	24,90	24,74	24,90	24,85	0,09
	19,83	19,75	19,91	19,83	0,08	117,37	117,20	117,38	117,32	0,10	25,10	25,06	25,12	25,09	0,03
	19,86	19,68	19,75	19,76	0,09	116,49	116,37	116,42	116,43	0,06	26,16	26,13	26,21	26,17	0,04
10 Vol.-%	20,54	20,54	20,62	20,57	0,05	116,68	116,59	116,54	116,60	0,07	24,95	24,86	25,08	24,96	0,11
	20,57	20,57	20,49	20,54	0,05	117,21	117,14	117,18	117,18	0,04	25,22	25,08	25,16	25,15	0,07
	20,14	20,21	20,20	20,18	0,04	117,54	117,46	117,49	117,50	0,04	25,73	25,76	25,77	25,75	0,02
	20,56	20,55	20,59	20,57	0,02	118,86	118,99	118,83	118,89	0,09	25,71	25,72	25,73	25,72	0,01
	20,16	20,11	20,21	20,16	0,05	116,94	117,01	116,89	116,95	0,06	25,79	25,82	25,69	25,77	0,07
	20,07	20,07	20,02	20,05	0,03	116,53	116,57	116,58	116,56	0,03	25,23	25,19	25,11	25,18	0,06
	20,08	20,08	19,93	20,03	0,09	118,22	118,34	118,24	118,27	0,06	25,71	25,69	25,60	25,67	0,06
	20,62	20,69	20,61	20,64	0,04	116,37	116,47	116,34	116,39	0,07	26,15	26,08	26,18	26,14	0,05
15 Vol.-%	19,84	19,86	19,68	19,79	0,10	116,37	116,38	116,36	116,37	0,01	25,79	25,78	25,75	25,77	0,02
	19,99	19,94	19,84	19,92	0,08	118,79	118,74	118,71	118,75	0,04	26,27	26,34	26,27	26,29	0,04
	20,31	20,35	20,44	20,37	0,07	118,39	118,46	118,37	118,41	0,05	25,48	25,41	25,42	25,44	0,04
	20,60	20,68	20,67	20,65	0,04	116,38	116,43	116,25	116,35	0,09	25,94	25,98	25,77	25,90	0,11
	20,55	20,53	20,47	20,52	0,04	116,08	116,07	116,10	116,08	0,02	24,95	24,89	25,03	24,96	0,07
	20,66	20,71	20,72	20,70	0,03	118,11	118,09	117,93	118,04	0,10	25,98	25,92	25,98	25,96	0,03
	20,09	20,10	20,09	20,09	0,01	115,94	115,90	116,03	115,96	0,07	25,87	25,82	26,00	25,90	0,09
	19,81	19,70	19,83	19,78	0,07	116,39	116,45	116,35	116,40	0,05	24,87	24,76	24,81	24,81	0,06
20 Vol.-%	20,69	20,64	20,82	20,72	0,09	117,40	117,49	117,45	117,45	0,05	25,03	24,95	24,91	24,96	0,06
	19,93	19,91	19,93	19,92	0,01	118,12	117,96	118,08	118,05	0,08	26,06	26,00	26,03	26,03	0,03
	20,44	20,56	20,46	20,49	0,06	116,34	116,50	116,32	116,39	0,10	25,29	25,27	25,29	25,28	0,01
	20,21	20,18	20,25	20,21	0,04	117,44	117,47	117,45	117,45	0,02	25,36	25,40	25,33	25,36	0,04
	20,05	19,99	19,99	20,01	0,03	116,21	116,34	116,12	116,22	0,11	26,32	26,38	26,34	26,35	0,03
	20,51	20,43	20,40	20,45	0,06	118,65	118,55	118,70	118,63	0,08	25,03	25,15	24,91	25,03	0,12
	19,96	19,96	19,96	19,96	0,00	118,72	118,67	118,79	118,73	0,06	25,53	25,65	25,54	25,57	0,07
	20,34	20,38	20,34	20,35	0,02	116,45	116,43	116,57	116,48	0,08	25,51	25,47	25,59	25,52	0,06



## Anlage / Anhang

Tabelle 47: Maße der Proben mit einem Porenanteil (PA) von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% mit kubischer Porenform (PF) für die Archimedes-Messungen. Höhe h, Breite b und Länge l wurden für jede Probe dreifach bestimmt und daraus die Mittelwerte  $h_m$ ,  $b_m$  sowie  $l_m$  und die zugehörigen Standardabweichungen  $s(h)$ ,  $s(b)$  und  $s(l)$  berechnet.

PA	$h_1$ [mm]	$h_2$ [mm]	$h_3$ [mm]	$h_m$ [mm]	$s(h)$ [mm]	$l_1$ [mm]	$l_2$ [mm]	$l_3$ [mm]	$l_m$ [mm]	$s(l)$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]	$b_3$ [mm]	$b_m$ [mm]	$s(b)$ [mm]
5 Vol.-%	20,14	20,10	20,16	20,13	0,03	117,96	117,99	118,00	117,98	0,02	26,28	26,34	26,24	26,29	0,05
	19,99	19,99	19,87	19,95	0,07	118,69	118,55	118,70	118,65	0,08	24,82	24,79	24,79	24,80	0,02
	20,53	20,49	20,58	20,53	0,05	117,74	117,61	117,73	117,69	0,07	25,59	25,67	25,61	25,62	0,04
	20,50	20,54	20,44	20,49	0,05	118,27	118,18	118,37	118,27	0,10	25,93	25,96	25,99	25,96	0,03
	20,67	20,71	20,69	20,69	0,02	118,87	118,86	118,84	118,86	0,02	25,60	25,70	25,63	25,64	0,05
	20,03	19,90	20,05	19,99	0,08	116,74	116,72	116,62	116,69	0,06	25,82	25,98	25,88	25,89	0,08
	20,67	20,68	20,70	20,68	0,02	116,67	116,63	116,70	116,67	0,04	25,72	25,59	25,72	25,68	0,08
	20,47	20,40	20,55	20,47	0,08	117,95	117,98	118,01	117,98	0,03	25,90	25,89	25,85	25,88	0,03
10 Vol.-%	20,48	20,57	20,45	20,50	0,06	118,86	118,82	118,78	118,82	0,04	25,73	25,74	25,74	25,74	0,01
	20,53	20,53	20,46	20,51	0,04	118,56	118,57	118,51	118,55	0,03	25,66	25,77	25,68	25,70	0,06
	20,16	20,04	20,06	20,09	0,06	117,03	117,12	117,12	117,09	0,05	26,30	26,29	26,23	26,27	0,04
	19,97	20,02	19,96	19,98	0,03	116,28	116,17	116,33	116,26	0,08	25,70	25,67	25,81	25,73	0,07
	20,68	20,76	20,65	20,70	0,06	116,44	116,41	116,46	116,44	0,03	26,23	26,12	26,08	26,14	0,08
	20,15	20,03	20,14	20,11	0,07	118,38	118,28	118,37	118,34	0,06	25,57	25,50	25,59	25,55	0,05
	20,55	20,50	20,67	20,57	0,09	117,07	117,13	117,08	117,09	0,03	26,13	26,15	26,10	26,13	0,03
	20,48	20,52	20,45	20,48	0,04	118,86	118,95	118,98	118,93	0,06	25,90	25,87	25,95	25,91	0,04
15 Vol.-%	19,90	19,89	19,89	19,89	0,01	118,90	118,86	118,89	118,88	0,02	25,07	25,03	25,02	25,04	0,03
	20,69	20,75	20,67	20,70	0,04	117,92	117,83	117,86	117,87	0,05	25,85	25,77	25,71	25,78	0,07
	20,56	20,66	20,62	20,61	0,05	116,40	116,46	116,24	116,37	0,11	25,50	25,44	25,62	25,52	0,09
	20,33	20,30	20,29	20,31	0,02	116,98	117,05	117,04	117,02	0,04	25,47	25,44	25,52	25,48	0,04
	19,97	20,09	20,05	20,04	0,06	116,12	116,07	116,17	116,12	0,05	25,21	25,18	25,08	25,16	0,07
	20,60	20,63	20,63	20,62	0,02	117,95	117,84	117,88	117,89	0,06	25,08	25,17	25,22	25,16	0,07
	19,94	19,88	19,96	19,93	0,04	118,01	117,89	117,96	117,95	0,06	26,18	26,27	26,27	26,24	0,05
	20,64	20,62	20,51	20,59	0,07	115,90	115,96	115,80	115,89	0,08	24,91	24,93	24,85	24,90	0,04
20 Vol.-%	20,51	20,38	20,36	20,42	0,08	118,84	118,76	118,83	118,81	0,04	26,09	26,19	26,10	26,13	0,06
	20,14	20,30	20,09	20,18	0,11	117,22	117,29	117,26	117,26	0,04	25,08	25,11	24,99	25,06	0,06
	20,04	20,04	19,96	20,01	0,05	118,42	118,34	118,50	118,42	0,08	25,30	25,23	25,40	25,31	0,09
	20,11	20,21	20,07	20,13	0,07	118,16	118,16	118,24	118,19	0,05	25,77	25,76	25,92	25,82	0,09
	20,50	20,43	20,55	20,49	0,06	116,88	116,90	116,75	116,84	0,08	26,26	26,29	26,37	26,31	0,06
	20,54	20,69	20,46	20,56	0,12	117,58	117,52	117,46	117,52	0,06	25,69	25,67	25,58	25,65	0,06
	20,55	20,56	20,54	20,55	0,01	116,97	116,93	116,89	116,93	0,04	25,00	25,04	25,04	25,03	0,02
	20,44	20,54	20,30	20,43	0,12	116,68	116,75	116,58	116,67	0,09	24,93	24,93	24,88	24,91	0,03

## Anlage / Anhang

Tabelle 48: Maße der Proben mit einem Porenanteil (PA) von 5, 10, 15 und 20 Vol.-% mit zylindrischer Porenform (PF) für die Archimedes-Messungen. Höhe h, Breite b und Länge l wurden für jede Probe dreifach bestimmt und daraus die Mittelwerte  $h_m$ ,  $b_m$  sowie  $l_m$  und die zugehörigen Standardabweichungen  $s(h)$ ,  $s(b)$  und  $s(l)$  berechnet.

PA	$h_1$ [mm]	$h_2$ [mm]	$h_3$ [mm]	$h_m$ [mm]	$s(h)$ [mm]	$l_1$ [mm]	$l_2$ [mm]	$l_3$ [mm]	$l_m$ [mm]	$s(l)$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]	$b_3$ [mm]	$b_m$ [mm]	$s(b)$ [mm]
5 Vol.-%	20,59	20,59	20,57	20,58	0,01	118,61	118,67	118,64	118,64	0,03	26,03	25,91	25,90	25,95	0,07
	20,52	20,39	20,57	20,49	0,09	118,17	118,05	118,11	118,11	0,06	26,40	26,42	26,52	26,45	0,06
	20,57	20,63	20,51	20,57	0,06	117,73	117,60	117,73	117,69	0,08	24,84	24,82	24,86	24,84	0,02
	20,47	20,59	20,40	20,49	0,10	117,02	117,10	116,84	116,99	0,13	26,17	26,27	26,16	26,20	0,06
	20,68	20,65	20,61	20,65	0,04	117,19	117,13	117,04	117,12	0,08	25,47	25,54	25,57	25,53	0,05
	19,96	19,95	20,01	19,97	0,03	117,67	117,73	117,68	117,69	0,03	24,82	24,86	24,78	24,82	0,04
	19,98	19,97	19,99	19,98	0,01	116,78	116,66	116,74	116,73	0,06	26,35	26,22	26,35	26,31	0,08
	19,81	19,72	19,83	19,79	0,06	115,97	116,00	116,02	116,00	0,03	25,75	25,68	25,66	25,70	0,05
10 Vol.-%	20,34	20,50	20,37	20,40	0,09	118,18	118,24	118,11	118,18	0,07	25,88	25,82	25,98	25,89	0,08
	20,15	20,14	20,21	20,17	0,04	117,81	117,86	117,80	117,82	0,03	26,36	26,28	26,44	26,36	0,08
	20,65	20,59	20,77	20,67	0,09	117,48	117,50	117,53	117,50	0,03	25,75	25,68	25,64	25,69	0,06
	20,10	20,02	20,06	20,06	0,04	117,55	117,55	117,47	117,52	0,05	26,00	25,94	25,90	25,95	0,05
	19,90	19,90	19,98	19,93	0,05	118,26	118,23	118,20	118,23	0,03	26,40	26,27	26,47	26,38	0,10
	20,07	19,93	20,18	20,06	0,13	118,70	118,73	118,63	118,69	0,05	24,84	24,87	24,97	24,89	0,07
	20,09	20,16	19,97	20,07	0,10	116,47	116,42	116,53	116,47	0,06	25,78	25,64	25,77	25,73	0,08
	20,56	20,47	20,67	20,57	0,10	118,54	118,48	118,56	118,53	0,04	24,94	24,84	24,96	24,91	0,06
15 Vol.-%	19,84	19,81	19,83	19,83	0,02	116,78	116,86	116,85	116,83	0,04	25,19	25,16	25,11	25,15	0,04
	19,82	19,81	19,88	19,84	0,04	118,07	118,07	117,99	118,04	0,05	26,21	26,34	26,33	26,29	0,07
	20,46	20,34	20,42	20,41	0,06	118,74	118,71	118,72	118,72	0,02	25,45	25,38	25,57	25,47	0,10
	20,67	20,72	20,66	20,68	0,03	117,51	117,51	117,45	117,49	0,03	25,72	25,66	25,70	25,69	0,03
	20,53	20,67	20,49	20,56	0,09	118,09	118,10	118,09	118,09	0,01	25,13	25,10	24,98	25,07	0,08
	19,83	19,74	19,89	19,82	0,08	117,91	117,96	118,02	117,96	0,06	26,36	26,43	26,31	26,37	0,06
	20,41	20,38	20,35	20,38	0,03	117,65	117,81	117,64	117,70	0,10	25,59	25,76	25,60	25,65	0,10
	20,05	20,03	20,10	20,06	0,04	116,36	116,38	116,26	116,33	0,06	25,22	25,12	25,19	25,18	0,05
20 Vol.-%	19,82	19,69	19,70	19,74	0,07	118,41	118,32	118,47	118,40	0,08	25,09	25,04	25,03	25,05	0,03
	20,65	20,61	20,55	20,60	0,05	117,98	117,93	118,09	118,00	0,08	25,75	25,70	25,79	25,75	0,05
	19,93	19,76	19,87	19,85	0,09	115,84	115,98	115,94	115,92	0,07	25,13	25,14	25,15	25,14	0,01
	20,33	20,25	20,36	20,31	0,06	118,04	117,97	117,99	118,00	0,04	24,85	24,83	24,86	24,85	0,02
	20,04	20,03	20,09	20,05	0,03	117,92	117,95	117,78	117,88	0,09	25,67	25,70	25,70	25,69	0,02
	20,43	20,46	20,42	20,44	0,02	117,37	117,30	117,24	117,30	0,07	24,92	24,80	24,92	24,88	0,07
	20,23	20,12	20,25	20,20	0,07	115,86	115,92	115,82	115,87	0,05	25,76	25,67	25,85	25,76	0,09
	20,23	20,17	20,14	20,18	0,05	116,04	116,01	116,13	116,06	0,06	25,77	25,82	25,67	25,75	0,08

Tabelle 49: Mit den Maßen aus

## Anlage / Anhang

Tabelle 45 und den Massen des nassen, trockenen und unter Wasser gewogenen Probekörpers  $m_n$ ,  $m_{tr}$  und  $m_{uw}$  nach Archimedes berechnetes Brutto-, Netto- und Porenvolumen  $V_B$ ,  $V_N$  und  $V_P$  sowie die daraus bestimmte offene Porosität  $P_{of}$  für die ohne Porosierungsmittel hergestellten Referenzproben.

Masse nass	Masse trocken	Masse unter Wasser	Bruttovolumen Probekörper	Nettovolumen Probekörper	Porenvolumen Probekörper	Offene Porosität
$m_n$ [g]	$m_{tr}$ [g]	$m_{uw}$ [g]	$V_B$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_N$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_P$ [cm <sup>3</sup> ]	$P_{of}$ [Vol.-%]
125,44	118,58	65,50	60,04	53,16	6,871	11,44
129,66	123,09	66,97	62,79	56,21	6,580	10,48
128,37	121,14	65,70	62,77	55,53	7,242	11,54
127,43	120,69	66,19	61,34	54,59	6,751	11,01
124,47	117,86	64,12	60,45	53,83	6,621	10,95
122,93	116,47	62,91	60,12	53,65	6,470	10,76
125,10	118,31	64,85	60,35	53,55	6,801	11,27
124,73	118,32	63,66	61,17	54,75	6,420	10,50
128,43	121,59	66,49	62,04	55,19	6,851	11,04
123,27	117,01	62,90	60,47	54,20	6,270	10,37
129,12	122,16	66,30	62,92	55,95	6,971	11,08
124,83	118,17	64,04	60,89	54,22	6,671	10,96
126,96	120,19	64,81	62,25	55,47	6,781	10,89
120,95	113,96	62,16	58,88	51,88	7,001	11,89

## Anlage / Anhang

Tabelle 50: Mit den Maßen aus Tabelle 46 und den Massen des nassen, trockenen und unter Wasser gewogenen Probekörpers  $m_n$ ,  $m_{tr}$  und  $m_{uw}$  nach Archimedes berechnetes Brutto-, Netto- und Porenvolumen  $V_B$ ,  $V_N$  und  $V_P$  sowie die daraus bestimmte offene Porosität  $P_{of}$  für die mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sphärischem Porosierungsmittel hergestellten Proben.

	Masse nass	Masse trocken	Masse unter Wasser	Bruttovolumen Probekörper	Nettovolumen Probekörper	Porenvolumen Probekörper	Offene Porosität
PA	$m_n$ [g]	$m_{tr}$ [g]	$m_{uw}$ [g]	$V_B$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_N$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_P$ [cm <sup>3</sup> ]	$P_{of}$ [Vol.-%]
5 Vol.-%	120,57	114,24	58,43	62,24	55,90	6,34	10,19
	115,10	109,07	56,49	58,70	52,66	6,04	10,29
	114,63	109,06	55,12	59,60	54,03	5,58	9,36
	119,30	112,96	57,06	62,34	55,99	6,35	10,19
	117,22	110,72	56,66	60,66	54,15	6,51	10,73
	112,03	106,26	54,58	57,54	51,76	5,78	10,04
	114,05	107,42	55,75	58,39	51,75	6,64	11,37
	117,17	111,02	57,12	60,15	53,99	6,16	10,24
10 Vol.-%	111,38	104,08	51,44	60,04	52,72	7,31	12,18
	112,67	105,86	52,37	60,40	53,58	6,82	11,29
	113,92	106,89	53,14	60,88	53,84	7,04	11,57
	117,47	109,89	54,75	62,82	55,23	7,59	12,09
	112,97	106,30	52,57	60,50	53,82	6,68	11,04
	109,29	101,87	50,17	59,21	51,78	7,43	12,55
	112,52	105,62	51,57	61,05	54,14	6,91	11,32
	116,20	109,15	53,31	62,99	55,93	7,06	11,21
15 Vol.-%	103,58	96,58	43,78	59,90	52,88	7,01	11,71
	109,65	102,22	47,44	62,31	54,87	7,44	11,94
	108,45	100,87	47,15	61,40	53,81	7,59	12,37
	109,00	101,85	46,41	62,69	55,53	7,16	11,42
	104,42	96,66	44,57	59,95	52,17	7,77	12,97
	111,70	104,76	48,14	63,66	56,71	6,95	10,92
	106,09	98,90	45,44	60,75	53,55	7,20	11,85
	101,61	93,67	44,34	57,36	49,41	7,95	13,86
20 Vol.-%	101,64	93,64	40,64	61,10	53,08	8,01	13,11
	102,47	94,97	41,08	61,49	53,98	7,51	12,22
	100,99	94,23	40,41	60,68	53,91	6,77	11,16
	100,72	92,74	40,24	60,58	52,58	7,99	13,19
	102,84	94,99	41,57	61,37	53,51	7,86	12,81
	102,04	94,35	41,11	61,03	53,32	7,70	12,62
	101,14	93,37	40,29	60,95	53,16	7,78	12,77
	101,21	94,25	40,43	60,88	53,91	6,97	11,45

## Anlage / Anhang

Tabelle 51: Mit den Maßen aus Tabelle 47 und den Massen des nassen, trockenen und unter Wasser gewogenen Probekörpers  $m_n$ ,  $m_{tr}$  und  $m_{uw}$  nach Archimedes berechnetes Brutto-, Netto- und Porenvolumen  $V_B$ ,  $V_N$  und  $V_P$  sowie die daraus bestimmte offene Porosität  $P_{of}$  für die mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% kubischem Porosierungsmittel hergestellten Proben.

	Masse nass	Masse trocken	Masse unter Wasser	Bruttovolumen Probekörper	Nettovolumen Probekörper	Porenvolumen Probekörper	Offene Porosität
PA	$m_n$ [g]	$m_{tr}$ [g]	$m_{uw}$ [g]	$V_B$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_N$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_P$ [cm <sup>3</sup> ]	$P_{of}$ [Vol.-%]
5 Vol.-%	121,29	114,06	58,39	63,00	55,76	7,24	11,49
	114,06	107,71	55,08	59,07	52,71	6,36	10,77
	119,97	113,84	57,90	62,17	56,03	6,14	9,88
	121,45	115,27	58,20	63,35	57,16	6,19	9,77
	121,37	115,95	58,20	63,27	57,84	5,43	8,58
	116,59	110,84	55,86	60,83	55,07	5,76	9,47
	119,57	113,25	57,05	62,62	56,29	6,33	10,11
	122,17	114,27	59,08	63,19	55,28	7,91	12,52
10 Vol.-%	115,76	109,25	53,39	62,47	55,95	6,52	10,44
	116,38	109,83	54,58	61,90	55,34	6,56	10,60
	115,77	108,10	54,61	61,26	53,58	7,68	12,54
	110,73	104,42	51,38	59,44	53,12	6,32	10,63
	117,01	108,91	53,82	63,29	55,18	8,11	12,82
	113,76	106,02	53,34	60,52	52,76	7,75	12,81
	116,30	109,11	53,38	63,02	55,82	7,20	11,43
	117,37	109,52	54,34	63,13	55,27	7,86	12,45
15 Vol.-%	104,32	96,34	44,72	59,69	51,70	7,99	13,39
	111,10	103,65	48,50	62,70	55,24	7,46	11,90
	108,81	100,77	48,00	60,91	52,85	8,05	13,22
	106,91	99,27	46,50	60,51	52,85	7,65	12,65
	104,04	96,45	45,88	58,25	50,65	7,60	13,05
	107,43	100,33	46,46	61,07	53,96	7,11	11,65
	109,61	100,81	47,89	61,82	53,00	8,81	14,26
	105,21	97,36	45,89	59,41	51,55	7,86	13,23
20 Vol.-%	106,53	98,97	43,25	63,38	55,81	7,57	11,95
	100,31	92,03	41,34	59,06	50,77	8,29	14,04
	101,91	93,66	42,37	59,63	51,37	8,26	13,86
	103,27	96,12	42,15	61,22	54,06	7,16	11,70
	106,73	97,94	44,00	62,83	54,03	8,80	14,01
	103,40	96,20	41,74	61,76	54,55	7,21	11,68
	101,36	93,75	41,88	59,57	51,95	7,62	12,79
	101,42	92,89	42,07	59,44	50,90	8,54	14,37

## Anlage / Anhang

Tabelle 52: Mit den Maßen aus Tabelle 48 und den Massen des nassen, trockenen und unter Wasser gewogenen Probekörpers  $m_n$ ,  $m_{tr}$  und  $m_{uw}$  nach Archimedes berechnetes Brutto-, Netto- und Porenvolumen  $V_B$ ,  $V_N$  und  $V_P$  sowie die daraus bestimmte offene Porosität  $P_{of}$  für die mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% zylindrischem Porosierungsmittel hergestellten Proben.

	Masse nass	Masse trocken	Masse unter Wasser	Bruttovolumen Probekörper	Nettovolumen Probekörper	Porenvolumen Probekörper	Offene Porosität
PA	$m_n$ [g]	$m_{tr}$ [g]	$m_{uw}$ [g]	$V_B$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_N$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_P$ [cm <sup>3</sup> ]	$P_{of}$ [Vol.-%]
5 Vol.-%	123,87	116,38	60,58	63,39	55,89	7,50	11,83
	123,89	117,01	59,67	64,32	57,43	6,89	10,71
	119,09	110,69	59,13	60,06	51,64	8,41	14,01
	122,19	115,49	59,54	62,75	56,04	6,71	10,69
	120,72	114,47	59,62	61,20	54,94	6,26	10,23
	116,21	108,49	58,62	57,68	49,95	7,73	13,41
	119,59	112,76	58,37	61,32	54,48	6,84	11,16
	114,59	107,73	55,38	59,30	52,43	6,87	11,59
10 Vol.-%	117,45	108,60	55,02	62,53	53,67	8,86	14,18
	115,68	107,77	52,43	63,35	55,43	7,92	12,51
	115,52	107,41	52,52	63,10	54,98	8,12	12,87
	113,44	104,76	51,55	61,99	53,29	8,69	14,02
	116,96	107,81	54,62	62,44	53,27	9,16	14,68
	110,52	102,07	50,53	60,09	51,62	8,46	14,09
	113,24	104,78	53,16	60,18	51,70	8,47	14,08
	114,11	104,58	52,76	61,45	51,90	9,55	15,53
15 Vol.-%	105,55	96,06	47,70	57,94	48,44	9,51	16,40
	109,97	100,83	48,49	61,58	52,42	9,15	14,87
	109,59	100,24	47,71	61,98	52,61	9,36	15,11
	110,92	101,78	48,26	62,76	53,61	9,15	14,59
	109,47	100,17	49,00	60,57	51,25	9,31	15,38
	110,57	100,73	48,96	61,71	51,85	9,86	15,97
	110,73	101,08	49,51	61,32	51,65	9,67	15,76
	107,24	97,70	48,20	59,13	49,58	9,56	16,16
20 Vol.-%	99,89	89,94	41,29	58,69	48,73	9,97	16,98
	105,83	95,79	43,01	62,92	52,86	10,06	15,98
	98,48	89,34	40,85	57,72	48,57	9,15	15,86
	100,58	90,91	40,63	60,05	50,36	9,69	16,13
	102,16	93,26	41,38	60,88	51,96	8,91	14,64
	101,38	91,97	41,91	59,56	50,14	9,42	15,82
	103,19	92,97	43,08	60,21	49,97	10,24	17,00
	102,34	92,65	41,96	60,48	50,77	9,71	16,05

Tabelle 53: Per Lichtmikroskop gemessene Durchmesser und daraus berechnete Volumina der sphärischen Poren von Proben mit 5 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

Probe	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
1	1432	1,43	1,54
2	1442	1,44	1,57
3	1498	1,50	1,76
4	1498	1,50	1,76
5	1501	1,50	1,77
6	1504	1,50	1,78
7	1524	1,52	1,85
8	1526	1,53	1,86
9	1534	1,53	1,89
10	1539	1,54	1,91
11	1560	1,56	1,99
12	1566	1,57	2,01
13	1568	1,57	2,02
14	1569	1,57	2,02
15	1583	1,58	2,08
16	1586	1,59	2,09
17	1614	1,61	2,20
18	1623	1,62	2,24
19	1631	1,63	2,27
20	1633	1,63	2,28
21	1634	1,63	2,28
22	1635	1,64	2,29
23	1639	1,64	2,31
24	1660	1,66	2,40
25	1662	1,66	2,40
26	1668	1,67	2,43
27	1678	1,68	2,47
28	1680	1,68	2,48
29	1690	1,69	2,53
30	1691	1,69	2,53
31	1691	1,69	2,53
32	1697	1,70	2,56
33	1699	1,70	2,57
34	1705	1,71	2,60
35	1708	1,71	2,61
36	1711	1,71	2,62
37	1721	1,72	2,67
38	1721	1,72	2,67
39	1724	1,72	2,68
40	1725	1,73	2,69

Probe	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
41	1727	1,73	2,70
42	1750	1,75	2,81
43	1755	1,76	2,83
44	1775	1,78	2,93
45	178	0,18	0,00
46	1782	1,78	2,96
47	1790	1,79	3,00
48	1801	1,80	3,06
49	1802	1,80	3,06
50	1810	1,81	3,10
51	1811	1,81	3,11
52	1811	1,81	3,11
53	1815	1,82	3,13
54	1820	1,82	3,16
55	1822	1,82	3,17
56	1823	1,82	3,17
57	1823	1,82	3,17
58	1824	1,82	3,18
59	1824	1,82	3,18
60	1828	1,83	3,20
61	1828	1,83	3,20
62	1829	1,83	3,20
63	1830	1,83	3,21
64	1855	1,86	3,34
65	1856	1,86	3,35
66	1860	1,86	3,37
67	1866	1,87	3,40
68	1870	1,87	3,42
69	1887	1,89	3,52
70	1889	1,89	3,53
71	1891	1,89	3,54
72	1914	1,91	3,67
73	1915	1,92	3,68
74	1920	1,92	3,71
75	1932	1,93	3,78
76	1935	1,94	3,79
77	1942	1,94	3,83
78	1946	1,95	3,86
79	1957	1,96	3,92
80	1959	1,96	3,94
81	1965	1,97	3,97
82	1966	1,97	3,98
83	1967	1,97	3,98



Probe	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
84	1967	1,97	3,98
85	1976	1,98	4,04
86	1991	1,99	4,13
87	1994	1,99	4,15
88	1999	2,00	4,18
89	2009	2,01	4,25
90	2016	2,02	4,29
91	2018	2,02	4,30
92	2019	2,02	4,31
93	2033	2,03	4,40
94	2056	2,06	4,55
95	2066	2,07	4,62
96	2094	2,09	4,81
97	2152	2,15	5,22
98	2176	2,18	5,39
99	2177	2,18	5,40
100	2209	2,21	5,64

Tabelle 54: Per Lichtmikroskop bestimmte Querschnittsfläche und daraus berechnete Volumina der kubischen Poren von Proben mit 5 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
1	1671329	1,67	1,29
2	1689793	1,69	1,30
3	1704480	1,70	1,31
4	1724788	1,72	1,31
5	1777748	1,78	1,33
6	1788661	1,79	1,34
7	1814236	1,81	1,35
8	1825361	1,83	1,35
9	1833739	1,83	1,35
10	1834660	1,83	1,35
11	1837114	1,84	1,36
12	1839577	1,84	1,36
13	1864487	1,86	1,37
14	1881392	1,88	1,37
15	1914706	1,91	1,38
16	1917260	1,92	1,38
17	1929353	1,93	1,39
18	1950094	1,95	1,40
19	1951082	1,95	1,40
20	1987303	1,99	1,41

## Anlage / Anhang

Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
21	1992379	1,99	1,41
22	1997366	2,00	1,41
23	2001516	2,00	1,41
24	2015582	2,02	1,42
25	2018022	2,02	1,42
26	2030085	2,03	1,42
27	2039037	2,04	1,43
28	2047846	2,05	1,43
29	2047869	2,05	1,43
30	2050552	2,05	1,43
31	2078830	2,08	1,44
32	2083175	2,08	1,44
33	2108408	2,11	1,45
34	2110543	2,11	1,45
35	2117586	2,12	1,46
36	2129273	2,13	1,46
37	2138258	2,14	1,46
38	2146028	2,15	1,46
39	2156357	2,16	1,47
40	2162791	2,16	1,47
41	2167724	2,17	1,47
42	2176151	2,18	1,48
43	2181310	2,18	1,48
44	2185052	2,19	1,48
45	2185934	2,19	1,48
46	2202360	2,20	1,48
47	2204577	2,20	1,48
48	2215075	2,22	1,49
49	2218342	2,22	1,49
50	2225244	2,23	1,49
51	2238617	2,24	1,50
52	2243417	2,24	1,50
53	2252323	2,25	1,50
54	2253404	2,25	1,50
55	2253703	2,25	1,50
56	2259844	2,26	1,50
57	2268966	2,27	1,51
58	2292744	2,29	1,51
59	2306242	2,31	1,52
60	2312799	2,31	1,52
61	2317462	2,32	1,52
62	2326121	2,33	1,53
63	2327939	2,33	1,53

## Anlage / Anhang

Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
64	2340908	2,34	1,53
65	2344591	2,34	1,53
66	2350179	2,35	1,53
67	2362098	2,36	1,54
68	2364867	2,36	1,54
69	2379475	2,38	1,54
70	2384057	2,38	1,54
71	2388242	2,39	1,55
72	2395260	2,40	1,55
73	2399452	2,40	1,55
74	2416635	2,42	1,55
75	2422625	2,42	1,56
76	2428798	2,43	1,56
77	2430050	2,43	1,56
78	2437096	2,44	1,56
79	2457724	2,46	1,57
80	2460830	2,46	1,57
81	2467634	2,47	1,57
82	2477120	2,48	1,57
83	2478049	2,48	1,57
84	2480035	2,48	1,57
85	2494664	2,49	1,58
86	2507210	2,51	1,58
87	2545659	2,55	1,60
88	2559537	2,56	1,60
89	2596523	2,60	1,61
90	2608687	2,61	1,62
91	2615370	2,62	1,62
92	2645149	2,65	1,63
93	2647211	2,65	1,63
94	2685753	2,69	1,64
95	2737136	2,74	1,65
96	2799065	2,80	1,67
97	2876333	2,88	1,70
98	2928089	2,93	1,71
99	3026124	3,03	1,74
100	3224428	3,22	1,80

Tabelle 55: Per Lichtmikroskop bestimmte Durchmesser und Höhen sowie die daraus berechnete Volumina der zylindrischen Poren von Proben mit 5 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

Probe	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
1	890	4307	0,89	4,31	2,68
2	914	4160	0,91	4,16	2,73
3	893	4405	0,89	4,41	2,76
4	914	4214	0,91	4,21	2,76
5	904	4308	0,90	4,31	2,77
6	935	4032	0,94	4,03	2,77
7	884	4636	0,88	4,64	2,85
8	916	4328	0,92	4,33	2,85
9	934	4186	0,93	4,19	2,87
10	931	4222	0,93	4,22	2,87
11	900	4520	0,90	4,52	2,88
12	934	4210	0,93	4,21	2,88
13	933	4229	0,93	4,23	2,89
14	920	4415	0,92	4,42	2,93
15	909	4532	0,91	4,53	2,94
16	902	4642	0,90	4,64	2,97
17	900	4699	0,90	4,70	2,99
18	888	4838	0,89	4,84	3,00
19	881	4916	0,88	4,92	3,00
20	927	4503	0,93	4,50	3,04
21	929	4514	0,93	4,51	3,06
22	896	4884	0,90	4,88	3,08
23	891	4987	0,89	4,99	3,11
24	882	5166	0,88	5,17	3,16
25	895	5045	0,90	5,05	3,17
26	891	5091	0,89	5,09	3,17
27	894	5076	0,89	5,08	3,19
28	883	5205	0,88	5,21	3,19
29	903	5017	0,90	5,02	3,21
30	904	5021	0,90	5,02	3,22
31	886	5233	0,89	5,23	3,23
32	900	5103	0,90	5,10	3,25
33	894	5173	0,89	5,17	3,25
34	882	5362	0,88	5,36	3,28
35	883	5358	0,88	5,36	3,28
36	892	5258	0,89	5,26	3,29
37	893	5252	0,89	5,25	3,29
38	899	5187	0,90	5,19	3,29
39	908	5114	0,91	5,11	3,31
40	907	5160	0,91	5,16	3,33

Probe	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
41	885	5436	0,89	5,44	3,34
42	925	4986	0,93	4,99	3,35
43	924	5004	0,92	5,00	3,36
44	894	5350	0,89	5,35	3,36
45	928	4974	0,93	4,97	3,36
46	913	5139	0,91	5,14	3,36
47	914	5133	0,91	5,13	3,37
48	925	5013	0,93	5,01	3,37
49	906	5232	0,91	5,23	3,37
50	905	5279	0,91	5,28	3,40
51	895	5404	0,90	5,40	3,40
52	921	5114	0,92	5,11	3,41
53	903	5336	0,90	5,34	3,42
54	898	5414	0,90	5,41	3,43
55	903	5368	0,90	5,37	3,44
56	904	5359	0,90	5,36	3,44
57	899	5428	0,90	5,43	3,45
58	898	5442	0,90	5,44	3,45
59	908	5326	0,91	5,33	3,45
60	935	5043	0,94	5,04	3,46
61	938	5021	0,94	5,02	3,47
62	910	5342	0,91	5,34	3,47
63	910	5367	0,91	5,37	3,49
64	920	5256	0,92	5,26	3,49
65	883	5723	0,88	5,72	3,50
66	917	5325	0,92	5,33	3,52
67	927	5225	0,93	5,23	3,53
68	896	5595	0,90	5,60	3,53
69	914	5389	0,91	5,39	3,54
70	900	5560	0,90	5,56	3,54
71	940	5105	0,94	5,11	3,54
72	917	5374	0,92	5,37	3,55
73	888	5734	0,89	5,73	3,55
74	887	5749	0,89	5,75	3,55
75	887	5755	0,89	5,76	3,56
76	905	5566	0,91	5,57	3,58
77	919	5451	0,92	5,45	3,62
78	919	5459	0,92	5,46	3,62
79	939	5235	0,94	5,24	3,63
80	912	5561	0,91	5,56	3,63
81	935	5317	0,94	5,32	3,65
82	891	5877	0,89	5,88	3,66
83	902	5736	0,90	5,74	3,67

Probe	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
84	940	5286	0,94	5,29	3,67
85	916	5594	0,92	5,59	3,69
86	880	6074	0,88	6,07	3,69
87	928	5486	0,93	5,49	3,71
88	928	5516	0,93	5,52	3,73
89	881	6131	0,88	6,13	3,74
90	937	5440	0,94	5,44	3,75
91	937	5500	0,94	5,50	3,79
92	899	6002	0,90	6,00	3,81
93	937	5551	0,94	5,55	3,83
94	886	6230	0,89	6,23	3,84
95	925	5970	0,93	5,97	4,01
96	934	5930	0,93	5,93	4,06
97	939	5923	0,94	5,92	4,10
98	908	6635	0,91	6,64	4,30
99	919	6527	0,92	6,53	4,33
100	907	6865	0,91	6,87	4,44

Tabelle 56: Per Lichtmikroskop gemessene Durchmesser und daraus berechnete Volumina der sphärischen Poren von Proben mit 10 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

Probe	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
1	1234	1,23	0,98
2	1333	1,33	1,24
3	1449	1,45	1,59
4	1482	1,48	1,70
5	1482	1,48	1,70
6	1511	1,51	1,81
7	1513	1,51	1,81
8	1518	1,52	1,83
9	1521	1,52	1,84
10	1540	1,54	1,91
11	1568	1,57	2,02
12	1577	1,58	2,05
13	1587	1,59	2,09
14	1595	1,60	2,12
15	1599	1,60	2,14
16	1626	1,63	2,25
17	1631	1,63	2,27
18	1638	1,64	2,30
19	1657	1,66	2,38
20	1660	1,66	2,40
21	1662	1,66	2,40
22	1680	1,68	2,48
23	1684	1,68	2,50
24	1686	1,69	2,51
25	1691	1,69	2,53
26	1697	1,70	2,56
27	1704	1,70	2,59
28	1711	1,71	2,62
29	1714	1,71	2,64
30	1716	1,72	2,65
31	1719	1,72	2,66
32	1721	1,72	2,67
33	1724	1,72	2,68
34	1726	1,73	2,69
35	1727	1,73	2,70
36	1730	1,73	2,71
37	1740	1,74	2,76
38	1741	1,74	2,76
39	1744	1,74	2,78
40	1748	1,75	2,80

Probe	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
41	1750	1,75	2,81
42	1760	1,76	2,85
43	1764	1,76	2,87
44	1777	1,78	2,94
45	1791	1,79	3,01
46	1801	1,80	3,06
47	1802	1,80	3,06
48	1804	1,80	3,07
49	1806	1,81	3,08
50	1807	1,81	3,09
51	1811	1,81	3,11
52	1819	1,82	3,15
53	1821	1,82	3,16
54	1822	1,82	3,17
55	1830	1,83	3,21
56	1842	1,84	3,27
57	1842	1,84	3,27
58	1848	1,85	3,30
59	1848	1,85	3,30
60	1849	1,85	3,31
61	1864	1,86	3,39
62	1875	1,88	3,45
63	1876	1,88	3,46
64	1882	1,88	3,49
65	1885	1,89	3,51
66	1895	1,90	3,56
67	1896	1,90	3,57
68	1917	1,92	3,69
69	1918	1,92	3,69
70	1919	1,92	3,70
71	1927	1,93	3,75
72	1933	1,93	3,78
73	1934	1,93	3,79
74	1939	1,94	3,82
75	1942	1,94	3,83
76	1942	1,94	3,83
77	1948	1,95	3,87
78	1952	1,95	3,89
79	1966	1,97	3,98
80	1978	1,98	4,05
81	1981	1,98	4,07
82	1993	1,99	4,14
83	2001	2,00	4,20



Probe	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
84	2004	2,00	4,21
85	2010	2,01	4,25
86	2020	2,02	4,32
87	2022	2,02	4,33
88	2028	2,03	4,37
89	2036	2,04	4,42
90	2039	2,04	4,44
91	2078	2,08	4,70
92	2094	2,09	4,81
93	2118	2,12	4,97
94	2144	2,14	5,16
95	2157	2,16	5,25
96	2172	2,17	5,37
97	2199	2,20	5,57
98	2201	2,20	5,58
99	2203	2,20	5,60
100	2251	2,25	5,97

Tabelle 57: Per Lichtmikroskop bestimmte Querschnittsfläche und daraus berechnete Volumina der kubischen Poren von Proben mit 10 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
1	1340619	1,34	1,16
2	1370761	1,37	1,17
3	1616003	1,62	1,27
4	1638554	1,64	1,28
5	1688269	1,69	1,30
6	1701739	1,70	1,30
7	1715166	1,72	1,31
8	1730594	1,73	1,32
9	1742863	1,74	1,32
10	1777186	1,78	1,33
11	1822380	1,82	1,35
12	1868355	1,87	1,37
13	1886448	1,89	1,37
14	1888331	1,89	1,37
15	1905609	1,91	1,38
16	1909780	1,91	1,38
17	1918913	1,92	1,39
18	1942917	1,94	1,39
19	1959782	1,96	1,40
20	1961640	1,96	1,40

## Anlage / Anhang

Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
21	1964860	1,96	1,40
22	1966612	1,97	1,40
23	2038013	2,04	1,43
24	2066330	2,07	1,44
25	2068281	2,07	1,44
26	2079061	2,08	1,44
27	2088583	2,09	1,45
28	2101736	2,10	1,45
29	2105567	2,11	1,45
30	2106772	2,11	1,45
31	2109074	2,11	1,45
32	2109664	2,11	1,45
33	2113972	2,11	1,45
34	2136253	2,14	1,46
35	2136315	2,14	1,46
36	2138481	2,14	1,46
37	2161203	2,16	1,47
38	2162569	2,16	1,47
39	2163525	2,16	1,47
40	2168857	2,17	1,47
41	2172671	2,17	1,47
42	2174111	2,17	1,47
43	2187797	2,19	1,48
44	2192735	2,19	1,48
45	2194771	2,19	1,48
46	2202645	2,20	1,48
47	2224681	2,22	1,49
48	2227872	2,23	1,49
49	2237616	2,24	1,50
50	2243471	2,24	1,50
51	2246950	2,25	1,50
52	2248999	2,25	1,50
53	2252756	2,25	1,50
54	2264787	2,26	1,50
55	2266777	2,27	1,51
56	2275067	2,28	1,51
57	2278848	2,28	1,51
58	2289563	2,29	1,51
59	2297916	2,30	1,52
60	2304798	2,30	1,52
61	2314088	2,31	1,52
62	2327521	2,33	1,53
63	2332706	2,33	1,53

## Anlage / Anhang

Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
64	2334457	2,33	1,53
65	2340376	2,34	1,53
66	2368036	2,37	1,54
67	2370750	2,37	1,54
68	2379114	2,38	1,54
69	2382471	2,38	1,54
70	2389756	2,39	1,55
71	2393679	2,39	1,55
72	2405262	2,41	1,55
73	2408718	2,41	1,55
74	2420917	2,42	1,56
75	2427367	2,43	1,56
76	2432235	2,43	1,56
77	2442068	2,44	1,56
78	2460939	2,46	1,57
79	2471623	2,47	1,57
80	2471903	2,47	1,57
81	2478824	2,48	1,57
82	2490302	2,49	1,58
83	2493252	2,49	1,58
84	2496248	2,50	1,58
85	2518845	2,52	1,59
86	2530763	2,53	1,59
87	2539511	2,54	1,59
88	2540974	2,54	1,59
89	2542947	2,54	1,59
90	2558090	2,56	1,60
91	2609299	2,61	1,62
92	2622691	2,62	1,62
93	2638621	2,64	1,62
94	2733482	2,73	1,65
95	2792333	2,79	1,67
96	2794998	2,79	1,67
97	2804877	2,80	1,67
98	2862814	2,86	1,69
99	2884842	2,88	1,70
100	2915171	2,92	1,71

Tabelle 58: Per Lichtmikroskop bestimmte Durchmesser und Höhen sowie die daraus berechnete Volumina der zylindrischen Poren von Proben mit 10 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

Probe	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
1	924	3867	0,92	3,87	2,59
2	917	4053	0,92	4,05	2,68
3	893	4388	0,89	4,39	2,75
4	923	4152	0,92	4,15	2,78
5	934	4057	0,93	4,06	2,78
6	887	4518	0,89	4,52	2,79
7	891	4545	0,89	4,55	2,83
8	880	4715	0,88	4,72	2,87
9	893	4666	0,89	4,67	2,92
10	887	4752	0,89	4,75	2,94
11	881	4839	0,88	4,84	2,95
12	915	4509	0,92	4,51	2,96
13	936	4332	0,94	4,33	2,98
14	931	4388	0,93	4,39	2,99
15	937	4406	0,94	4,41	3,04
16	894	4903	0,89	4,90	3,08
17	926	4572	0,93	4,57	3,08
18	892	4942	0,89	4,94	3,09
19	895	4926	0,90	4,93	3,10
20	924	4623	0,92	4,62	3,10
21	909	4834	0,91	4,83	3,14
22	903	4901	0,90	4,90	3,14
23	905	4918	0,91	4,92	3,16
24	898	5010	0,90	5,01	3,17
25	928	4730	0,93	4,73	3,20
26	932	4692	0,93	4,69	3,20
27	888	5179	0,89	5,18	3,21
28	904	5013	0,90	5,01	3,22
29	907	4983	0,91	4,98	3,22
30	930	4747	0,93	4,75	3,22
31	912	4937	0,91	4,94	3,23
32	918	4880	0,92	4,88	3,23
33	885	5284	0,89	5,28	3,25
34	932	4766	0,93	4,77	3,25
35	907	5067	0,91	5,07	3,27
36	894	5223	0,89	5,22	3,28
37	886	5354	0,89	5,35	3,30
38	896	5240	0,90	5,24	3,30
39	889	5348	0,89	5,35	3,32
40	939	4800	0,94	4,80	3,32

Probe	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
41	897	5272	0,90	5,27	3,33
42	917	5050	0,92	5,05	3,34
43	936	4854	0,94	4,85	3,34
44	920	5027	0,92	5,03	3,34
45	905	5205	0,91	5,21	3,35
46	925	4985	0,93	4,99	3,35
47	884	5476	0,88	5,48	3,36
48	907	5222	0,91	5,22	3,37
49	908	5239	0,91	5,24	3,39
50	899	5349	0,90	5,35	3,40
51	908	5268	0,91	5,27	3,41
52	919	5144	0,92	5,14	3,41
53	886	5552	0,89	5,55	3,42
54	904	5363	0,90	5,36	3,44
55	929	5079	0,93	5,08	3,44
56	919	5218	0,92	5,22	3,46
57	916	5253	0,92	5,25	3,46
58	910	5329	0,91	5,33	3,47
59	910	5330	0,91	5,33	3,47
60	924	5192	0,92	5,19	3,48
61	911	5348	0,91	5,35	3,49
62	920	5254	0,92	5,25	3,49
63	931	5160	0,93	5,16	3,51
64	880	5776	0,88	5,78	3,51
65	932	5153	0,93	5,15	3,52
66	883	5745	0,88	5,75	3,52
67	928	5215	0,93	5,22	3,53
68	913	5395	0,91	5,40	3,53
69	898	5607	0,90	5,61	3,55
70	939	5131	0,94	5,13	3,55
71	930	5233	0,93	5,23	3,55
72	937	5165	0,94	5,17	3,56
73	925	5310	0,93	5,31	3,57
74	938	5179	0,94	5,18	3,58
75	891	5758	0,89	5,76	3,59
76	905	5591	0,91	5,59	3,60
77	901	5643	0,90	5,64	3,60
78	910	5537	0,91	5,54	3,60
79	932	5286	0,93	5,29	3,61
80	922	5417	0,92	5,42	3,62
81	929	5381	0,93	5,38	3,65
82	939	5287	0,94	5,29	3,66
83	935	5340	0,94	5,34	3,67

Probe	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
84	934	5353	0,93	5,35	3,67
85	880	6034	0,88	6,03	3,67
86	922	5535	0,92	5,54	3,70
87	923	5557	0,92	5,56	3,72
88	914	5692	0,91	5,69	3,73
89	937	5437	0,94	5,44	3,75
90	921	5653	0,92	5,65	3,77
91	934	5518	0,93	5,52	3,78
92	907	5866	0,91	5,87	3,79
93	934	5682	0,93	5,68	3,89
94	921	5873	0,92	5,87	3,91
95	940	5762	0,94	5,76	4,00
96	901	6357	0,90	6,36	4,05
97	938	5994	0,94	5,99	4,14
98	919	6297	0,92	6,30	4,18
99	937	6063	0,94	6,06	4,18
100	917	6349	0,92	6,35	4,19

Tabelle 59: Per Lichtmikroskop gemessene Durchmesser und daraus berechnete Volumina der sphärischen Poren von Proben mit 15 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

Probe	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
1	1189	1,19	0,88
2	1436	1,44	1,55
3	1442	1,44	1,57
4	1468	1,47	1,66
5	1485	1,49	1,71
6	1491	1,49	1,74
7	1502	1,50	1,77
8	1537	1,54	1,90
9	1543	1,54	1,92
10	1554	1,55	1,96
11	1555	1,56	1,97
12	1561	1,56	1,99
13	1587	1,59	2,09
14	1587	1,59	2,09
15	1596	1,60	2,13
16	1600	1,60	2,14
17	1604	1,60	2,16
18	1624	1,62	2,24
19	1628	1,63	2,26
20	1632	1,63	2,28
21	1650	1,65	2,35
22	1651	1,65	2,36
23	1655	1,66	2,37
24	1658	1,66	2,39
25	1668	1,67	2,43
26	1668	1,67	2,43
27	1680	1,68	2,48
28	1682	1,68	2,49
29	1688	1,69	2,52
30	1690	1,69	2,53
31	1696	1,70	2,55
32	1708	1,71	2,61
33	1708	1,71	2,61
34	1718	1,72	2,66
35	1718	1,72	2,66
36	1722	1,72	2,67
37	1730	1,73	2,71
38	1733	1,73	2,73
39	1738	1,74	2,75
40	1757	1,76	2,84

Probe	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
41	1760	1,76	2,85
42	1766	1,77	2,88
43	1769	1,77	2,90
44	1770	1,77	2,90
45	1773	1,77	2,92
46	1781	1,78	2,96
47	1792	1,79	3,01
48	1796	1,80	3,03
49	1812	1,81	3,12
50	1814	1,81	3,13
51	1820	1,82	3,16
52	1825	1,83	3,18
53	1828	1,83	3,20
54	1841	1,84	3,27
55	1841	1,84	3,27
56	1846	1,85	3,29
57	1850	1,85	3,32
58	1852	1,85	3,33
59	1855	1,86	3,34
60	1857	1,86	3,35
61	1864	1,86	3,39
62	1866	1,87	3,40
63	1868	1,87	3,41
64	1868	1,87	3,41
65	1872	1,87	3,43
66	1874	1,87	3,45
67	1875	1,88	3,45
68	1875	1,88	3,45
69	1877	1,88	3,46
70	1880	1,88	3,48
71	1896	1,90	3,57
72	1897	1,90	3,57
73	1903	1,90	3,61
74	1911	1,91	3,65
75	1914	1,91	3,67
76	1917	1,92	3,69
77	1924	1,92	3,73
78	1929	1,93	3,76
79	1929	1,93	3,76
80	1933	1,93	3,78
81	1945	1,95	3,85
82	1953	1,95	3,90
83	1959	1,96	3,94



Probe	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
84	1962	1,96	3,95
85	1963	1,96	3,96
86	1976	1,98	4,04
87	2006	2,01	4,23
88	2013	2,01	4,27
89	2026	2,03	4,35
90	2039	2,04	4,44
91	2045	2,05	4,48
92	2054	2,05	4,54
93	2056	2,06	4,55
94	2087	2,09	4,76
95	2102	2,10	4,86
96	2105	2,11	4,88
97	2224	2,22	5,76
98	2228	2,23	5,79
99	2232	2,23	5,82
100	2250	2,25	5,96

Tabelle 60: Per Lichtmikroskop bestimmte Querschnittsfläche und daraus berechnete Volumina der kubischen Poren von Proben mit 15 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
1	1367058	1,37	1,17
2	1459810	1,46	1,21
3	1572566	1,57	1,25
4	1744894	1,74	1,32
5	1767469	1,77	1,33
6	1775941	1,78	1,33
7	1789867	1,79	1,34
8	1810490	1,81	1,35
9	1820758	1,82	1,35
10	1857303	1,86	1,36
11	1862038	1,86	1,36
12	1869570	1,87	1,37
13	1871932	1,87	1,37
14	1891604	1,89	1,38
15	1903000	1,90	1,38
16	1940881	1,94	1,39
17	1955793	1,96	1,40
18	1957416	1,96	1,40
19	1969751	1,97	1,40
20	1980147	1,98	1,41

Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
21	1981069	1,98	1,41
22	1982125	1,98	1,41
23	2000506	2,00	1,41
24	2021986	2,02	1,42
25	2036798	2,04	1,43
26	2042583	2,04	1,43
27	2085573	2,09	1,44
28	2090603	2,09	1,45
29	2096092	2,10	1,45
30	2103331	2,10	1,45
31	2109586	2,11	1,45
32	2109976	2,11	1,45
33	2124568	2,12	1,46
34	2124650	2,12	1,46
35	2127659	2,13	1,46
36	2136384	2,14	1,46
37	2140828	2,14	1,46
38	2141999	2,14	1,46
39	2147669	2,15	1,47
40	2160520	2,16	1,47
41	2163954	2,16	1,47
42	2167382	2,17	1,47
43	2174815	2,17	1,47
44	2178173	2,18	1,48
45	2190335	2,19	1,48
46	2190578	2,19	1,48
47	2195030	2,20	1,48
48	2207028	2,21	1,49
49	2213351	2,21	1,49
50	2215572	2,22	1,49
51	2222198	2,22	1,49
52	2232115	2,23	1,49
53	2232642	2,23	1,49
54	2233000	2,23	1,49
55	2245320	2,25	1,50
56	2246068	2,25	1,50
57	2250703	2,25	1,50
58	2251923	2,25	1,50
59	2255965	2,26	1,50
60	2266204	2,27	1,51
61	2282321	2,28	1,51
62	2303927	2,30	1,52
63	2306297	2,31	1,52

## Anlage / Anhang

Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
64	2314078	2,31	1,52
65	2317203	2,32	1,52
66	2317215	2,32	1,52
67	2321753	2,32	1,52
68	2337974	2,34	1,53
69	2349290	2,35	1,53
70	2349639	2,35	1,53
71	2361481	2,36	1,54
72	2391678	2,39	1,55
73	2400152	2,40	1,55
74	2402114	2,40	1,55
75	2405071	2,41	1,55
76	2409624	2,41	1,55
77	2410332	2,41	1,55
78	2410358	2,41	1,55
79	2412901	2,41	1,55
80	2432414	2,43	1,56
81	2440748	2,44	1,56
82	2464520	2,46	1,57
83	2472772	2,47	1,57
84	2490539	2,49	1,58
85	2496587	2,50	1,58
86	2511648	2,51	1,58
87	2515933	2,52	1,59
88	2516403	2,52	1,59
89	2561912	2,56	1,60
90	2562332	2,56	1,60
91	2566711	2,57	1,60
92	2572279	2,57	1,60
93	2587118	2,59	1,61
94	2648957	2,65	1,63
95	2706592	2,71	1,65
96	2732594	2,73	1,65
97	2733690	2,73	1,65
98	2806817	2,81	1,68
99	2901344	2,90	1,70
100	2994967	2,99	1,73

## Anlage / Anhang

Tabelle 61: Per Lichtmikroskop bestimmte Durchmesser und Höhen sowie die daraus berechnete Volumina der zylindrischen Poren von Proben mit 15 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

Probe	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
1	906	3994	0,91	3,99	2,57
2	902	4160	0,90	4,16	2,66
3	886	4395	0,89	4,40	2,71
4	903	4265	0,90	4,27	2,73
5	888	4441	0,89	4,44	2,75
6	905	4279	0,91	4,28	2,75
7	883	4652	0,88	4,65	2,85
8	910	4383	0,91	4,38	2,85
9	900	4491	0,90	4,49	2,86
10	922	4338	0,92	4,34	2,90
11	940	4198	0,94	4,20	2,91
12	903	4562	0,90	4,56	2,92
13	891	4690	0,89	4,69	2,92
14	890	4733	0,89	4,73	2,94
15	887	4824	0,89	4,82	2,98
16	883	4868	0,88	4,87	2,98
17	884	4891	0,88	4,89	3,00
18	899	4753	0,90	4,75	3,02
19	903	4788	0,90	4,79	3,07
20	911	4722	0,91	4,72	3,08
21	893	4957	0,89	4,96	3,10
22	894	4946	0,89	4,95	3,10
23	887	5027	0,89	5,03	3,11
24	940	4508	0,94	4,51	3,13
25	902	4908	0,90	4,91	3,14
26	906	4871	0,91	4,87	3,14
27	906	4907	0,91	4,91	3,16
28	889	5120	0,89	5,12	3,18
29	922	4761	0,92	4,76	3,18
30	890	5114	0,89	5,11	3,18
31	895	5100	0,90	5,10	3,21
32	897	5082	0,90	5,08	3,21
33	891	5168	0,89	5,17	3,22
34	899	5126	0,90	5,13	3,25
35	883	5339	0,88	5,34	3,27
36	893	5240	0,89	5,24	3,28
37	912	5024	0,91	5,02	3,28
38	900	5159	0,90	5,16	3,28
39	884	5366	0,88	5,37	3,29
40	890	5312	0,89	5,31	3,30

Probe	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
41	898	5247	0,90	5,25	3,32
42	886	5396	0,89	5,40	3,33
43	895	5298	0,90	5,30	3,33
44	905	5183	0,91	5,18	3,33
45	932	4896	0,93	4,90	3,34
46	902	5237	0,90	5,24	3,35
47	915	5095	0,92	5,10	3,35
48	900	5282	0,90	5,28	3,36
49	939	4863	0,94	4,86	3,37
50	915	5141	0,92	5,14	3,38
51	912	5208	0,91	5,21	3,40
52	902	5327	0,90	5,33	3,40
53	909	5254	0,91	5,25	3,41
54	903	5342	0,90	5,34	3,42
55	916	5217	0,92	5,22	3,44
56	937	5031	0,94	5,03	3,47
57	921	5226	0,92	5,23	3,48
58	882	5703	0,88	5,70	3,48
59	920	5252	0,92	5,25	3,49
60	904	5478	0,90	5,48	3,52
61	908	5430	0,91	5,43	3,52
62	915	5365	0,92	5,37	3,53
63	929	5209	0,93	5,21	3,53
64	912	5412	0,91	5,41	3,54
65	885	5754	0,89	5,75	3,54
66	905	5505	0,91	5,51	3,54
67	923	5309	0,92	5,31	3,55
68	934	5201	0,93	5,20	3,56
69	910	5480	0,91	5,48	3,56
70	934	5211	0,93	5,21	3,57
71	912	5499	0,91	5,50	3,59
72	926	5337	0,93	5,34	3,59
73	940	5199	0,94	5,20	3,61
74	932	5296	0,93	5,30	3,61
75	883	5940	0,88	5,94	3,64
76	903	5697	0,90	5,70	3,65
77	922	5471	0,92	5,47	3,65
78	922	5498	0,92	5,50	3,67
79	887	5958	0,89	5,96	3,68
80	905	5725	0,91	5,73	3,68
81	882	6061	0,88	6,06	3,70
82	925	5556	0,93	5,56	3,73
83	886	6072	0,89	6,07	3,74

Probe	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
84	934	5508	0,93	5,51	3,77
85	940	5475	0,94	5,48	3,80
86	929	5616	0,93	5,62	3,81
87	901	6004	0,90	6,00	3,83
88	937	5581	0,94	5,58	3,85
89	915	5898	0,92	5,90	3,88
90	934	5702	0,93	5,70	3,91
91	936	5682	0,94	5,68	3,91
92	927	5793	0,93	5,79	3,91
93	940	5668	0,94	5,67	3,93
94	939	5720	0,94	5,72	3,96
95	907	6222	0,91	6,22	4,02
96	896	6414	0,90	6,41	4,04
97	924	6042	0,92	6,04	4,05
98	935	5902	0,94	5,90	4,05
99	920	6203	0,92	6,20	4,12
100	930	6572	0,93	6,57	4,46

Tabelle 62: Per Lichtmikroskop gemessene Durchmesser und daraus berechnete Volumina der sphärischen Poren von Proben mit 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

Probe	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
1	1451	1,45	1,60
2	1462	1,46	1,64
3	1498	1,50	1,76
4	1520	1,52	1,84
5	1539	1,54	1,91
6	1544	1,54	1,93
7	1548	1,55	1,94
8	1564	1,56	2,00
9	1583	1,58	2,08
10	1589	1,59	2,10
11	1590	1,59	2,10
12	1600	1,60	2,14
13	1648	1,65	2,34
14	1658	1,66	2,39
15	1666	1,67	2,42
16	1675	1,68	2,46
17	1676	1,68	2,47
18	1701	1,70	2,58
19	1701	1,70	2,58
20	1704	1,70	2,59
21	1709	1,71	2,61
22	1710	1,71	2,62
23	1711	1,71	2,62
24	1714	1,71	2,64
25	1715	1,72	2,64
26	1716	1,72	2,65
27	1740	1,74	2,76
28	1750	1,75	2,81
29	1751	1,75	2,81
30	1751	1,75	2,81
31	1773	1,77	2,92
32	1778	1,78	2,94
33	1783	1,78	2,97
34	1788	1,79	2,99
35	1796	1,80	3,03
36	1802	1,80	3,06
37	1807	1,81	3,09
38	1807	1,81	3,09
39	1809	1,81	3,10
40	1810	1,81	3,10

Probe	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
41	1812	1,81	3,12
42	1814	1,81	3,13
43	1814	1,81	3,13
44	1824	1,82	3,18
45	1824	1,82	3,18
46	1826	1,83	3,19
47	1828	1,83	3,20
48	1831	1,83	3,21
49	1832	1,83	3,22
50	1834	1,83	3,23
51	1837	1,84	3,25
52	1838	1,84	3,25
53	1839	1,84	3,26
54	1841	1,84	3,27
55	1842	1,84	3,27
56	1845	1,85	3,29
57	1845	1,85	3,29
58	1846	1,85	3,29
59	1847	1,85	3,30
60	1851	1,85	3,32
61	1853	1,85	3,33
62	1853	1,85	3,33
63	1857	1,86	3,35
64	1857	1,86	3,35
65	1858	1,86	3,36
66	1860	1,86	3,37
67	1864	1,86	3,39
68	1866	1,87	3,40
69	1867	1,87	3,41
70	1867	1,87	3,41
71	1868	1,87	3,41
72	1871	1,87	3,43
73	1877	1,88	3,46
74	1877	1,88	3,46
75	1879	1,88	3,47
76	1880	1,88	3,48
77	1888	1,89	3,52
78	1902	1,90	3,60
79	1924	1,92	3,73
80	1925	1,93	3,74
81	1933	1,93	3,78
82	1938	1,94	3,81
83	1945	1,95	3,85



Probe	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser [mm]	Kugelvolumen [ $\text{mm}^3$ ]
84	1947	1,95	3,86
85	1960	1,96	3,94
86	1961	1,96	3,95
87	1978	1,98	4,05
88	1980	1,98	4,06
89	1986	1,99	4,10
90	1989	1,99	4,12
91	1991	1,99	4,13
92	1993	1,99	4,14
93	1995	2,00	4,16
94	2003	2,00	4,21
95	2004	2,00	4,21
96	2007	2,01	4,23
97	2015	2,02	4,28
98	2046	2,05	4,48
99	2050	2,05	4,51
100	2076	2,08	4,68

Tabelle 63: Per Lichtmikroskop bestimmte Querschnittsfläche und daraus berechnete Volumina der kubischen Poren von Proben mit 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
1	1542955	1,54	1,92
2	1741064	1,74	2,30
3	1801345	1,80	2,42
4	1831221	1,83	2,48
5	1861137	1,86	2,54
6	1872102	1,87	2,56
7	1923680	1,92	2,67
8	1936725	1,94	2,70
9	1946805	1,95	2,72
10	1999960	2,00	2,83
11	2000041	2,00	2,83
12	2021986	2,02	2,88
13	2022906	2,02	2,88
14	2025520	2,03	2,88
15	2027570	2,03	2,89
16	2038913	2,04	2,91
17	2040210	2,04	2,91
18	2043443	2,04	2,92
19	2060911	2,06	2,96
20	2065902	2,07	2,97

## Anlage / Anhang

Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
21	2086712	2,09	3,01
22	2093970	2,09	3,03
23	2097821	2,10	3,04
24	2106185	2,11	3,06
25	2106772	2,11	3,06
26	2137622	2,14	3,13
27	2139545	2,14	3,13
28	2144262	2,14	3,14
29	2146606	2,15	3,15
30	2148884	2,15	3,15
31	2148958	2,15	3,15
32	2154257	2,15	3,16
33	2158043	2,16	3,17
34	2159815	2,16	3,17
35	2162569	2,16	3,18
36	2166257	2,17	3,19
37	2170890	2,17	3,20
38	2178654	2,18	3,22
39	2179263	2,18	3,22
40	2185052	2,19	3,23
41	2185346	2,19	3,23
42	2185559	2,19	3,23
43	2199243	2,20	3,26
44	2218710	2,22	3,30
45	2224669	2,22	3,32
46	2230244	2,23	3,33
47	2231368	2,23	3,33
48	2232006	2,23	3,33
49	2235692	2,24	3,34
50	2235820	2,24	3,34
51	2238617	2,24	3,35
52	2248999	2,25	3,37
53	2249400	2,25	3,37
54	2252338	2,25	3,38
55	2263884	2,26	3,41
56	2270463	2,27	3,42
57	2272208	2,27	3,43
58	2275337	2,28	3,43
59	2279963	2,28	3,44
60	2280348	2,28	3,44
61	2286000	2,29	3,46
62	2293249	2,29	3,47
63	2295097	2,30	3,48

## Anlage / Anhang

Probe	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	A [ $\text{mm}^2$ ]	V [ $\text{mm}^3$ ]
64	2298619	2,30	3,48
65	2304398	2,30	3,50
66	2305784	2,31	3,50
67	2308573	2,31	3,51
68	2309043	2,31	3,51
69	2309090	2,31	3,51
70	2322682	2,32	3,54
71	2322875	2,32	3,54
72	2339808	2,34	3,58
73	2342964	2,34	3,59
74	2345589	2,35	3,59
75	2349565	2,35	3,60
76	2350405	2,35	3,60
77	2352908	2,35	3,61
78	2354652	2,35	3,61
79	2357268	2,36	3,62
80	2367749	2,37	3,64
81	2378263	2,38	3,67
82	2393815	2,39	3,70
83	2404396	2,40	3,73
84	2405726	2,41	3,73
85	2426148	2,43	3,78
86	2440748	2,44	3,81
87	2461896	2,46	3,86
88	2465469	2,47	3,87
89	2494352	2,49	3,94
90	2501755	2,50	3,96
91	2504074	2,50	3,96
92	2515397	2,52	3,99
93	2529353	2,53	4,02
94	2541832	2,54	4,05
95	2542185	2,54	4,05
96	2608682	2,61	4,21
97	2640133	2,64	4,29
98	2651232	2,65	4,32
99	2658686	2,66	4,34
100	2691084	2,69	4,41

Tabelle 64: Per Lichtmikroskop bestimmte Durchmesser und Höhen sowie die daraus berechnete Volumina der zylindrischen Poren von Proben mit 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe.

Probe	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
1	893	4127	0,89	4,13	2,58
2	889	4472	0,89	4,47	2,78
3	920	4538	0,92	4,54	3,02
4	900	4760	0,90	4,76	3,03
5	889	4937	0,89	4,94	3,06
6	900	4870	0,90	4,87	3,10
7	900	4906	0,90	4,91	3,12
8	887	5081	0,89	5,08	3,14
9	906	4923	0,91	4,92	3,17
10	899	5059	0,90	5,06	3,21
11	915	4889	0,92	4,89	3,21
12	918	4860	0,92	4,86	3,22
13	889	5189	0,89	5,19	3,22
14	891	5188	0,89	5,19	3,23
15	905	5080	0,91	5,08	3,27
16	902	5115	0,90	5,12	3,27
17	905	5090	0,91	5,09	3,27
18	907	5079	0,91	5,08	3,28
19	899	5188	0,90	5,19	3,29
20	895	5239	0,90	5,24	3,30
21	909	5079	0,91	5,08	3,30
22	909	5080	0,91	5,08	3,30
23	904	5139	0,90	5,14	3,30
24	905	5145	0,91	5,15	3,31
25	910	5099	0,91	5,10	3,32
26	900	5214	0,90	5,21	3,32
27	904	5169	0,90	5,17	3,32
28	900	5221	0,90	5,22	3,32
29	909	5125	0,91	5,13	3,33
30	918	5036	0,92	5,04	3,33
31	908	5151	0,91	5,15	3,34
32	910	5131	0,91	5,13	3,34
33	902	5237	0,90	5,24	3,35
34	911	5135	0,91	5,14	3,35
35	891	5369	0,89	5,37	3,35
36	897	5300	0,90	5,30	3,35
37	897	5310	0,90	5,31	3,36
38	911	5153	0,91	5,15	3,36
39	899	5293	0,90	5,29	3,36
40	901	5280	0,90	5,28	3,37

Probe	d [µm]	h [µm]	d [mm]	h [mm]	V [mm³]
41	913	5147	0,91	5,15	3,37
42	898	5321	0,90	5,32	3,37
43	903	5263	0,90	5,26	3,37
44	908	5208	0,91	5,21	3,37
45	896	5355	0,90	5,36	3,38
46	883	5514	0,88	5,51	3,38
47	890	5429	0,89	5,43	3,38
48	896	5360	0,90	5,36	3,38
49	901	5301	0,90	5,30	3,38
50	898	5338	0,90	5,34	3,38
51	918	5114	0,92	5,11	3,38
52	908	5228	0,91	5,23	3,39
53	900	5324	0,90	5,32	3,39
54	899	5336	0,90	5,34	3,39
55	910	5212	0,91	5,21	3,39
56	902	5306	0,90	5,31	3,39
57	901	5319	0,90	5,32	3,39
58	907	5252	0,91	5,25	3,39
59	908	5243	0,91	5,24	3,40
60	907	5258	0,91	5,26	3,40
61	903	5307	0,90	5,31	3,40
62	908	5251	0,91	5,25	3,40
63	907	5266	0,91	5,27	3,40
64	898	5375	0,90	5,38	3,40
65	903	5320	0,90	5,32	3,41
66	891	5465	0,89	5,47	3,41
67	906	5295	0,91	5,30	3,41
68	902	5353	0,90	5,35	3,42
69	902	5353	0,90	5,35	3,42
70	904	5338	0,90	5,34	3,43
71	909	5280	0,91	5,28	3,43
72	905	5329	0,91	5,33	3,43
73	906	5323	0,91	5,32	3,43
74	918	5185	0,92	5,19	3,43
75	914	5244	0,91	5,24	3,44
76	910	5295	0,91	5,30	3,44
77	908	5323	0,91	5,32	3,45
78	895	5485	0,90	5,49	3,45
79	905	5369	0,91	5,37	3,45
80	908	5338	0,91	5,34	3,46
81	911	5304	0,91	5,30	3,46
82	898	5460	0,90	5,46	3,46
83	886	5613	0,89	5,61	3,46

Probe	d [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	d [mm]	h [mm]	V [ $\text{mm}^3$ ]
84	889	5589	0,89	5,59	3,47
85	917	5263	0,92	5,26	3,48
86	905	5404	0,91	5,40	3,48
87	912	5354	0,91	5,35	3,50
88	900	5512	0,90	5,51	3,51
89	912	5368	0,91	5,37	3,51
90	916	5339	0,92	5,34	3,52
91	917	5346	0,92	5,35	3,53
92	892	5658	0,89	5,66	3,54
93	907	5474	0,91	5,47	3,54
94	902	5537	0,90	5,54	3,54
95	911	5437	0,91	5,44	3,54
96	911	5455	0,91	5,46	3,56
97	937	5165	0,94	5,17	3,56
98	915	5420	0,92	5,42	3,56
99	895	5689	0,90	5,69	3,58
100	894	5724	0,89	5,72	3,59

Tabelle 65: Scherbenwärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10,\text{tr}}$  für die nicht porosierten Referenzproben und die Probe mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Porosierungsmittel-Zugabe an sphärischem, kubischem und zylindrischem Porosierungsmittel. Aus je 3 Messungen DIN EN 12667 an Platten mit den Maßen 10 x 10 x 2,5 cm wurden die Mittelwerte und die zugehörigen Standardabweichungen gebildet.

Porenform	Porosierungs- mittelzugabe [Vol.-%]	Scherbenwärme- leitfähigkeit $\lambda_{10,\text{tr}}$ [W/(mK)]			Mittelwert $\lambda_{10,\text{tr}}$ [W/(mK)]	Standard- abweichung [W/(mK)]	Minderung zu N.P. [%]
Nicht porosiert (N.P.)	0	0,661	0,660	0,649	0,657	0,007	0,00%
Sphärisch	5	0,623	0,637	0,621	0,627	0,009	4,52%
	10	0,591	0,600	0,569	0,587	0,016	10,66%
	15	0,555	0,549	0,556	0,553	0,004	15,74%
	20	0,518	0,520	0,543	0,527	0,014	19,75%
Kubisch	5	0,581	0,590	0,592	0,588	0,006	10,51%
	10	0,571	0,560	0,550	0,560	0,011	14,67%
	15	0,486	0,504	0,509	0,500	0,012	23,91%
	20	0,380	0,417	0,389	0,395	0,019	39,80%
Zylindrisch	5	0,539	0,552	0,558	0,550	0,010	16,29%
	10	0,484	0,427	0,442	0,451	0,030	31,32%
	15	0,421	0,448	0,427	0,432	0,014	34,21%
	20	0,389	0,373	0,364	0,375	0,013	42,84%

Tabelle 66: Thermischer Ausdehnungskoeffizient der nicht porierten Referenzprobe in x-, y- und z-Richtung, gemessen in Abhängigkeit der Temperatur. Aus je 2 Werten wurde ein der Mittelwert gebildet.

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
21,43	1,97E-02	3,01E-02	2,49E-02	1,76E-02	2,04E-02	1,90E-02	1,86E-02	2,82E-02	2,34E-02
23,93	1,29E-02	1,79E-02	1,54E-02	1,01E-02	1,21E-02	1,11E-02	2,53E-02	1,54E-02	2,04E-02
26,43	-2,29E-03	1,01E-02	3,91E-03	-6,70E-03	-2,13E-03	-4,41E-03	1,05E-02	1,51E-04	5,33E-03
28,93	-4,46E-03	1,10E-02	3,27E-03	-1,01E-02	-4,07E-03	-7,08E-03	9,62E-03	7,58E-04	5,19E-03
31,43	4,08E-03	2,18E-02	1,30E-02	-1,95E-03	4,95E-03	1,50E-03	2,02E-02	1,23E-02	1,62E-02
33,93	1,04E-02	3,02E-02	2,03E-02	4,72E-03	1,17E-02	8,21E-03	2,89E-02	2,16E-02	2,53E-02
36,43	1,59E-02	3,74E-02	2,66E-02	1,05E-02	1,77E-02	1,41E-02	3,69E-02	2,99E-02	3,34E-02
38,93	2,11E-02	4,47E-02	3,29E-02	1,62E-02	2,43E-02	2,02E-02	4,47E-02	3,79E-02	4,13E-02
41,43	2,64E-02	5,12E-02	3,88E-02	2,15E-02	3,05E-02	2,60E-02	5,23E-02	4,49E-02	4,86E-02
43,93	3,21E-02	5,78E-02	4,50E-02	2,69E-02	3,62E-02	3,15E-02	5,99E-02	5,21E-02	5,60E-02
46,43	3,68E-02	6,41E-02	5,04E-02	3,16E-02	4,15E-02	3,65E-02	6,67E-02	5,85E-02	6,26E-02
48,93	4,19E-02	6,94E-02	5,57E-02	3,61E-02	4,78E-02	4,20E-02	7,34E-02	6,48E-02	6,91E-02
51,43	4,66E-02	7,52E-02	6,09E-02	4,05E-02	5,34E-02	4,69E-02	8,01E-02	7,07E-02	7,54E-02
53,93	5,15E-02	8,03E-02	6,59E-02	4,51E-02	5,96E-02	5,23E-02	8,67E-02	7,67E-02	8,17E-02
56,43	5,62E-02	8,50E-02	7,06E-02	4,92E-02	6,67E-02	5,79E-02	9,26E-02	8,21E-02	8,73E-02
58,93	6,07E-02	8,96E-02	7,52E-02	5,37E-02	7,26E-02	6,31E-02	9,85E-02	8,72E-02	9,29E-02
61,43	6,50E-02	9,41E-02	7,95E-02	5,80E-02	7,76E-02	6,78E-02	1,04E-01	9,26E-02	9,85E-02
63,93	6,91E-02	9,83E-02	8,37E-02	6,22E-02	8,26E-02	7,24E-02	1,10E-01	9,74E-02	1,04E-01
66,43	7,25E-02	1,02E-01	8,74E-02	6,63E-02	8,63E-02	7,63E-02	1,15E-01	1,02E-01	1,09E-01
68,93	7,62E-02	1,07E-01	9,14E-02	7,06E-02	9,14E-02	8,10E-02	1,20E-01	1,07E-01	1,14E-01
71,43	7,86E-02	1,09E-01	9,39E-02	7,38E-02	9,39E-02	8,38E-02	1,23E-01	1,10E-01	1,16E-01
73,93	8,06E-02	1,11E-01	9,59E-02	7,67E-02	9,61E-02	8,64E-02	1,27E-01	1,12E-01	1,19E-01
76,43	8,32E-02	1,13E-01	9,80E-02	7,93E-02	9,77E-02	8,85E-02	1,30E-01	1,13E-01	1,22E-01
78,93	8,60E-02	1,16E-01	1,01E-01	8,27E-02	1,01E-01	9,16E-02	1,35E-01	1,16E-01	1,26E-01
81,43	8,85E-02	1,19E-01	1,04E-01	8,58E-02	1,04E-01	9,48E-02	1,40E-01	1,20E-01	1,30E-01
83,93	9,05E-02	1,21E-01	1,06E-01	8,89E-02	1,05E-01	9,72E-02	1,43E-01	1,22E-01	1,33E-01
86,43	9,21E-02	1,23E-01	1,08E-01	9,13E-02	1,07E-01	9,89E-02	1,46E-01	1,24E-01	1,35E-01
88,93	9,35E-02	1,24E-01	1,09E-01	9,31E-02	1,08E-01	1,00E-01	1,48E-01	1,26E-01	1,37E-01
91,43	9,57E-02	1,25E-01	1,11E-01	9,60E-02	1,10E-01	1,03E-01	1,52E-01	1,28E-01	1,40E-01
93,93	9,42E-02	1,26E-01	1,10E-01	9,52E-02	1,10E-01	1,03E-01	1,53E-01	1,31E-01	1,42E-01
96,43	9,28E-02	1,27E-01	1,10E-01	9,41E-02	1,12E-01	1,03E-01	1,58E-01	1,34E-01	1,46E-01
98,93	9,84E-02	1,31E-01	1,15E-01	9,86E-02	1,26E-01	1,12E-01	1,61E-01	1,35E-01	1,48E-01
101,43	9,78E-02	1,30E-01	1,14E-01	1,03E-01	1,33E-01	1,18E-01	1,62E-01	1,37E-01	1,49E-01
103,93	9,71E-02	1,32E-01	1,14E-01	1,03E-01	1,35E-01	1,19E-01	1,64E-01	1,38E-01	1,51E-01
106,43	9,56E-02	1,33E-01	1,14E-01	1,03E-01	1,51E-01	1,27E-01	1,66E-01	1,40E-01	1,53E-01
108,93	9,42E-02	1,33E-01	1,14E-01	1,03E-01	1,53E-01	1,28E-01	1,67E-01	1,41E-01	1,54E-01
111,43	8,92E-02	1,32E-01	1,11E-01	9,86E-02	1,50E-01	1,24E-01	1,67E-01	1,41E-01	1,54E-01
113,93	8,81E-02	1,36E-01	1,12E-01	9,70E-02	1,53E-01	1,25E-01	1,71E-01	1,42E-01	1,57E-01
116,43	9,82E-02	1,41E-01	1,19E-01	1,10E-01	1,60E-01	1,35E-01	1,75E-01	1,44E-01	1,60E-01
118,93	1,06E-01	1,44E-01	1,25E-01	1,22E-01	1,64E-01	1,43E-01	1,78E-01	1,47E-01	1,62E-01
121,43	1,09E-01	1,46E-01	1,27E-01	1,28E-01	1,66E-01	1,47E-01	1,79E-01	1,48E-01	1,63E-01
123,93	1,10E-01	1,48E-01	1,29E-01	1,33E-01	1,68E-01	1,51E-01	1,81E-01	1,49E-01	1,65E-01
126,43	1,11E-01	1,49E-01	1,30E-01	1,36E-01	1,70E-01	1,53E-01	1,82E-01	1,50E-01	1,66E-01
128,93	1,11E-01	1,50E-01	1,30E-01	1,39E-01	1,74E-01	1,57E-01	1,84E-01	1,52E-01	1,68E-01
131,43	1,10E-01	1,51E-01	1,31E-01	1,41E-01	1,75E-01	1,58E-01	1,84E-01	1,53E-01	1,69E-01
133,93	1,09E-01	1,51E-01	1,30E-01	1,43E-01	1,76E-01	1,59E-01	1,84E-01	1,53E-01	1,69E-01
136,43	1,08E-01	1,52E-01	1,30E-01	1,45E-01	1,75E-01	1,60E-01	1,85E-01	1,54E-01	1,70E-01
138,93	1,07E-01	1,53E-01	1,30E-01	1,47E-01	1,75E-01	1,61E-01	1,87E-01	1,55E-01	1,71E-01
141,43	1,05E-01	1,53E-01	1,29E-01	1,48E-01	1,73E-01	1,60E-01	1,86E-01	1,55E-01	1,71E-01
143,93	1,04E-01	1,53E-01	1,29E-01	1,49E-01	1,72E-01	1,61E-01	1,88E-01	1,55E-01	1,71E-01
146,43	1,02E-01	1,53E-01	1,28E-01	1,50E-01	1,70E-01	1,60E-01	1,87E-01	1,54E-01	1,71E-01
148,93	1,01E-01	1,54E-01	1,28E-01	1,52E-01	1,68E-01	1,60E-01	1,89E-01	1,54E-01	1,71E-01
151,43	9,92E-02	1,54E-01	1,27E-01	1,52E-01	1,66E-01	1,59E-01	1,88E-01	1,54E-01	1,71E-01
153,93	9,68E-02	1,54E-01	1,26E-01	1,53E-01	1,64E-01	1,59E-01	1,89E-01	1,54E-01	1,72E-01
156,43	9,44E-02	1,55E-01	1,25E-01	1,54E-01	1,63E-01	1,59E-01	1,90E-01	1,55E-01	1,72E-01
158,93	9,21E-02	1,55E-01	1,23E-01	1,54E-01	1,60E-01	1,57E-01	1,90E-01	1,54E-01	1,72E-01
161,43	9,03E-02	1,55E-01	1,23E-01	1,55E-01	1,58E-01	1,56E-01	1,90E-01	1,55E-01	1,72E-01
163,93	8,93E-02	1,56E-01	1,22E-01	1,56E-01	1,62E-01	1,59E-01	1,91E-01	1,55E-01	1,73E-01
166,43	8,75E-02	1,56E-01	1,22E-01	1,57E-01	1,62E-01	1,59E-01	1,92E-01	1,55E-01	1,74E-01
168,93	8,54E-02	1,56E-01	1,21E-01	1,58E-01	1,65E-01	1,61E-01	1,92E-01	1,56E-01	1,74E-01
171,43	8,30E-02	1,56E-01	1,20E-01	1,58E-01	1,66E-01	1,62E-01	1,92E-01	1,56E-01	1,74E-01

# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
173,93	8,08E-02	1,56E-01	1,18E-01	1,58E-01	1,63E-01	1,61E-01	1,93E-01	1,56E-01	1,74E-01
176,43	7,83E-02	1,56E-01	1,17E-01	1,58E-01	1,62E-01	1,60E-01	1,94E-01	1,56E-01	1,75E-01
178,93	7,60E-02	1,56E-01	1,16E-01	1,59E-01	1,59E-01	1,59E-01	1,94E-01	1,57E-01	1,76E-01
181,43	7,45E-02	1,57E-01	1,16E-01	1,59E-01	1,57E-01	1,58E-01	1,95E-01	1,58E-01	1,76E-01
183,93	7,26E-02	1,55E-01	1,14E-01	1,59E-01	1,55E-01	1,57E-01	1,95E-01	1,57E-01	1,76E-01
186,43	7,21E-02	1,55E-01	1,14E-01	1,60E-01	1,53E-01	1,56E-01	1,96E-01	1,58E-01	1,77E-01
188,93	7,29E-02	1,55E-01	1,14E-01	1,60E-01	1,54E-01	1,57E-01	1,98E-01	1,59E-01	1,78E-01
191,43	7,30E-02	1,56E-01	1,14E-01	1,60E-01	1,53E-01	1,57E-01	1,98E-01	1,60E-01	1,79E-01
193,93	7,35E-02	1,56E-01	1,15E-01	1,61E-01	1,51E-01	1,56E-01	2,00E-01	1,60E-01	1,80E-01
196,43	6,62E-02	1,56E-01	1,11E-01	1,53E-01	1,46E-01	1,50E-01	2,00E-01	1,60E-01	1,80E-01
198,93	7,32E-02	1,58E-01	1,15E-01	1,59E-01	1,45E-01	1,52E-01	2,01E-01	1,60E-01	1,81E-01
201,43	7,42E-02	1,59E-01	1,16E-01	1,59E-01	1,45E-01	1,52E-01	2,02E-01	1,61E-01	1,82E-01
203,93	7,62E-02	1,61E-01	1,18E-01	1,61E-01	1,49E-01	1,55E-01	2,04E-01	1,63E-01	1,84E-01
206,43	7,67E-02	1,62E-01	1,19E-01	1,61E-01	1,46E-01	1,54E-01	2,05E-01	1,64E-01	1,85E-01
208,93	7,70E-02	1,64E-01	1,20E-01	1,59E-01	1,47E-01	1,53E-01	2,07E-01	1,65E-01	1,86E-01
211,43	7,96E-02	1,66E-01	1,23E-01	1,63E-01	1,47E-01	1,55E-01	2,09E-01	1,67E-01	1,88E-01
213,93	8,06E-02	1,68E-01	1,24E-01	1,64E-01	1,46E-01	1,55E-01	2,11E-01	1,68E-01	1,90E-01
216,43	8,13E-02	1,69E-01	1,25E-01	1,64E-01	1,44E-01	1,54E-01	2,12E-01	1,69E-01	1,91E-01
218,93	8,32E-02	1,72E-01	1,28E-01	1,66E-01	1,43E-01	1,55E-01	2,15E-01	1,72E-01	1,93E-01
221,43	8,47E-02	1,74E-01	1,29E-01	1,67E-01	1,42E-01	1,55E-01	2,17E-01	1,72E-01	1,95E-01
223,93	8,68E-02	1,77E-01	1,32E-01	1,68E-01	1,42E-01	1,55E-01	2,19E-01	1,75E-01	1,97E-01
226,43	8,90E-02	1,79E-01	1,34E-01	1,70E-01	1,45E-01	1,57E-01	2,22E-01	1,77E-01	1,99E-01
228,93	9,13E-02	1,82E-01	1,37E-01	1,71E-01	1,45E-01	1,58E-01	2,24E-01	1,80E-01	2,02E-01
231,43	9,26E-02	1,84E-01	1,38E-01	1,72E-01	1,48E-01	1,60E-01	2,26E-01	1,81E-01	2,04E-01
233,93	9,47E-02	1,86E-01	1,40E-01	1,73E-01	1,50E-01	1,61E-01	2,29E-01	1,83E-01	2,06E-01
236,43	9,70E-02	1,79E-01	1,38E-01	1,74E-01	1,52E-01	1,63E-01	2,32E-01	1,85E-01	2,08E-01
238,93	9,86E-02	1,81E-01	1,40E-01	1,75E-01	1,53E-01	1,64E-01	2,34E-01	1,87E-01	2,11E-01
241,43	1,01E-01	1,83E-01	1,42E-01	1,76E-01	1,56E-01	1,66E-01	2,37E-01	1,90E-01	2,13E-01
243,93	1,04E-01	1,86E-01	1,45E-01	1,80E-01	1,60E-01	1,70E-01	2,39E-01	1,92E-01	2,16E-01
246,43	1,06E-01	1,88E-01	1,47E-01	1,82E-01	1,61E-01	1,71E-01	2,42E-01	1,95E-01	2,19E-01
248,93	1,09E-01	1,90E-01	1,50E-01	1,84E-01	1,63E-01	1,74E-01	2,46E-01	1,98E-01	2,22E-01
251,43	1,12E-01	1,94E-01	1,53E-01	1,87E-01	1,68E-01	1,78E-01	2,49E-01	2,01E-01	2,25E-01
253,93	1,15E-01	1,97E-01	1,56E-01	1,90E-01	1,72E-01	1,81E-01	2,52E-01	2,04E-01	2,28E-01
256,43	1,18E-01	2,00E-01	1,59E-01	1,93E-01	1,75E-01	1,84E-01	2,55E-01	2,07E-01	2,31E-01
258,93	1,21E-01	2,03E-01	1,62E-01	1,96E-01	1,78E-01	1,87E-01	2,58E-01	2,09E-01	2,34E-01
261,43	1,24E-01	2,05E-01	1,64E-01	1,99E-01	1,81E-01	1,90E-01	2,61E-01	2,12E-01	2,36E-01
263,93	1,28E-01	2,09E-01	1,68E-01	2,03E-01	1,86E-01	1,94E-01	2,65E-01	2,15E-01	2,40E-01
266,43	1,31E-01	2,08E-01	1,70E-01	2,06E-01	1,88E-01	1,97E-01	2,67E-01	2,18E-01	2,43E-01
268,93	1,35E-01	2,12E-01	1,74E-01	2,10E-01	1,92E-01	2,01E-01	2,71E-01	2,22E-01	2,46E-01
271,43	1,39E-01	2,16E-01	1,77E-01	2,13E-01	1,96E-01	2,04E-01	2,75E-01	2,25E-01	2,50E-01
273,93	1,43E-01	2,19E-01	1,81E-01	2,16E-01	1,99E-01	2,08E-01	2,79E-01	2,29E-01	2,54E-01
276,43	1,46E-01	2,23E-01	1,85E-01	2,20E-01	2,03E-01	2,11E-01	2,83E-01	2,32E-01	2,57E-01
278,93	1,50E-01	2,27E-01	1,89E-01	2,22E-01	2,06E-01	2,14E-01	2,87E-01	2,35E-01	2,61E-01
281,43	1,54E-01	2,31E-01	1,93E-01	2,26E-01	2,10E-01	2,18E-01	2,90E-01	2,39E-01	2,65E-01
283,93	1,58E-01	2,35E-01	1,97E-01	2,30E-01	2,14E-01	2,22E-01	2,94E-01	2,42E-01	2,68E-01
286,43	1,62E-01	2,39E-01	2,01E-01	2,34E-01	2,19E-01	2,26E-01	2,98E-01	2,46E-01	2,72E-01
288,93	1,66E-01	2,44E-01	2,05E-01	2,37E-01	2,22E-01	2,30E-01	3,01E-01	2,49E-01	2,75E-01
291,43	1,70E-01	2,48E-01	2,09E-01	2,40E-01	2,26E-01	2,33E-01	3,05E-01	2,52E-01	2,79E-01
293,93	1,74E-01	2,52E-01	2,13E-01	2,44E-01	2,29E-01	2,36E-01	3,08E-01	2,56E-01	2,82E-01
296,43	1,78E-01	2,57E-01	2,17E-01	2,48E-01	2,34E-01	2,41E-01	3,13E-01	2,60E-01	2,87E-01
298,93	1,82E-01	2,61E-01	2,22E-01	2,51E-01	2,38E-01	2,44E-01	3,17E-01	2,63E-01	2,90E-01
301,43	1,86E-01	2,66E-01	2,26E-01	2,54E-01	2,41E-01	2,48E-01	3,20E-01	2,66E-01	2,93E-01
303,93	1,91E-01	2,70E-01	2,30E-01	2,57E-01	2,45E-01	2,51E-01	3,24E-01	2,70E-01	2,97E-01
306,43	1,95E-01	2,73E-01	2,34E-01	2,60E-01	2,49E-01	2,55E-01	3,28E-01	2,74E-01	3,01E-01
308,93	1,99E-01	2,77E-01	2,38E-01	2,63E-01	2,53E-01	2,58E-01	3,32E-01	2,77E-01	3,04E-01
311,43	2,03E-01	2,71E-01	2,37E-01	2,66E-01	2,57E-01	2,62E-01	3,35E-01	2,81E-01	3,08E-01
313,93	2,07E-01	2,75E-01	2,41E-01	2,68E-01	2,61E-01	2,65E-01	3,38E-01	2,84E-01	3,11E-01
316,43	2,11E-01	2,79E-01	2,45E-01	2,72E-01	2,66E-01	2,69E-01	3,43E-01	2,88E-01	3,15E-01
318,93	2,15E-01	2,83E-01	2,49E-01	2,75E-01	2,70E-01	2,72E-01	3,46E-01	2,92E-01	3,19E-01
321,43	2,19E-01	2,87E-01	2,53E-01	2,78E-01	2,74E-01	2,76E-01	3,50E-01	2,95E-01	3,23E-01
323,93	2,23E-01	2,92E-01	2,58E-01	2,81E-01	2,79E-01	2,80E-01	3,53E-01	2,99E-01	3,26E-01
326,43	2,28E-01	2,95E-01	2,61E-01	2,84E-01	2,83E-01	2,84E-01	3,57E-01	3,03E-01	3,30E-01
328,93	2,32E-01	2,99E-01	2,65E-01	2,86E-01	2,88E-01	2,87E-01	3,60E-01	3,06E-01	3,33E-01
331,43	2,36E-01	3,03E-01	2,70E-01	2,90E-01	2,93E-01	2,91E-01	3,64E-01	3,10E-01	3,37E-01
333,93	2,40E-01	3,08E-01	2,74E-01	2,93E-01	2,97E-01	2,95E-01	3,67E-01	3,14E-01	3,41E-01



# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
336,43	2,44E-01	3,11E-01	2,78E-01	2,96E-01	3,01E-01	2,98E-01	3,70E-01	3,17E-01	3,44E-01
338,93	2,49E-01	3,17E-01	2,83E-01	2,99E-01	3,06E-01	3,03E-01	3,74E-01	3,22E-01	3,48E-01
341,43	2,53E-01	3,22E-01	2,88E-01	3,03E-01	3,11E-01	3,07E-01	3,78E-01	3,26E-01	3,52E-01
343,93	2,59E-01	3,28E-01	2,93E-01	3,08E-01	3,16E-01	3,12E-01	3,82E-01	3,31E-01	3,57E-01
346,43	2,64E-01	3,33E-01	2,98E-01	3,12E-01	3,21E-01	3,17E-01	3,86E-01	3,35E-01	3,61E-01
348,93	2,68E-01	3,37E-01	3,03E-01	3,16E-01	3,25E-01	3,21E-01	3,90E-01	3,39E-01	3,64E-01
351,43	2,73E-01	3,42E-01	3,07E-01	3,21E-01	3,30E-01	3,25E-01	3,94E-01	3,43E-01	3,69E-01
353,93	2,77E-01	3,46E-01	3,12E-01	3,25E-01	3,35E-01	3,30E-01	3,98E-01	3,47E-01	3,73E-01
356,43	2,81E-01	3,51E-01	3,16E-01	3,30E-01	3,39E-01	3,35E-01	4,02E-01	3,51E-01	3,77E-01
358,93	2,85E-01	3,56E-01	3,21E-01	3,35E-01	3,44E-01	3,39E-01	4,06E-01	3,56E-01	3,81E-01
361,43	2,90E-01	3,62E-01	3,26E-01	3,40E-01	3,49E-01	3,44E-01	4,10E-01	3,61E-01	3,85E-01
363,93	2,95E-01	3,66E-01	3,30E-01	3,44E-01	3,54E-01	3,49E-01	4,14E-01	3,65E-01	3,89E-01
366,43	2,99E-01	3,70E-01	3,35E-01	3,49E-01	3,60E-01	3,54E-01	4,18E-01	3,68E-01	3,93E-01
368,93	3,04E-01	3,76E-01	3,40E-01	3,54E-01	3,65E-01	3,59E-01	4,22E-01	3,73E-01	3,98E-01
371,43	3,08E-01	3,81E-01	3,44E-01	3,59E-01	3,70E-01	3,64E-01	4,26E-01	3,77E-01	4,02E-01
373,93	3,13E-01	3,84E-01	3,49E-01	3,64E-01	3,74E-01	3,69E-01	4,31E-01	3,82E-01	4,07E-01
376,43	3,17E-01	3,89E-01	3,53E-01	3,68E-01	3,79E-01	3,73E-01	4,34E-01	3,87E-01	4,11E-01
378,93	3,22E-01	3,95E-01	3,58E-01	3,73E-01	3,84E-01	3,79E-01	4,39E-01	3,91E-01	4,15E-01
381,43	3,27E-01	3,99E-01	3,63E-01	3,77E-01	3,89E-01	3,83E-01	4,44E-01	3,96E-01	4,20E-01
383,93	3,32E-01	4,05E-01	3,68E-01	3,82E-01	3,94E-01	3,88E-01	4,48E-01	4,01E-01	4,24E-01
386,43	3,36E-01	4,08E-01	3,72E-01	3,87E-01	3,98E-01	3,92E-01	4,52E-01	4,05E-01	4,29E-01
388,93	3,41E-01	4,13E-01	3,77E-01	3,91E-01	4,03E-01	3,97E-01	4,57E-01	4,10E-01	4,33E-01
391,43	3,46E-01	4,17E-01	3,81E-01	3,97E-01	4,09E-01	4,03E-01	4,62E-01	4,15E-01	4,38E-01
393,93	3,50E-01	4,23E-01	3,86E-01	4,02E-01	4,14E-01	4,08E-01	4,67E-01	4,20E-01	4,43E-01
396,43	3,54E-01	4,27E-01	3,91E-01	4,07E-01	4,19E-01	4,13E-01	4,71E-01	4,24E-01	4,48E-01
398,93	3,59E-01	4,33E-01	3,96E-01	4,12E-01	4,24E-01	4,18E-01	4,77E-01	4,30E-01	4,53E-01
401,43	3,64E-01	4,38E-01	4,01E-01	4,18E-01	4,30E-01	4,24E-01	4,82E-01	4,35E-01	4,58E-01
403,93	3,69E-01	4,42E-01	4,06E-01	4,23E-01	4,35E-01	4,29E-01	4,87E-01	4,39E-01	4,63E-01
406,43	3,73E-01	4,47E-01	4,10E-01	4,27E-01	4,41E-01	4,34E-01	4,92E-01	4,45E-01	4,68E-01
408,93	3,78E-01	4,51E-01	4,14E-01	4,31E-01	4,46E-01	4,39E-01	4,96E-01	4,49E-01	4,73E-01
411,43	3,82E-01	4,56E-01	4,19E-01	4,36E-01	4,52E-01	4,44E-01	5,01E-01	4,55E-01	4,78E-01
413,93	3,88E-01	4,62E-01	4,25E-01	4,41E-01	4,58E-01	4,49E-01	5,07E-01	4,61E-01	4,84E-01
416,43	3,94E-01	4,67E-01	4,31E-01	4,46E-01	4,64E-01	4,55E-01	5,13E-01	4,66E-01	4,90E-01
418,93	3,99E-01	4,72E-01	4,35E-01	4,50E-01	4,69E-01	4,60E-01	5,18E-01	4,71E-01	4,94E-01
421,43	4,04E-01	4,77E-01	4,41E-01	4,55E-01	4,76E-01	4,65E-01	5,23E-01	4,77E-01	5,00E-01
423,93	4,09E-01	4,82E-01	4,46E-01	4,59E-01	4,81E-01	4,70E-01	5,29E-01	4,82E-01	5,05E-01
426,43	4,15E-01	4,87E-01	4,51E-01	4,64E-01	4,86E-01	4,75E-01	5,34E-01	4,86E-01	5,10E-01
428,93	4,20E-01	4,93E-01	4,56E-01	4,69E-01	4,92E-01	4,80E-01	5,40E-01	4,92E-01	5,16E-01
431,43	4,26E-01	4,98E-01	4,62E-01	4,74E-01	4,98E-01	4,86E-01	5,46E-01	4,97E-01	5,22E-01
433,93	4,31E-01	5,03E-01	4,67E-01	4,79E-01	5,04E-01	4,92E-01	5,52E-01	5,03E-01	5,27E-01
436,43	4,36E-01	5,08E-01	4,72E-01	4,84E-01	5,10E-01	4,97E-01	5,57E-01	5,08E-01	5,32E-01
438,93	4,41E-01	5,14E-01	4,78E-01	4,89E-01	5,16E-01	5,02E-01	5,63E-01	5,13E-01	5,38E-01
441,43	4,48E-01	5,19E-01	4,83E-01	4,94E-01	5,22E-01	5,08E-01	5,69E-01	5,19E-01	5,44E-01
443,93	4,53E-01	5,25E-01	4,89E-01	4,99E-01	5,28E-01	5,13E-01	5,75E-01	5,25E-01	5,50E-01
446,43	4,59E-01	5,31E-01	4,95E-01	5,04E-01	5,33E-01	5,19E-01	5,81E-01	5,31E-01	5,56E-01
448,93	4,65E-01	5,36E-01	5,01E-01	5,10E-01	5,40E-01	5,25E-01	5,87E-01	5,37E-01	5,62E-01
451,43	4,72E-01	5,42E-01	5,07E-01	5,15E-01	5,45E-01	5,30E-01	5,93E-01	5,42E-01	5,68E-01
453,93	4,78E-01	5,48E-01	5,13E-01	5,20E-01	5,52E-01	5,36E-01	5,99E-01	5,49E-01	5,74E-01
456,43	4,84E-01	5,55E-01	5,20E-01	5,26E-01	5,58E-01	5,42E-01	6,06E-01	5,55E-01	5,80E-01
458,93	4,91E-01	5,61E-01	5,26E-01	5,31E-01	5,64E-01	5,47E-01	6,12E-01	5,60E-01	5,86E-01
461,43	4,97E-01	5,67E-01	5,32E-01	5,36E-01	5,70E-01	5,53E-01	6,18E-01	5,66E-01	5,92E-01
463,93	5,03E-01	5,73E-01	5,38E-01	5,41E-01	5,76E-01	5,59E-01	6,24E-01	5,72E-01	5,98E-01
466,43	5,07E-01	5,77E-01	5,42E-01	5,46E-01	5,80E-01	5,63E-01	6,30E-01	5,78E-01	6,04E-01
468,93	5,13E-01	5,83E-01	5,48E-01	5,52E-01	5,86E-01	5,69E-01	6,36E-01	5,84E-01	6,10E-01
471,43	5,20E-01	5,89E-01	5,54E-01	5,58E-01	5,93E-01	5,76E-01	6,43E-01	5,91E-01	6,17E-01
473,93	5,26E-01	5,95E-01	5,60E-01	5,63E-01	5,99E-01	5,81E-01	6,49E-01	5,96E-01	6,23E-01
476,43	5,33E-01	6,01E-01	5,67E-01	5,68E-01	6,06E-01	5,87E-01	6,56E-01	6,03E-01	6,29E-01
478,93	5,39E-01	6,07E-01	5,73E-01	5,73E-01	6,12E-01	5,93E-01	6,62E-01	6,09E-01	6,36E-01
481,43	5,46E-01	6,13E-01	5,79E-01	5,78E-01	6,19E-01	5,99E-01	6,68E-01	6,15E-01	6,42E-01
483,93	5,52E-01	6,19E-01	5,86E-01	5,83E-01	6,26E-01	6,05E-01	6,75E-01	6,22E-01	6,48E-01
486,43	5,60E-01	6,25E-01	5,92E-01	5,88E-01	6,33E-01	6,11E-01	6,81E-01	6,28E-01	6,55E-01
488,93	5,67E-01	6,32E-01	5,99E-01	5,94E-01	6,40E-01	6,17E-01	6,88E-01	6,35E-01	6,61E-01
491,43	5,73E-01	6,38E-01	6,06E-01	5,99E-01	6,47E-01	6,23E-01	6,95E-01	6,41E-01	6,68E-01
493,93	5,80E-01	6,45E-01	6,12E-01	6,05E-01	6,53E-01	6,29E-01	7,01E-01	6,48E-01	6,74E-01
496,43	5,87E-01	6,50E-01	6,19E-01	6,10E-01	6,59E-01	6,34E-01	7,07E-01	6,54E-01	6,81E-01

# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
498,93	5,94E-01	6,57E-01	6,26E-01	6,16E-01	6,65E-01	6,40E-01	7,14E-01	6,60E-01	6,87E-01
501,43	6,02E-01	6,63E-01	6,33E-01	6,21E-01	6,72E-01	6,47E-01	7,21E-01	6,67E-01	6,94E-01
503,93	6,09E-01	6,70E-01	6,39E-01	6,27E-01	6,78E-01	6,53E-01	7,28E-01	6,73E-01	7,01E-01
506,43	6,16E-01	6,77E-01	6,47E-01	6,33E-01	6,85E-01	6,59E-01	7,35E-01	6,81E-01	7,08E-01
508,93	6,23E-01	6,83E-01	6,53E-01	6,39E-01	6,92E-01	6,65E-01	7,42E-01	6,87E-01	7,15E-01
511,43	6,30E-01	6,90E-01	6,60E-01	6,44E-01	6,99E-01	6,71E-01	7,49E-01	6,94E-01	7,21E-01
513,93	6,37E-01	6,96E-01	6,66E-01	6,50E-01	7,05E-01	6,77E-01	7,55E-01	7,00E-01	7,28E-01
516,43	6,44E-01	7,03E-01	6,74E-01	6,56E-01	7,12E-01	6,84E-01	7,62E-01	7,07E-01	7,35E-01
518,93	6,52E-01	7,10E-01	6,81E-01	6,62E-01	7,18E-01	6,90E-01	7,70E-01	7,14E-01	7,42E-01
521,43	6,59E-01	7,18E-01	6,89E-01	6,68E-01	7,26E-01	6,97E-01	7,77E-01	7,21E-01	7,49E-01
523,93	6,67E-01	7,25E-01	6,96E-01	6,74E-01	7,33E-01	7,03E-01	7,84E-01	7,28E-01	7,56E-01
526,43	6,74E-01	7,32E-01	7,03E-01	6,80E-01	7,40E-01	7,10E-01	7,92E-01	7,34E-01	7,63E-01
528,93	6,81E-01	7,39E-01	7,10E-01	6,86E-01	7,46E-01	7,16E-01	7,99E-01	7,41E-01	7,70E-01
531,43	6,89E-01	7,48E-01	7,19E-01	6,93E-01	7,53E-01	7,23E-01	8,07E-01	7,49E-01	7,78E-01
533,93	6,97E-01	7,56E-01	7,26E-01	7,00E-01	7,60E-01	7,30E-01	8,14E-01	7,56E-01	7,85E-01
536,43	7,05E-01	7,64E-01	7,34E-01	7,07E-01	7,67E-01	7,37E-01	8,22E-01	7,64E-01	7,93E-01
538,93	7,14E-01	7,72E-01	7,43E-01	7,14E-01	7,76E-01	7,45E-01	8,31E-01	7,72E-01	8,01E-01
541,43	7,22E-01	7,80E-01	7,51E-01	7,22E-01	7,83E-01	7,53E-01	8,40E-01	7,79E-01	8,09E-01
543,93	7,31E-01	7,89E-01	7,60E-01	7,30E-01	7,92E-01	7,61E-01	8,50E-01	7,88E-01	8,19E-01
546,43	7,39E-01	7,97E-01	7,68E-01	7,37E-01	7,99E-01	7,68E-01	8,58E-01	7,95E-01	8,27E-01
548,93	7,48E-01	8,05E-01	7,76E-01	7,45E-01	8,08E-01	7,76E-01	8,68E-01	8,04E-01	8,36E-01
551,43	7,56E-01	8,12E-01	7,84E-01	7,52E-01	8,16E-01	7,84E-01	8,77E-01	8,13E-01	8,45E-01
553,93	7,65E-01	8,20E-01	7,93E-01	7,60E-01	8,24E-01	7,92E-01	8,86E-01	8,22E-01	8,54E-01
556,43	7,74E-01	8,28E-01	8,01E-01	7,67E-01	8,31E-01	7,99E-01	8,95E-01	8,30E-01	8,62E-01
558,93	7,82E-01	8,34E-01	8,08E-01	7,74E-01	8,39E-01	8,06E-01	9,03E-01	8,38E-01	8,71E-01
561,43	7,90E-01	8,42E-01	8,16E-01	7,81E-01	8,47E-01	8,14E-01	9,12E-01	8,46E-01	8,79E-01
563,93	7,98E-01	8,49E-01	8,24E-01	7,88E-01	8,54E-01	8,21E-01	9,20E-01	8,54E-01	8,87E-01
566,43	8,06E-01	8,57E-01	8,32E-01	7,95E-01	8,62E-01	8,29E-01	9,29E-01	8,62E-01	8,95E-01
568,93	8,13E-01	8,64E-01	8,38E-01	8,01E-01	8,68E-01	8,35E-01	9,36E-01	8,69E-01	9,03E-01
571,43	8,20E-01	8,71E-01	8,46E-01	8,08E-01	8,76E-01	8,42E-01	9,44E-01	8,76E-01	9,10E-01
573,93	8,28E-01	8,78E-01	8,53E-01	8,15E-01	8,83E-01	8,49E-01	9,52E-01	8,84E-01	9,18E-01
576,43	8,35E-01	8,85E-01	8,60E-01	8,21E-01	8,90E-01	8,56E-01	9,59E-01	8,91E-01	9,25E-01
578,93	8,43E-01	8,93E-01	8,68E-01	8,30E-01	8,97E-01	8,63E-01	9,66E-01	8,98E-01	9,32E-01
581,43	8,50E-01	9,00E-01	8,75E-01	8,37E-01	9,04E-01	8,70E-01	9,74E-01	9,06E-01	9,40E-01
583,93	8,58E-01	9,07E-01	8,83E-01	8,44E-01	9,11E-01	8,77E-01	9,81E-01	9,13E-01	9,47E-01
586,43	8,66E-01	9,14E-01	8,90E-01	8,50E-01	9,17E-01	8,84E-01	9,88E-01	9,20E-01	9,54E-01
588,93	8,73E-01	9,21E-01	8,97E-01	8,59E-01	9,25E-01	8,92E-01	9,96E-01	9,27E-01	9,61E-01
591,43	8,81E-01	9,27E-01	9,04E-01	8,72E-01	9,31E-01	9,02E-01	1,00E+00	9,34E-01	9,68E-01
593,93	8,88E-01	9,34E-01	9,11E-01	8,79E-01	9,38E-01	9,08E-01	1,01E+00	9,41E-01	9,76E-01
596,43	8,96E-01	9,41E-01	9,18E-01	8,86E-01	9,45E-01	9,16E-01	1,02E+00	9,49E-01	9,83E-01
598,93	9,03E-01	9,48E-01	9,26E-01	8,93E-01	9,52E-01	9,22E-01	1,02E+00	9,56E-01	9,90E-01
601,43	9,09E-01	9,54E-01	9,32E-01	8,99E-01	9,59E-01	9,29E-01	1,03E+00	9,62E-01	9,96E-01
603,93	9,16E-01	9,61E-01	9,39E-01	9,06E-01	9,66E-01	9,36E-01	1,04E+00	9,70E-01	1,00E+00
606,43	9,23E-01	9,68E-01	9,46E-01	9,13E-01	9,73E-01	9,43E-01	1,05E+00	9,77E-01	1,01E+00
608,93	9,30E-01	9,76E-01	9,53E-01	9,21E-01	9,80E-01	9,50E-01	1,05E+00	9,84E-01	1,02E+00
611,43	9,37E-01	9,83E-01	9,60E-01	9,28E-01	9,87E-01	9,57E-01	1,06E+00	9,91E-01	1,03E+00
613,93	9,44E-01	9,90E-01	9,67E-01	9,34E-01	9,94E-01	9,64E-01	1,07E+00	9,98E-01	1,03E+00
616,43	9,51E-01	9,97E-01	9,74E-01	9,41E-01	1,00E+00	9,71E-01	1,07E+00	1,01E+00	1,04E+00
618,93	9,58E-01	1,00E+00	9,81E-01	9,49E-01	1,01E+00	9,79E-01	1,08E+00	1,01E+00	1,05E+00
621,43	9,65E-01	1,01E+00	9,88E-01	9,57E-01	1,01E+00	9,86E-01	1,09E+00	1,02E+00	1,05E+00
623,93	9,72E-01	1,02E+00	9,95E-01	9,63E-01	1,02E+00	9,92E-01	1,10E+00	1,03E+00	1,06E+00
626,43	9,79E-01	1,02E+00	1,00E+00	9,70E-01	1,03E+00	1,00E+00	1,10E+00	1,03E+00	1,07E+00
628,93	9,86E-01	1,03E+00	1,01E+00	9,77E-01	1,04E+00	1,01E+00	1,11E+00	1,04E+00	1,08E+00
631,43	9,94E-01	1,04E+00	1,02E+00	9,84E-01	1,04E+00	1,01E+00	1,12E+00	1,05E+00	1,08E+00
633,93	1,00E+00	1,05E+00	1,02E+00	9,90E-01	1,05E+00	1,02E+00	1,12E+00	1,06E+00	1,09E+00
636,43	1,01E+00	1,05E+00	1,03E+00	9,97E-01	1,06E+00	1,03E+00	1,13E+00	1,06E+00	1,10E+00
638,93	1,01E+00	1,06E+00	1,04E+00	1,00E+00	1,06E+00	1,03E+00	1,14E+00	1,07E+00	1,10E+00
641,43	1,02E+00	1,07E+00	1,04E+00	1,01E+00	1,07E+00	1,04E+00	1,15E+00	1,08E+00	1,11E+00
643,93	1,03E+00	1,07E+00	1,05E+00	1,02E+00	1,08E+00	1,05E+00	1,15E+00	1,08E+00	1,12E+00
646,43	1,04E+00	1,08E+00	1,06E+00	1,02E+00	1,09E+00	1,06E+00	1,16E+00	1,09E+00	1,13E+00
648,93	1,04E+00	1,09E+00	1,07E+00	1,03E+00	1,09E+00	1,06E+00	1,17E+00	1,10E+00	1,13E+00
651,43	1,05E+00	1,09E+00	1,07E+00	1,04E+00	1,10E+00	1,07E+00	1,17E+00	1,11E+00	1,14E+00
653,93	1,06E+00	1,10E+00	1,08E+00	1,04E+00	1,11E+00	1,08E+00	1,18E+00	1,11E+00	1,15E+00
656,43	1,06E+00	1,11E+00	1,09E+00	1,05E+00	1,11E+00	1,08E+00	1,19E+00	1,12E+00	1,15E+00
658,93	1,07E+00	1,12E+00	1,09E+00	1,06E+00	1,12E+00	1,09E+00	1,20E+00	1,13E+00	1,16E+00

# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
661,43	1,08E+00	1,12E+00	1,10E+00	1,06E+00	1,13E+00	1,10E+00	1,20E+00	1,13E+00	1,17E+00
663,93	1,09E+00	1,13E+00	1,11E+00	1,07E+00	1,14E+00	1,10E+00	1,21E+00	1,14E+00	1,18E+00
666,43	1,10E+00	1,14E+00	1,12E+00	1,08E+00	1,14E+00	1,11E+00	1,22E+00	1,15E+00	1,18E+00
668,93	1,10E+00	1,14E+00	1,12E+00	1,08E+00	1,15E+00	1,12E+00	1,23E+00	1,15E+00	1,19E+00
671,43	1,11E+00	1,15E+00	1,13E+00	1,09E+00	1,16E+00	1,13E+00	1,23E+00	1,16E+00	1,20E+00
673,93	1,12E+00	1,16E+00	1,14E+00	1,10E+00	1,17E+00	1,13E+00	1,24E+00	1,17E+00	1,20E+00
676,43	1,13E+00	1,16E+00	1,14E+00	1,11E+00	1,17E+00	1,14E+00	1,25E+00	1,17E+00	1,21E+00
678,93	1,13E+00	1,17E+00	1,15E+00	1,11E+00	1,18E+00	1,15E+00	1,26E+00	1,18E+00	1,22E+00
681,43	1,14E+00	1,18E+00	1,16E+00	1,12E+00	1,19E+00	1,15E+00	1,26E+00	1,19E+00	1,23E+00
683,93	1,15E+00	1,19E+00	1,17E+00	1,13E+00	1,20E+00	1,16E+00	1,27E+00	1,20E+00	1,23E+00
686,43	1,16E+00	1,19E+00	1,17E+00	1,14E+00	1,20E+00	1,17E+00	1,28E+00	1,20E+00	1,24E+00
688,93	1,16E+00	1,20E+00	1,18E+00	1,14E+00	1,21E+00	1,18E+00	1,29E+00	1,21E+00	1,25E+00
691,43	1,17E+00	1,21E+00	1,19E+00	1,15E+00	1,22E+00	1,18E+00	1,29E+00	1,22E+00	1,25E+00
693,93	1,18E+00	1,21E+00	1,20E+00	1,16E+00	1,23E+00	1,19E+00	1,30E+00	1,22E+00	1,26E+00
696,43	1,19E+00	1,22E+00	1,20E+00	1,17E+00	1,23E+00	1,20E+00	1,31E+00	1,23E+00	1,27E+00
698,93	1,20E+00	1,23E+00	1,21E+00	1,17E+00	1,24E+00	1,21E+00	1,32E+00	1,24E+00	1,28E+00
701,43	1,20E+00	1,23E+00	1,22E+00	1,18E+00	1,25E+00	1,21E+00	1,32E+00	1,25E+00	1,28E+00
703,93	1,21E+00	1,24E+00	1,23E+00	1,19E+00	1,26E+00	1,22E+00	1,33E+00	1,25E+00	1,29E+00
706,43	1,22E+00	1,25E+00	1,23E+00	1,20E+00	1,26E+00	1,23E+00	1,34E+00	1,26E+00	1,30E+00
708,93	1,22E+00	1,26E+00	1,24E+00	1,20E+00	1,27E+00	1,24E+00	1,35E+00	1,27E+00	1,31E+00
711,43	1,23E+00	1,26E+00	1,25E+00	1,21E+00	1,28E+00	1,25E+00	1,35E+00	1,27E+00	1,31E+00
713,93	1,24E+00	1,27E+00	1,25E+00	1,22E+00	1,29E+00	1,25E+00	1,36E+00	1,28E+00	1,32E+00
716,43	1,25E+00	1,28E+00	1,26E+00	1,23E+00	1,29E+00	1,26E+00	1,37E+00	1,29E+00	1,33E+00
718,93	1,25E+00	1,28E+00	1,27E+00	1,23E+00	1,30E+00	1,27E+00	1,38E+00	1,30E+00	1,34E+00
721,43	1,26E+00	1,29E+00	1,28E+00	1,24E+00	1,31E+00	1,28E+00	1,39E+00	1,30E+00	1,34E+00
723,93	1,27E+00	1,30E+00	1,28E+00	1,25E+00	1,32E+00	1,28E+00	1,39E+00	1,31E+00	1,35E+00
726,43	1,28E+00	1,31E+00	1,29E+00	1,26E+00	1,33E+00	1,29E+00	1,40E+00	1,32E+00	1,36E+00
728,93	1,28E+00	1,31E+00	1,30E+00	1,26E+00	1,33E+00	1,30E+00	1,41E+00	1,33E+00	1,37E+00
731,43	1,29E+00	1,32E+00	1,31E+00	1,27E+00	1,34E+00	1,31E+00	1,42E+00	1,33E+00	1,38E+00
733,93	1,30E+00	1,33E+00	1,31E+00	1,28E+00	1,35E+00	1,31E+00	1,43E+00	1,34E+00	1,38E+00
736,43	1,31E+00	1,33E+00	1,32E+00	1,29E+00	1,36E+00	1,32E+00	1,43E+00	1,35E+00	1,39E+00
738,93	1,32E+00	1,34E+00	1,33E+00	1,29E+00	1,37E+00	1,33E+00	1,44E+00	1,36E+00	1,40E+00
741,43	1,32E+00	1,35E+00	1,34E+00	1,30E+00	1,38E+00	1,34E+00	1,45E+00	1,37E+00	1,41E+00
743,93	1,33E+00	1,36E+00	1,34E+00	1,31E+00	1,38E+00	1,35E+00	1,46E+00	1,37E+00	1,42E+00
746,43	1,34E+00	1,36E+00	1,35E+00	1,32E+00	1,39E+00	1,36E+00	1,47E+00	1,38E+00	1,42E+00
748,93	1,35E+00	1,37E+00	1,36E+00	1,33E+00	1,40E+00	1,36E+00	1,48E+00	1,39E+00	1,43E+00
751,43	1,36E+00	1,38E+00	1,37E+00	1,33E+00	1,41E+00	1,37E+00	1,48E+00	1,40E+00	1,44E+00
753,93	1,36E+00	1,39E+00	1,38E+00	1,34E+00	1,42E+00	1,38E+00	1,49E+00	1,41E+00	1,45E+00
756,43	1,37E+00	1,39E+00	1,38E+00	1,35E+00	1,43E+00	1,39E+00	1,50E+00	1,41E+00	1,46E+00
758,93	1,38E+00	1,40E+00	1,39E+00	1,36E+00	1,43E+00	1,40E+00	1,51E+00	1,42E+00	1,47E+00
761,43	1,39E+00	1,41E+00	1,40E+00	1,37E+00	1,44E+00	1,41E+00	1,52E+00	1,43E+00	1,47E+00
763,93	1,40E+00	1,42E+00	1,41E+00	1,38E+00	1,45E+00	1,41E+00	1,53E+00	1,44E+00	1,48E+00
766,43	1,41E+00	1,43E+00	1,42E+00	1,39E+00	1,46E+00	1,42E+00	1,54E+00	1,45E+00	1,49E+00
768,93	1,41E+00	1,43E+00	1,42E+00	1,39E+00	1,47E+00	1,43E+00	1,55E+00	1,46E+00	1,50E+00
771,43	1,42E+00	1,44E+00	1,43E+00	1,40E+00	1,48E+00	1,44E+00	1,55E+00	1,46E+00	1,51E+00
773,93	1,43E+00	1,45E+00	1,44E+00	1,41E+00	1,49E+00	1,45E+00	1,56E+00	1,47E+00	1,52E+00
776,43	1,44E+00	1,46E+00	1,45E+00	1,42E+00	1,50E+00	1,46E+00	1,57E+00	1,48E+00	1,53E+00
778,93	1,45E+00	1,46E+00	1,46E+00	1,43E+00	1,50E+00	1,47E+00	1,58E+00	1,49E+00	1,54E+00
781,43	1,46E+00	1,47E+00	1,46E+00	1,44E+00	1,51E+00	1,48E+00	1,59E+00	1,50E+00	1,55E+00
783,93	1,46E+00	1,48E+00	1,47E+00	1,45E+00	1,52E+00	1,48E+00	1,60E+00	1,51E+00	1,55E+00
786,43	1,47E+00	1,49E+00	1,48E+00	1,45E+00	1,53E+00	1,49E+00	1,61E+00	1,51E+00	1,56E+00
788,93	1,48E+00	1,49E+00	1,49E+00	1,46E+00	1,54E+00	1,50E+00	1,62E+00	1,52E+00	1,57E+00
791,43	1,49E+00	1,50E+00	1,50E+00	1,47E+00	1,55E+00	1,51E+00	1,63E+00	1,53E+00	1,58E+00
793,93	1,50E+00	1,51E+00	1,50E+00	1,48E+00	1,56E+00	1,52E+00	1,64E+00	1,54E+00	1,59E+00
796,43	1,51E+00	1,52E+00	1,51E+00	1,49E+00	1,57E+00	1,53E+00	1,65E+00	1,55E+00	1,60E+00
798,93	1,52E+00	1,52E+00	1,52E+00	1,50E+00	1,58E+00	1,54E+00	1,66E+00	1,56E+00	1,61E+00
801,43	1,52E+00	1,53E+00	1,53E+00	1,50E+00	1,58E+00	1,54E+00	1,66E+00	1,57E+00	1,61E+00

Tabelle 67: Thermischer Ausdehnungskoeffizient der mit 20 Vol.-% sphärischem Porosierungsmittel porierten Probe in x-, y- und z-Richtung, gemessen in Abhängigkeit der Temperatur. Aus je 2 Werten wurde ein der Mittelwert gebildet.

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
21,43	1,94E-02	2,93E-02	2,44E-02	4,04E-02	4,69E-02	4,36E-02	-	-	-
23,93	1,16E-02	1,67E-02	1,42E-02	2,82E-02	3,49E-02	3,15E-02	-	-	-
26,43	-2,53E-03	-3,14E-02	-1,70E-02	2,53E-03	1,41E-02	8,30E-03	-	-	-
28,93	-3,16E-03	-3,28E-02	-1,80E-02	-3,95E-03	1,59E-01	7,77E-02	5,70E-03	4,90E-02	2,74E-02
31,43	7,65E-03	-2,22E-02	-7,29E-03	1,23E-02	1,97E-01	1,05E-01	1,82E-02	5,29E-02	3,55E-02
33,93	1,68E-02	-1,12E-02	2,80E-03	2,59E-02	2,21E-01	1,24E-01	2,93E-02	5,49E-02	4,21E-02
36,43	2,57E-02	-3,75E-03	1,10E-02	3,82E-02	2,40E-01	1,39E-01	3,94E-02	7,85E-02	5,89E-02
38,93	3,40E-02	4,59E-03	1,93E-02	4,95E-02	2,56E-01	1,53E-01	4,94E-02	1,05E-01	7,70E-02
41,43	4,20E-02	1,10E-02	2,65E-02	6,01E-02	2,69E-01	1,64E-01	5,89E-02	1,23E-01	9,10E-02
43,93	4,99E-02	1,76E-02	3,38E-02	7,08E-02	2,80E-01	1,75E-01	6,84E-02	1,39E-01	1,04E-01
46,43	5,71E-02	2,40E-02	4,06E-02	8,01E-02	2,88E-01	1,84E-01	7,72E-02	1,52E-01	1,15E-01
48,93	6,46E-02	2,99E-02	4,72E-02	8,96E-02	2,94E-01	1,92E-01	8,61E-02	1,63E-01	1,25E-01
51,43	7,16E-02	3,54E-02	5,35E-02	9,86E-02	2,98E-01	1,98E-01	9,47E-02	1,74E-01	1,34E-01
53,93	7,85E-02	4,08E-02	5,96E-02	1,07E-01	3,01E-01	2,04E-01	1,03E-01	1,83E-01	1,43E-01
56,43	8,52E-02	4,60E-02	6,56E-02	1,15E-01	3,02E-01	2,09E-01	1,11E-01	1,91E-01	1,51E-01
58,93	9,16E-02	5,16E-02	7,16E-02	1,23E-01	3,03E-01	2,13E-01	1,19E-01	1,98E-01	1,58E-01
61,43	9,80E-02	5,63E-02	7,72E-02	1,30E-01	3,04E-01	2,17E-01	1,26E-01	2,05E-01	1,66E-01
63,93	1,04E-01	6,04E-02	8,21E-02	1,37E-01	3,03E-01	2,20E-01	1,34E-01	2,12E-01	1,73E-01
66,43	1,10E-01	6,44E-02	8,70E-02	1,44E-01	3,01E-01	2,23E-01	1,41E-01	2,17E-01	1,79E-01
68,93	1,16E-01	6,90E-02	9,25E-02	1,51E-01	3,02E-01	2,26E-01	1,48E-01	2,21E-01	1,85E-01
71,43	1,20E-01	7,14E-02	9,55E-02	1,55E-01	3,02E-01	2,29E-01	1,53E-01	2,23E-01	1,88E-01
73,93	1,23E-01	7,32E-02	9,82E-02	1,60E-01	3,02E-01	2,31E-01	1,58E-01	2,25E-01	1,91E-01
76,43	1,27E-01	7,47E-02	1,01E-01	1,64E-01	3,00E-01	2,32E-01	1,63E-01	2,24E-01	1,94E-01
78,93	1,32E-01	7,83E-02	1,05E-01	1,68E-01	3,00E-01	2,34E-01	1,69E-01	2,26E-01	1,97E-01
81,43	1,37E-01	8,14E-02	1,09E-01	1,71E-01	2,99E-01	2,35E-01	1,74E-01	2,26E-01	2,00E-01
83,93	1,41E-01	8,32E-02	1,12E-01	1,74E-01	2,99E-01	2,36E-01	1,79E-01	2,26E-01	2,02E-01
86,43	1,44E-01	8,55E-02	1,15E-01	1,76E-01	2,99E-01	2,37E-01	1,82E-01	2,24E-01	2,03E-01
88,93	1,47E-01	8,71E-02	1,17E-01	1,78E-01	2,98E-01	2,38E-01	1,86E-01	2,24E-01	2,05E-01
91,43	1,50E-01	8,93E-02	1,20E-01	1,80E-01	2,99E-01	2,40E-01	1,90E-01	2,26E-01	2,08E-01
93,93	1,51E-01	8,90E-02	1,20E-01	1,83E-01	3,00E-01	2,41E-01	1,91E-01	2,21E-01	2,06E-01
96,43	1,54E-01	9,00E-02	1,22E-01	1,85E-01	2,95E-01	2,40E-01	1,93E-01	2,17E-01	2,05E-01
98,93	1,60E-01	9,48E-02	1,27E-01	1,86E-01	2,89E-01	2,38E-01	2,00E-01	2,16E-01	2,08E-01
101,43	1,61E-01	9,42E-02	1,27E-01	1,87E-01	2,77E-01	2,32E-01	2,01E-01	2,15E-01	2,08E-01
103,93	1,63E-01	9,54E-02	1,29E-01	1,88E-01	2,64E-01	2,26E-01	2,03E-01	2,14E-01	2,09E-01
106,43	1,65E-01	9,60E-02	1,30E-01	1,89E-01	2,48E-01	2,19E-01	2,05E-01	2,17E-01	2,11E-01
108,93	1,66E-01	9,86E-02	1,32E-01	1,90E-01	2,30E-01	2,10E-01	2,07E-01	2,19E-01	2,13E-01
111,43	1,66E-01	9,67E-02	1,31E-01	1,91E-01	2,07E-01	1,99E-01	2,07E-01	2,12E-01	2,09E-01
113,93	1,70E-01	1,00E-01	1,35E-01	1,93E-01	1,83E-01	1,88E-01	2,11E-01	1,98E-01	2,05E-01
116,43	1,75E-01	1,05E-01	1,40E-01	1,94E-01	1,68E-01	1,81E-01	2,17E-01	1,89E-01	2,03E-01
118,93	1,79E-01	1,09E-01	1,44E-01	1,95E-01	1,57E-01	1,76E-01	2,21E-01	1,84E-01	2,02E-01
121,43	1,81E-01	1,11E-01	1,46E-01	1,96E-01	1,49E-01	1,72E-01	2,22E-01	1,80E-01	2,01E-01
123,93	1,85E-01	1,13E-01	1,49E-01	1,96E-01	1,43E-01	1,70E-01	2,25E-01	1,77E-01	2,01E-01
126,43	1,86E-01	1,14E-01	1,50E-01	1,97E-01	1,38E-01	1,67E-01	2,26E-01	1,72E-01	1,99E-01
128,93	1,88E-01	1,16E-01	1,52E-01	1,97E-01	1,32E-01	1,65E-01	2,27E-01	1,70E-01	1,99E-01
131,43	1,90E-01	1,17E-01	1,54E-01	1,97E-01	1,27E-01	1,62E-01	2,28E-01	1,66E-01	1,97E-01
133,93	1,92E-01	1,18E-01	1,55E-01	1,97E-01	1,22E-01	1,59E-01	2,28E-01	1,62E-01	1,95E-01
136,43	1,94E-01	1,19E-01	1,56E-01	1,97E-01	1,18E-01	1,58E-01	2,29E-01	1,50E-01	1,90E-01
138,93	1,96E-01	1,20E-01	1,58E-01	1,98E-01	1,14E-01	1,56E-01	2,31E-01	1,47E-01	1,89E-01
141,43	1,97E-01	1,20E-01	1,58E-01	1,97E-01	1,10E-01	1,53E-01	2,31E-01	1,44E-01	1,87E-01
143,93	1,98E-01	1,21E-01	1,60E-01	1,98E-01	1,07E-01	1,52E-01	2,31E-01	1,40E-01	1,86E-01
146,43	1,99E-01	1,22E-01	1,60E-01	1,97E-01	1,03E-01	1,50E-01	2,31E-01	1,31E-01	1,81E-01
148,93	2,01E-01	1,23E-01	1,62E-01	1,98E-01	9,84E-02	1,48E-01	2,32E-01	1,27E-01	1,80E-01
151,43	2,01E-01	1,26E-01	1,64E-01	1,97E-01	9,45E-02	1,46E-01	2,32E-01	1,25E-01	1,78E-01
153,93	2,02E-01	1,27E-01	1,64E-01	1,97E-01	9,18E-02	1,44E-01	2,33E-01	1,23E-01	1,78E-01
156,43	2,03E-01	1,27E-01	1,65E-01	1,97E-01	8,95E-02	1,43E-01	2,33E-01	1,22E-01	1,77E-01
158,93	2,03E-01	1,28E-01	1,66E-01	1,97E-01	8,74E-02	1,42E-01	2,33E-01	1,20E-01	1,76E-01
161,43	2,03E-01	1,29E-01	1,66E-01	1,97E-01	8,53E-02	1,41E-01	2,33E-01	1,18E-01	1,75E-01
163,93	2,04E-01	1,29E-01	1,66E-01	1,97E-01	8,40E-02	1,41E-01	2,34E-01	1,16E-01	1,75E-01
166,43	2,04E-01	1,30E-01	1,67E-01	1,98E-01	8,32E-02	1,41E-01	2,34E-01	1,15E-01	1,74E-01

# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
168,93	2,05E-01	1,31E-01	1,68E-01	1,98E-01	8,31E-02	1,41E-01	2,34E-01	1,14E-01	1,74E-01
171,43	2,04E-01	1,31E-01	1,68E-01	1,98E-01	8,28E-02	1,40E-01	2,35E-01	1,11E-01	1,73E-01
173,93	2,04E-01	1,31E-01	1,68E-01	1,98E-01	8,26E-02	1,40E-01	2,35E-01	1,09E-01	1,72E-01
176,43	2,05E-01	1,34E-01	1,70E-01	1,99E-01	8,33E-02	1,41E-01	2,36E-01	1,08E-01	1,72E-01
178,93	2,05E-01	1,35E-01	1,70E-01	2,00E-01	8,42E-02	1,42E-01	2,36E-01	1,06E-01	1,71E-01
181,43	2,06E-01	1,35E-01	1,71E-01	2,01E-01	8,54E-02	1,43E-01	2,37E-01	1,04E-01	1,71E-01
183,93	2,07E-01	1,34E-01	1,70E-01	2,00E-01	8,64E-02	1,43E-01	2,37E-01	1,02E-01	1,70E-01
186,43	2,07E-01	1,35E-01	1,71E-01	2,01E-01	8,83E-02	1,45E-01	2,39E-01	1,02E-01	1,70E-01
188,93	2,08E-01	1,37E-01	1,73E-01	2,03E-01	9,08E-02	1,47E-01	2,40E-01	1,02E-01	1,71E-01
191,43	2,09E-01	1,37E-01	1,73E-01	2,04E-01	9,29E-02	1,48E-01	2,41E-01	1,02E-01	1,71E-01
193,93	2,10E-01	1,38E-01	1,74E-01	2,04E-01	9,51E-02	1,50E-01	2,42E-01	1,02E-01	1,72E-01
196,43	2,09E-01	1,38E-01	1,74E-01	2,05E-01	9,61E-02	1,50E-01	2,42E-01	1,02E-01	1,72E-01
198,93	2,10E-01	1,39E-01	1,75E-01	2,06E-01	9,96E-02	1,53E-01	2,44E-01	1,03E-01	1,73E-01
201,43	2,11E-01	1,40E-01	1,76E-01	2,07E-01	1,00E-01	1,54E-01	2,45E-01	1,03E-01	1,74E-01
203,93	2,13E-01	1,43E-01	1,78E-01	2,10E-01	1,05E-01	1,57E-01	2,47E-01	1,05E-01	1,76E-01
206,43	2,14E-01	1,43E-01	1,79E-01	2,11E-01	1,07E-01	1,59E-01	2,48E-01	1,06E-01	1,77E-01
208,93	2,16E-01	1,44E-01	1,80E-01	2,13E-01	1,10E-01	1,61E-01	2,50E-01	1,06E-01	1,78E-01
211,43	2,17E-01	1,46E-01	1,82E-01	2,15E-01	1,14E-01	1,65E-01	2,52E-01	1,08E-01	1,80E-01
213,93	2,19E-01	1,48E-01	1,83E-01	2,17E-01	1,18E-01	1,67E-01	2,54E-01	1,09E-01	1,82E-01
216,43	2,20E-01	1,49E-01	1,84E-01	2,18E-01	1,21E-01	1,69E-01	2,56E-01	1,10E-01	1,83E-01
218,93	2,22E-01	1,51E-01	1,87E-01	2,21E-01	1,24E-01	1,73E-01	2,58E-01	1,11E-01	1,85E-01
221,43	2,24E-01	1,53E-01	1,88E-01	2,23E-01	1,27E-01	1,75E-01	2,60E-01	1,13E-01	1,86E-01
223,93	2,26E-01	1,55E-01	1,91E-01	2,26E-01	1,31E-01	1,78E-01	2,62E-01	1,15E-01	1,89E-01
226,43	2,29E-01	1,58E-01	1,93E-01	2,28E-01	1,35E-01	1,81E-01	2,65E-01	1,16E-01	1,91E-01
228,93	2,32E-01	1,61E-01	1,96E-01	2,31E-01	1,39E-01	1,85E-01	2,68E-01	1,18E-01	1,93E-01
231,43	2,34E-01	1,63E-01	1,98E-01	2,33E-01	1,42E-01	1,88E-01	2,70E-01	1,19E-01	1,95E-01
233,93	2,36E-01	1,65E-01	2,00E-01	2,35E-01	1,46E-01	1,91E-01	2,73E-01	1,20E-01	1,97E-01
236,43	2,39E-01	1,67E-01	2,03E-01	2,38E-01	1,50E-01	1,94E-01	2,76E-01	1,23E-01	1,99E-01
238,93	2,41E-01	1,69E-01	2,05E-01	2,41E-01	1,53E-01	1,97E-01	2,78E-01	1,24E-01	2,01E-01
241,43	2,43E-01	1,72E-01	2,07E-01	2,44E-01	1,56E-01	2,00E-01	2,81E-01	1,26E-01	2,03E-01
243,93	2,46E-01	1,77E-01	2,11E-01	2,46E-01	1,61E-01	2,04E-01	2,84E-01	1,28E-01	2,06E-01
246,43	2,48E-01	1,79E-01	2,14E-01	2,50E-01	1,64E-01	2,07E-01	2,87E-01	1,29E-01	2,08E-01
248,93	2,50E-01	1,82E-01	2,16E-01	2,53E-01	1,69E-01	2,11E-01	2,91E-01	1,32E-01	2,11E-01
251,43	2,53E-01	1,84E-01	2,19E-01	2,56E-01	1,73E-01	2,14E-01	2,94E-01	1,34E-01	2,14E-01
253,93	2,56E-01	1,87E-01	2,22E-01	2,59E-01	1,77E-01	2,18E-01	2,97E-01	1,37E-01	2,17E-01
256,43	2,59E-01	1,90E-01	2,25E-01	2,63E-01	1,81E-01	2,22E-01	3,00E-01	1,39E-01	2,20E-01
258,93	2,62E-01	1,93E-01	2,28E-01	2,66E-01	1,84E-01	2,25E-01	3,03E-01	1,42E-01	2,23E-01
261,43	2,65E-01	1,96E-01	2,30E-01	2,69E-01	1,87E-01	2,28E-01	3,06E-01	1,44E-01	2,25E-01
263,93	2,68E-01	2,01E-01	2,35E-01	2,73E-01	1,90E-01	2,32E-01	3,11E-01	1,47E-01	2,29E-01
266,43	2,71E-01	2,03E-01	2,37E-01	2,76E-01	1,93E-01	2,34E-01	3,13E-01	1,49E-01	2,31E-01
268,93	2,74E-01	2,07E-01	2,41E-01	2,80E-01	1,95E-01	2,37E-01	3,18E-01	1,53E-01	2,35E-01
271,43	2,78E-01	2,10E-01	2,44E-01	2,84E-01	1,97E-01	2,40E-01	3,22E-01	1,56E-01	2,39E-01
273,93	2,82E-01	2,14E-01	2,48E-01	2,88E-01	2,00E-01	2,44E-01	3,26E-01	1,59E-01	2,42E-01
276,43	2,86E-01	2,18E-01	2,52E-01	2,91E-01	2,02E-01	2,47E-01	3,29E-01	1,62E-01	2,46E-01
278,93	2,89E-01	2,21E-01	2,55E-01	2,95E-01	2,05E-01	2,50E-01	3,33E-01	1,65E-01	2,49E-01
281,43	2,93E-01	2,25E-01	2,59E-01	2,99E-01	2,08E-01	2,53E-01	3,37E-01	1,68E-01	2,52E-01
283,93	2,97E-01	2,29E-01	2,63E-01	3,03E-01	2,11E-01	2,57E-01	3,41E-01	1,71E-01	2,56E-01
286,43	3,01E-01	2,33E-01	2,67E-01	3,07E-01	2,14E-01	2,60E-01	3,45E-01	1,74E-01	2,60E-01
288,93	3,05E-01	2,37E-01	2,71E-01	3,11E-01	2,16E-01	2,63E-01	3,49E-01	1,78E-01	2,63E-01
291,43	3,08E-01	2,40E-01	2,74E-01	3,14E-01	2,19E-01	2,66E-01	3,53E-01	1,79E-01	2,66E-01
293,93	3,12E-01	2,44E-01	2,78E-01	3,18E-01	2,22E-01	2,70E-01	3,56E-01	1,83E-01	2,69E-01
296,43	3,17E-01	2,48E-01	2,82E-01	3,23E-01	2,26E-01	2,74E-01	3,61E-01	1,87E-01	2,74E-01
298,93	3,20E-01	2,53E-01	2,87E-01	3,27E-01	2,29E-01	2,78E-01	3,66E-01	1,90E-01	2,78E-01
301,43	3,24E-01	2,57E-01	2,90E-01	3,31E-01	2,33E-01	2,82E-01	3,70E-01	1,93E-01	2,81E-01
303,93	3,26E-01	2,61E-01	2,94E-01	3,35E-01	2,36E-01	2,85E-01	3,74E-01	1,96E-01	2,85E-01
306,43	3,30E-01	2,65E-01	2,98E-01	3,39E-01	2,40E-01	2,90E-01	3,78E-01	2,00E-01	2,89E-01
308,93	3,34E-01	2,69E-01	3,02E-01	3,43E-01	2,43E-01	2,93E-01	3,82E-01	2,03E-01	2,93E-01
311,43	3,39E-01	2,74E-01	3,06E-01	3,47E-01	2,47E-01	2,97E-01	3,87E-01	2,07E-01	2,97E-01
313,93	3,42E-01	2,77E-01	3,10E-01	3,51E-01	2,50E-01	3,01E-01	3,90E-01	2,10E-01	3,00E-01
316,43	3,47E-01	2,82E-01	3,15E-01	3,56E-01	2,55E-01	3,05E-01	3,95E-01	2,15E-01	3,05E-01
318,93	3,51E-01	2,86E-01	3,19E-01	3,60E-01	2,59E-01	3,09E-01	3,99E-01	2,18E-01	3,09E-01
321,43	3,55E-01	2,91E-01	3,23E-01	3,64E-01	2,63E-01	3,13E-01	4,04E-01	2,23E-01	3,13E-01
323,93	3,60E-01	2,97E-01	3,28E-01	3,68E-01	2,66E-01	3,17E-01	4,08E-01	2,26E-01	3,17E-01
326,43	3,64E-01	3,04E-01	3,34E-01	3,73E-01	2,70E-01	3,21E-01	4,13E-01	2,30E-01	3,21E-01
328,93	3,69E-01	3,09E-01	3,39E-01	3,77E-01	2,74E-01	3,25E-01	4,17E-01	2,34E-01	3,26E-01

# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
331,43	3,73E-01	3,15E-01	3,44E-01	3,81E-01	2,78E-01	3,30E-01	4,22E-01	2,38E-01	3,30E-01
333,93	3,78E-01	3,20E-01	3,49E-01	3,86E-01	2,82E-01	3,34E-01	4,26E-01	2,43E-01	3,35E-01
336,43	3,82E-01	3,24E-01	3,53E-01	3,89E-01	2,85E-01	3,37E-01	4,30E-01	2,46E-01	3,38E-01
338,93	3,87E-01	3,29E-01	3,58E-01	3,94E-01	2,89E-01	3,42E-01	4,35E-01	2,51E-01	3,43E-01
341,43	3,91E-01	3,33E-01	3,62E-01	3,99E-01	2,94E-01	3,46E-01	4,41E-01	2,56E-01	3,48E-01
343,93	3,96E-01	3,38E-01	3,67E-01	4,04E-01	2,99E-01	3,51E-01	4,46E-01	2,62E-01	3,54E-01
346,43	4,00E-01	3,43E-01	3,72E-01	4,09E-01	3,02E-01	3,55E-01	4,51E-01	2,66E-01	3,59E-01
348,93	4,05E-01	3,47E-01	3,76E-01	4,13E-01	3,06E-01	3,60E-01	4,56E-01	2,71E-01	3,63E-01
351,43	4,10E-01	3,53E-01	3,81E-01	4,18E-01	3,11E-01	3,64E-01	4,61E-01	2,77E-01	3,69E-01
353,93	4,15E-01	3,58E-01	3,86E-01	4,22E-01	3,15E-01	3,69E-01	4,66E-01	2,81E-01	3,74E-01
356,43	4,19E-01	3,62E-01	3,91E-01	4,26E-01	3,19E-01	3,73E-01	4,70E-01	2,86E-01	3,78E-01
358,93	4,24E-01	3,67E-01	3,96E-01	4,31E-01	3,23E-01	3,77E-01	4,75E-01	2,91E-01	3,83E-01
361,43	4,30E-01	3,73E-01	4,02E-01	4,36E-01	3,27E-01	3,82E-01	4,80E-01	2,97E-01	3,89E-01
363,93	4,35E-01	3,78E-01	4,07E-01	4,40E-01	3,32E-01	3,86E-01	4,85E-01	3,01E-01	3,93E-01
366,43	4,40E-01	3,82E-01	4,11E-01	4,44E-01	3,36E-01	3,90E-01	4,90E-01	3,06E-01	3,98E-01
368,93	4,46E-01	3,87E-01	4,16E-01	4,49E-01	3,40E-01	3,95E-01	4,95E-01	3,11E-01	4,03E-01
371,43	4,51E-01	3,92E-01	4,21E-01	4,54E-01	3,44E-01	3,99E-01	5,00E-01	3,15E-01	4,08E-01
373,93	4,56E-01	3,97E-01	4,27E-01	4,59E-01	3,49E-01	4,04E-01	5,06E-01	3,20E-01	4,13E-01
376,43	4,61E-01	4,01E-01	4,31E-01	4,63E-01	3,53E-01	4,08E-01	5,10E-01	3,25E-01	4,18E-01
378,93	4,67E-01	4,07E-01	4,37E-01	4,68E-01	3,58E-01	4,13E-01	5,16E-01	3,30E-01	4,23E-01
381,43	4,72E-01	4,12E-01	4,42E-01	4,73E-01	3,62E-01	4,18E-01	5,20E-01	3,35E-01	4,27E-01
383,93	4,78E-01	4,16E-01	4,47E-01	4,78E-01	3,67E-01	4,22E-01	5,25E-01	3,40E-01	4,33E-01
386,43	4,84E-01	4,21E-01	4,52E-01	4,82E-01	3,71E-01	4,27E-01	5,30E-01	3,45E-01	4,38E-01
388,93	4,89E-01	4,25E-01	4,57E-01	4,87E-01	3,76E-01	4,31E-01	5,36E-01	3,50E-01	4,43E-01
391,43	4,95E-01	4,30E-01	4,63E-01	4,93E-01	3,81E-01	4,37E-01	5,41E-01	3,56E-01	4,48E-01
393,93	5,01E-01	4,35E-01	4,68E-01	4,98E-01	3,86E-01	4,42E-01	5,47E-01	3,61E-01	4,54E-01
396,43	5,07E-01	4,40E-01	4,74E-01	5,03E-01	3,90E-01	4,46E-01	5,52E-01	3,67E-01	4,59E-01
398,93	5,13E-01	4,46E-01	4,80E-01	5,08E-01	3,95E-01	4,52E-01	5,58E-01	3,72E-01	4,65E-01
401,43	5,19E-01	4,52E-01	4,85E-01	5,14E-01	4,00E-01	4,57E-01	5,64E-01	3,78E-01	4,71E-01
403,93	5,25E-01	4,61E-01	4,93E-01	5,19E-01	4,05E-01	4,62E-01	5,70E-01	3,83E-01	4,76E-01
406,43	5,31E-01	4,68E-01	4,99E-01	5,25E-01	4,11E-01	4,68E-01	5,76E-01	3,89E-01	4,82E-01
408,93	5,37E-01	4,73E-01	5,05E-01	5,30E-01	4,15E-01	4,72E-01	5,81E-01	3,94E-01	4,87E-01
411,43	5,43E-01	4,79E-01	5,11E-01	5,35E-01	4,20E-01	4,78E-01	5,87E-01	3,99E-01	4,93E-01
413,93	5,50E-01	4,84E-01	5,17E-01	5,42E-01	4,26E-01	4,84E-01	5,93E-01	4,06E-01	4,99E-01
416,43	5,56E-01	4,90E-01	5,23E-01	5,47E-01	4,31E-01	4,89E-01	5,99E-01	4,12E-01	5,06E-01
418,93	5,62E-01	4,95E-01	5,28E-01	5,53E-01	4,36E-01	4,95E-01	6,05E-01	4,17E-01	5,11E-01
421,43	5,68E-01	5,01E-01	5,35E-01	5,59E-01	4,41E-01	5,00E-01	6,11E-01	4,24E-01	5,17E-01
423,93	5,75E-01	5,06E-01	5,41E-01	5,64E-01	4,47E-01	5,06E-01	6,17E-01	4,30E-01	5,23E-01
426,43	5,81E-01	5,13E-01	5,47E-01	5,70E-01	4,52E-01	5,11E-01	6,23E-01	4,36E-01	5,30E-01
428,93	5,88E-01	5,19E-01	5,53E-01	5,76E-01	4,58E-01	5,17E-01	6,29E-01	4,43E-01	5,36E-01
431,43	5,95E-01	5,26E-01	5,60E-01	5,82E-01	4,63E-01	5,23E-01	6,36E-01	4,50E-01	5,43E-01
433,93	6,01E-01	5,33E-01	5,67E-01	5,88E-01	4,69E-01	5,29E-01	6,42E-01	4,56E-01	5,49E-01
436,43	6,07E-01	5,39E-01	5,73E-01	5,94E-01	4,74E-01	5,34E-01	6,48E-01	4,62E-01	5,55E-01
438,93	6,13E-01	5,45E-01	5,79E-01	6,00E-01	4,80E-01	5,40E-01	6,54E-01	4,69E-01	5,61E-01
441,43	6,20E-01	5,53E-01	5,86E-01	6,07E-01	4,86E-01	5,46E-01	6,61E-01	4,74E-01	5,67E-01
443,93	6,26E-01	5,60E-01	5,93E-01	6,13E-01	4,91E-01	5,52E-01	6,67E-01	4,80E-01	5,74E-01
446,43	6,32E-01	5,66E-01	5,99E-01	6,19E-01	4,97E-01	5,58E-01	6,73E-01	4,86E-01	5,80E-01
448,93	6,39E-01	5,72E-01	6,06E-01	6,25E-01	5,03E-01	5,64E-01	6,80E-01	4,93E-01	5,86E-01
451,43	6,45E-01	5,78E-01	6,12E-01	6,32E-01	5,09E-01	5,70E-01	6,86E-01	4,99E-01	5,93E-01
453,93	6,52E-01	5,84E-01	6,18E-01	6,38E-01	5,15E-01	5,77E-01	6,93E-01	5,06E-01	5,99E-01
456,43	6,59E-01	5,90E-01	6,25E-01	6,45E-01	5,21E-01	5,83E-01	7,00E-01	5,13E-01	6,06E-01
458,93	6,65E-01	5,96E-01	6,31E-01	6,51E-01	5,27E-01	5,89E-01	7,06E-01	5,20E-01	6,13E-01
461,43	6,72E-01	6,03E-01	6,38E-01	6,58E-01	5,33E-01	5,95E-01	7,13E-01	5,27E-01	6,20E-01
463,93	6,78E-01	6,10E-01	6,44E-01	6,64E-01	5,39E-01	6,01E-01	7,20E-01	5,34E-01	6,27E-01
466,43	6,84E-01	6,16E-01	6,50E-01	6,68E-01	5,42E-01	6,05E-01	7,24E-01	5,39E-01	6,31E-01
468,93	6,91E-01	6,23E-01	6,57E-01	6,75E-01	5,48E-01	6,12E-01	7,31E-01	5,44E-01	6,37E-01
471,43	6,98E-01	6,30E-01	6,64E-01	6,82E-01	5,55E-01	6,18E-01	7,38E-01	5,50E-01	6,44E-01
473,93	7,04E-01	6,37E-01	6,71E-01	6,88E-01	5,61E-01	6,25E-01	7,45E-01	5,56E-01	6,51E-01
476,43	7,11E-01	6,44E-01	6,78E-01	6,95E-01	5,68E-01	6,32E-01	7,52E-01	5,64E-01	6,58E-01
478,93	7,17E-01	6,50E-01	6,84E-01	7,02E-01	5,74E-01	6,38E-01	7,59E-01	5,70E-01	6,65E-01
481,43	7,24E-01	6,57E-01	6,91E-01	7,09E-01	5,80E-01	6,45E-01	7,66E-01	5,77E-01	6,72E-01
483,93	7,31E-01	6,64E-01	6,97E-01	7,16E-01	5,87E-01	6,51E-01	7,73E-01	5,83E-01	6,78E-01
486,43	7,37E-01	6,70E-01	7,04E-01	7,22E-01	5,93E-01	6,58E-01	7,80E-01	5,90E-01	6,85E-01
488,93	7,44E-01	6,77E-01	7,11E-01	7,29E-01	6,00E-01	6,65E-01	7,88E-01	5,96E-01	6,92E-01
491,43	7,51E-01	6,84E-01	7,17E-01	7,36E-01	6,06E-01	6,71E-01	7,95E-01	6,03E-01	6,99E-01



# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
493,93	7,58E-01	6,91E-01	7,24E-01	7,43E-01	6,13E-01	6,78E-01	8,02E-01	6,10E-01	7,06E-01
496,43	7,64E-01	6,99E-01	7,31E-01	7,50E-01	6,19E-01	6,84E-01	8,09E-01	6,16E-01	7,12E-01
498,93	7,71E-01	7,06E-01	7,38E-01	7,57E-01	6,26E-01	6,91E-01	8,16E-01	6,23E-01	7,20E-01
501,43	7,78E-01	7,13E-01	7,46E-01	7,64E-01	6,33E-01	6,99E-01	8,24E-01	6,31E-01	7,27E-01
503,93	7,85E-01	7,20E-01	7,52E-01	7,71E-01	6,39E-01	7,05E-01	8,31E-01	6,37E-01	7,34E-01
506,43	7,92E-01	7,27E-01	7,60E-01	7,79E-01	6,46E-01	7,13E-01	8,39E-01	6,44E-01	7,42E-01
508,93	7,99E-01	7,35E-01	7,67E-01	7,86E-01	6,53E-01	7,20E-01	8,47E-01	6,51E-01	7,49E-01
511,43	8,06E-01	7,42E-01	7,74E-01	7,93E-01	6,60E-01	7,27E-01	8,54E-01	6,58E-01	7,56E-01
513,93	8,13E-01	7,49E-01	7,81E-01	8,00E-01	6,67E-01	7,34E-01	8,61E-01	6,65E-01	7,63E-01
516,43	8,20E-01	7,57E-01	7,88E-01	8,08E-01	6,74E-01	7,41E-01	8,69E-01	6,73E-01	7,71E-01
518,93	8,27E-01	7,64E-01	7,96E-01	8,15E-01	6,81E-01	7,48E-01	8,77E-01	6,81E-01	7,79E-01
521,43	8,35E-01	7,72E-01	8,04E-01	8,23E-01	6,89E-01	7,56E-01	8,85E-01	6,88E-01	7,86E-01
523,93	8,42E-01	7,80E-01	8,11E-01	8,31E-01	6,96E-01	7,64E-01	8,93E-01	6,95E-01	7,94E-01
526,43	8,50E-01	7,88E-01	8,19E-01	8,38E-01	7,03E-01	7,71E-01	9,01E-01	6,86E-01	7,94E-01
528,93	8,58E-01	7,96E-01	8,27E-01	8,46E-01	7,11E-01	7,79E-01	9,09E-01	6,96E-01	8,03E-01
531,43	8,66E-01	8,05E-01	8,36E-01	8,55E-01	7,20E-01	7,88E-01	9,19E-01	7,05E-01	8,12E-01
533,93	8,74E-01	8,14E-01	8,44E-01	8,64E-01	7,29E-01	7,96E-01	9,29E-01	7,13E-01	8,21E-01
536,43	8,83E-01	8,24E-01	8,53E-01	8,73E-01	7,37E-01	8,05E-01	9,38E-01	7,22E-01	8,30E-01
538,93	8,92E-01	8,33E-01	8,63E-01	8,82E-01	7,46E-01	8,14E-01	9,48E-01	7,32E-01	8,40E-01
541,43	9,01E-01	8,42E-01	8,71E-01	8,91E-01	7,54E-01	8,23E-01	9,58E-01	7,42E-01	8,50E-01
543,93	9,10E-01	8,52E-01	8,81E-01	9,01E-01	7,64E-01	8,32E-01	9,68E-01	7,51E-01	8,59E-01
546,43	9,18E-01	8,61E-01	8,90E-01	9,10E-01	7,72E-01	8,41E-01	9,77E-01	7,60E-01	8,69E-01
548,93	9,27E-01	8,70E-01	8,99E-01	9,20E-01	7,81E-01	8,50E-01	9,87E-01	7,71E-01	8,79E-01
551,43	9,36E-01	8,79E-01	9,07E-01	9,29E-01	7,89E-01	8,59E-01	9,96E-01	7,80E-01	8,88E-01
553,93	9,44E-01	8,87E-01	9,16E-01	9,38E-01	7,98E-01	8,68E-01	1,01E+00	7,90E-01	8,98E-01
556,43	9,52E-01	8,95E-01	9,24E-01	9,47E-01	8,06E-01	8,76E-01	1,01E+00	8,00E-01	9,07E-01
558,93	9,60E-01	9,03E-01	9,31E-01	9,55E-01	8,13E-01	8,84E-01	1,02E+00	8,09E-01	9,16E-01
561,43	9,68E-01	9,11E-01	9,40E-01	9,64E-01	8,21E-01	8,93E-01	1,03E+00	8,18E-01	9,25E-01
563,93	9,75E-01	9,19E-01	9,47E-01	9,72E-01	8,29E-01	9,01E-01	1,04E+00	8,27E-01	9,33E-01
566,43	9,83E-01	9,28E-01	9,56E-01	9,81E-01	8,37E-01	9,09E-01	1,05E+00	8,36E-01	9,42E-01
568,93	9,90E-01	9,35E-01	9,63E-01	9,89E-01	8,44E-01	9,16E-01	1,06E+00	8,44E-01	9,50E-01
571,43	9,98E-01	9,44E-01	9,71E-01	9,97E-01	8,51E-01	9,24E-01	1,06E+00	8,52E-01	9,58E-01
573,93	1,01E+00	9,53E-01	9,79E-01	1,00E+00	8,58E-01	9,31E-01	1,07E+00	8,60E-01	9,66E-01
576,43	1,01E+00	9,62E-01	9,87E-01	1,01E+00	8,65E-01	9,39E-01	1,08E+00	8,68E-01	9,74E-01
578,93	1,02E+00	9,69E-01	9,95E-01	1,02E+00	8,72E-01	9,46E-01	1,09E+00	8,76E-01	9,82E-01
581,43	1,03E+00	9,77E-01	1,00E+00	1,03E+00	8,78E-01	9,53E-01	1,10E+00	8,84E-01	9,90E-01
583,93	1,03E+00	9,85E-01	1,01E+00	1,04E+00	8,86E-01	9,61E-01	1,10E+00	8,92E-01	9,98E-01
586,43	1,04E+00	9,92E-01	1,02E+00	1,04E+00	8,92E-01	9,68E-01	1,11E+00	8,99E-01	1,00E+00
588,93	1,05E+00	1,00E+00	1,02E+00	1,05E+00	8,99E-01	9,75E-01	1,12E+00	9,06E-01	1,01E+00
591,43	1,06E+00	1,01E+00	1,03E+00	1,06E+00	9,05E-01	9,82E-01	1,13E+00	9,13E-01	1,02E+00
593,93	1,06E+00	1,01E+00	1,04E+00	1,07E+00	9,12E-01	9,89E-01	1,13E+00	9,20E-01	1,03E+00
596,43	1,07E+00	1,02E+00	1,05E+00	1,07E+00	9,18E-01	9,96E-01	1,14E+00	9,28E-01	1,03E+00
598,93	1,08E+00	1,03E+00	1,05E+00	1,08E+00	9,25E-01	1,00E+00	1,15E+00	9,35E-01	1,04E+00
601,43	1,08E+00	1,03E+00	1,06E+00	1,09E+00	9,31E-01	1,01E+00	1,16E+00	9,41E-01	1,05E+00
603,93	1,09E+00	1,04E+00	1,07E+00	1,10E+00	9,38E-01	1,02E+00	1,16E+00	9,49E-01	1,06E+00
606,43	1,10E+00	1,05E+00	1,07E+00	1,10E+00	9,45E-01	1,02E+00	1,17E+00	9,56E-01	1,06E+00
608,93	1,11E+00	1,06E+00	1,08E+00	1,11E+00	9,52E-01	1,03E+00	1,18E+00	9,64E-01	1,07E+00
611,43	1,11E+00	1,06E+00	1,09E+00	1,12E+00	9,59E-01	1,04E+00	1,19E+00	9,71E-01	1,08E+00
613,93	1,12E+00	1,07E+00	1,10E+00	1,13E+00	9,66E-01	1,05E+00	1,20E+00	9,78E-01	1,09E+00
616,43	1,13E+00	1,08E+00	1,10E+00	1,13E+00	9,74E-01	1,05E+00	1,20E+00	9,85E-01	1,09E+00
618,93	1,14E+00	1,09E+00	1,11E+00	1,14E+00	9,81E-01	1,06E+00	1,21E+00	9,93E-01	1,10E+00
621,43	1,14E+00	1,09E+00	1,12E+00	1,15E+00	9,88E-01	1,07E+00	1,22E+00	1,00E+00	1,11E+00
623,93	1,15E+00	1,10E+00	1,13E+00	1,16E+00	9,95E-01	1,08E+00	1,23E+00	1,01E+00	1,12E+00
626,43	1,16E+00	1,11E+00	1,13E+00	1,16E+00	1,00E+00	1,08E+00	1,23E+00	1,01E+00	1,12E+00
628,93	1,17E+00	1,12E+00	1,14E+00	1,17E+00	1,01E+00	1,09E+00	1,24E+00	1,02E+00	1,13E+00
631,43	1,17E+00	1,12E+00	1,15E+00	1,18E+00	1,02E+00	1,10E+00	1,25E+00	1,03E+00	1,14E+00
633,93	1,18E+00	1,13E+00	1,15E+00	1,19E+00	1,02E+00	1,11E+00	1,26E+00	1,03E+00	1,15E+00
636,43	1,19E+00	1,14E+00	1,16E+00	1,19E+00	1,03E+00	1,11E+00	1,26E+00	1,01E+00	1,14E+00
638,93	1,19E+00	1,14E+00	1,17E+00	1,20E+00	1,04E+00	1,12E+00	1,27E+00	1,02E+00	1,15E+00
641,43	1,20E+00	1,15E+00	1,18E+00	1,21E+00	1,04E+00	1,13E+00	1,28E+00	1,03E+00	1,15E+00
643,93	1,21E+00	1,16E+00	1,18E+00	1,22E+00	1,05E+00	1,13E+00	1,29E+00	1,04E+00	1,16E+00
646,43	1,22E+00	1,17E+00	1,19E+00	1,23E+00	1,06E+00	1,14E+00	1,30E+00	1,04E+00	1,17E+00
648,93	1,22E+00	1,17E+00	1,20E+00	1,23E+00	1,06E+00	1,15E+00	1,30E+00	1,05E+00	1,18E+00
651,43	1,23E+00	1,18E+00	1,21E+00	1,24E+00	1,07E+00	1,16E+00	1,31E+00	1,06E+00	1,18E+00
653,93	1,24E+00	1,19E+00	1,21E+00	1,25E+00	1,08E+00	1,16E+00	1,32E+00	1,07E+00	1,19E+00

# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
656,43	1,25E+00	1,20E+00	1,22E+00	1,26E+00	1,09E+00	1,17E+00	1,33E+00	1,07E+00	1,20E+00
658,93	1,25E+00	1,20E+00	1,23E+00	1,26E+00	1,09E+00	1,18E+00	1,33E+00	1,08E+00	1,21E+00
661,43	1,26E+00	1,21E+00	1,24E+00	1,27E+00	1,10E+00	1,19E+00	1,34E+00	1,09E+00	1,22E+00
663,93	1,27E+00	1,22E+00	1,24E+00	1,28E+00	1,11E+00	1,19E+00	1,35E+00	1,10E+00	1,22E+00
666,43	1,28E+00	1,22E+00	1,25E+00	1,29E+00	1,12E+00	1,20E+00	1,36E+00	1,10E+00	1,23E+00
668,93	1,29E+00	1,23E+00	1,26E+00	1,29E+00	1,12E+00	1,21E+00	1,37E+00	1,11E+00	1,24E+00
671,43	1,29E+00	1,24E+00	1,27E+00	1,30E+00	1,13E+00	1,22E+00	1,37E+00	1,12E+00	1,25E+00
673,93	1,30E+00	1,25E+00	1,27E+00	1,31E+00	1,14E+00	1,22E+00	1,38E+00	1,13E+00	1,25E+00
676,43	1,31E+00	1,26E+00	1,28E+00	1,32E+00	1,15E+00	1,23E+00	1,39E+00	1,13E+00	1,26E+00
678,93	1,32E+00	1,26E+00	1,29E+00	1,33E+00	1,15E+00	1,24E+00	1,40E+00	1,14E+00	1,27E+00
681,43	1,33E+00	1,27E+00	1,30E+00	1,33E+00	1,16E+00	1,25E+00	1,41E+00	1,15E+00	1,28E+00
683,93	1,33E+00	1,28E+00	1,31E+00	1,34E+00	1,17E+00	1,26E+00	1,41E+00	1,16E+00	1,29E+00
686,43	1,34E+00	1,29E+00	1,31E+00	1,35E+00	1,18E+00	1,26E+00	1,42E+00	1,17E+00	1,29E+00
688,93	1,35E+00	1,29E+00	1,32E+00	1,36E+00	1,18E+00	1,27E+00	1,43E+00	1,17E+00	1,30E+00
691,43	1,36E+00	1,30E+00	1,33E+00	1,37E+00	1,19E+00	1,28E+00	1,44E+00	1,18E+00	1,31E+00
693,93	1,37E+00	1,31E+00	1,34E+00	1,37E+00	1,20E+00	1,29E+00	1,45E+00	1,19E+00	1,32E+00
696,43	1,37E+00	1,32E+00	1,35E+00	1,38E+00	1,20E+00	1,29E+00	1,46E+00	1,20E+00	1,33E+00
698,93	1,38E+00	1,33E+00	1,35E+00	1,39E+00	1,21E+00	1,30E+00	1,46E+00	1,21E+00	1,34E+00
701,43	1,39E+00	1,33E+00	1,36E+00	1,40E+00	1,22E+00	1,31E+00	1,47E+00	1,21E+00	1,34E+00
703,93	1,40E+00	1,34E+00	1,37E+00	1,41E+00	1,23E+00	1,32E+00	1,48E+00	1,22E+00	1,35E+00
706,43	1,40E+00	1,35E+00	1,38E+00	1,42E+00	1,24E+00	1,33E+00	1,49E+00	1,23E+00	1,36E+00
708,93	1,41E+00	1,36E+00	1,38E+00	1,42E+00	1,24E+00	1,33E+00	1,50E+00	1,24E+00	1,37E+00
711,43	1,42E+00	1,36E+00	1,39E+00	1,43E+00	1,25E+00	1,34E+00	1,51E+00	1,25E+00	1,38E+00
713,93	1,43E+00	1,37E+00	1,40E+00	1,44E+00	1,26E+00	1,35E+00	1,51E+00	1,25E+00	1,38E+00
716,43	1,44E+00	1,38E+00	1,41E+00	1,45E+00	1,27E+00	1,36E+00	1,52E+00	1,26E+00	1,39E+00
718,93	1,44E+00	1,39E+00	1,42E+00	1,46E+00	1,27E+00	1,37E+00	1,53E+00	1,27E+00	1,40E+00
721,43	1,45E+00	1,40E+00	1,42E+00	1,47E+00	1,28E+00	1,37E+00	1,54E+00	1,28E+00	1,41E+00
723,93	1,46E+00	1,40E+00	1,43E+00	1,47E+00	1,29E+00	1,38E+00	1,55E+00	1,29E+00	1,42E+00
726,43	1,47E+00	1,41E+00	1,44E+00	1,48E+00	1,30E+00	1,39E+00	1,56E+00	1,30E+00	1,43E+00
728,93	1,48E+00	1,42E+00	1,45E+00	1,49E+00	1,30E+00	1,40E+00	1,57E+00	1,30E+00	1,44E+00
731,43	1,49E+00	1,43E+00	1,46E+00	1,50E+00	1,31E+00	1,41E+00	1,58E+00	1,31E+00	1,45E+00
733,93	1,49E+00	1,43E+00	1,46E+00	1,51E+00	1,32E+00	1,42E+00	1,59E+00	1,32E+00	1,45E+00
736,43	1,50E+00	1,44E+00	1,47E+00	1,52E+00	1,33E+00	1,42E+00	1,60E+00	1,33E+00	1,46E+00
738,93	1,51E+00	1,45E+00	1,48E+00	1,53E+00	1,34E+00	1,43E+00	1,60E+00	1,34E+00	1,47E+00
741,43	1,52E+00	1,46E+00	1,49E+00	1,54E+00	1,35E+00	1,44E+00	1,61E+00	1,35E+00	1,48E+00
743,93	1,53E+00	1,47E+00	1,50E+00	1,55E+00	1,35E+00	1,45E+00	1,62E+00	1,36E+00	1,49E+00
746,43	1,54E+00	1,47E+00	1,51E+00	1,55E+00	1,36E+00	1,46E+00	1,63E+00	1,37E+00	1,50E+00
748,93	1,55E+00	1,48E+00	1,51E+00	1,56E+00	1,37E+00	1,47E+00	1,64E+00	1,37E+00	1,51E+00
751,43	1,56E+00	1,49E+00	1,52E+00	1,57E+00	1,38E+00	1,48E+00	1,65E+00	1,38E+00	1,52E+00
753,93	1,56E+00	1,50E+00	1,53E+00	1,58E+00	1,39E+00	1,48E+00	1,66E+00	1,39E+00	1,53E+00
756,43	1,57E+00	1,51E+00	1,54E+00	1,59E+00	1,40E+00	1,49E+00	1,67E+00	1,40E+00	1,54E+00
758,93	1,58E+00	1,52E+00	1,55E+00	1,60E+00	1,41E+00	1,50E+00	1,68E+00	1,41E+00	1,55E+00
761,43	1,59E+00	1,52E+00	1,56E+00	1,61E+00	1,41E+00	1,51E+00	1,69E+00	1,42E+00	1,55E+00
763,93	1,60E+00	1,53E+00	1,57E+00	1,62E+00	1,42E+00	1,52E+00	1,70E+00	1,43E+00	1,56E+00
766,43	1,61E+00	1,54E+00	1,58E+00	1,63E+00	1,43E+00	1,53E+00	1,71E+00	1,44E+00	1,57E+00
768,93	1,62E+00	1,55E+00	1,58E+00	1,64E+00	1,44E+00	1,54E+00	1,72E+00	1,45E+00	1,58E+00
771,43	1,63E+00	1,56E+00	1,59E+00	1,65E+00	1,45E+00	1,55E+00	1,73E+00	1,45E+00	1,59E+00
773,93	1,64E+00	1,56E+00	1,60E+00	1,66E+00	1,46E+00	1,56E+00	1,74E+00	1,46E+00	1,60E+00
776,43	1,65E+00	1,57E+00	1,61E+00	1,67E+00	1,47E+00	1,57E+00	1,75E+00	1,47E+00	1,61E+00
778,93	1,66E+00	1,58E+00	1,62E+00	1,68E+00	1,48E+00	1,58E+00	1,76E+00	1,48E+00	1,62E+00
781,43	1,67E+00	1,59E+00	1,63E+00	1,69E+00	1,49E+00	1,59E+00	1,77E+00	1,49E+00	1,63E+00
783,93	1,68E+00	1,60E+00	1,64E+00	1,70E+00	1,49E+00	1,60E+00	1,78E+00	1,50E+00	1,64E+00
786,43	1,69E+00	1,60E+00	1,65E+00	1,71E+00	1,50E+00	1,61E+00	1,79E+00	1,51E+00	1,65E+00
788,93	1,70E+00	1,61E+00	1,65E+00	1,72E+00	1,51E+00	1,62E+00	1,81E+00	1,52E+00	1,66E+00
791,43	1,71E+00	1,62E+00	1,66E+00	1,73E+00	1,52E+00	1,63E+00	1,82E+00	1,53E+00	1,67E+00
793,93	1,72E+00	1,63E+00	1,67E+00	1,74E+00	1,53E+00	1,64E+00	1,83E+00	1,54E+00	1,68E+00
796,43	1,72E+00	1,64E+00	1,68E+00	1,75E+00	1,54E+00	1,65E+00	1,84E+00	1,55E+00	1,69E+00
798,93	1,73E+00	1,64E+00	1,69E+00	1,76E+00	1,55E+00	1,66E+00	1,85E+00	1,56E+00	1,70E+00
801,43	1,74E+00	1,65E+00	1,69E+00	1,77E+00	1,55E+00	1,66E+00	1,86E+00	1,56E+00	1,71E+00



Tabelle 68: Thermischer Ausdehnungskoeffizient der mit 20 Vol.-% kubischem Porosierungsmittel porosierten Probe in x-, y- und z-Richtung, gemessen in Abhängigkeit der Temperatur. Aus je 2 Werten wurde ein der Mittelwert gebildet.

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
21,43	1,90E-02	1,92E-02	1,91E-02	2,94E-02	2,16E-02	2,55E-02	2,91E-02	3,11E-02	3,01E-02
23,93	1,30E-02	1,57E-02	1,43E-02	1,70E-02	-1,61E-01	-7,20E-02	1,67E-02	1,69E-02	1,68E-02
26,43	-2,35E-04	5,01E-04	1,33E-04	1,56E-03	-1,74E-01	-8,64E-02	7,46E-03	-4,26E-04	3,52E-03
28,93	-3,53E-04	-6,25E-04	-4,89E-04	4,97E-03	-1,74E-01	-8,46E-02	1,40E-02	-2,20E-03	5,92E-03
31,43	1,10E-02	1,05E-02	1,07E-02	1,93E-02	-1,63E-01	-7,17E-02	2,97E-02	8,06E-03	1,89E-02
33,93	2,05E-02	1,95E-02	2,00E-02	3,12E-02	-1,52E-01	-6,03E-02	4,47E-02	1,64E-02	3,06E-02
36,43	2,94E-02	2,81E-02	2,88E-02	4,20E-02	-1,43E-01	-5,05E-02	5,75E-02	2,35E-02	4,05E-02
38,93	3,79E-02	3,63E-02	3,71E-02	5,27E-02	-1,34E-01	-4,08E-02	6,92E-02	3,09E-02	5,01E-02
41,43	4,64E-02	4,42E-02	4,53E-02	6,28E-02	-1,26E-01	-3,16E-02	8,20E-02	3,75E-02	5,98E-02
43,93	5,44E-02	5,22E-02	5,33E-02	7,31E-02	-1,17E-01	-2,22E-02	9,32E-02	4,43E-02	6,88E-02
46,43	6,21E-02	5,93E-02	6,07E-02	8,26E-02	-1,10E-01	-1,38E-02	1,02E-01	5,07E-02	7,63E-02
48,93	6,94E-02	6,66E-02	6,80E-02	9,20E-02	-1,03E-01	-5,29E-03	1,15E-01	5,68E-02	8,61E-02
51,43	7,69E-02	7,40E-02	7,54E-02	1,01E-01	-9,54E-02	2,83E-03	1,21E-01	6,27E-02	9,21E-02
53,93	8,42E-02	8,09E-02	8,25E-02	1,10E-01	-8,87E-02	1,07E-02	1,35E-01	6,87E-02	1,02E-01
56,43	9,09E-02	8,74E-02	8,91E-02	1,18E-01	-8,24E-02	1,80E-02	1,45E-01	7,43E-02	1,10E-01
58,93	9,77E-02	9,38E-02	9,57E-02	1,27E-01	-7,53E-02	2,56E-02	1,54E-01	7,93E-02	1,17E-01
61,43	1,05E-01	1,00E-01	1,03E-01	1,35E-01	-6,77E-02	3,35E-02	1,65E-01	8,46E-02	1,25E-01
63,93	1,11E-01	1,06E-01	1,09E-01	1,42E-01	-6,06E-02	4,09E-02	1,75E-01	8,94E-02	1,32E-01
66,43	1,17E-01	1,12E-01	1,15E-01	1,50E-01	-5,38E-02	4,80E-02	1,82E-01	9,38E-02	1,38E-01
68,93	1,23E-01	1,18E-01	1,21E-01	1,58E-01	-4,69E-02	5,54E-02	1,94E-01	9,91E-02	1,46E-01
71,43	1,28E-01	1,21E-01	1,24E-01	1,63E-01	-4,22E-02	6,06E-02	2,01E-01	1,02E-01	1,51E-01
73,93	1,32E-01	1,25E-01	1,28E-01	1,69E-01	-3,76E-02	6,57E-02	2,08E-01	1,04E-01	1,56E-01
76,43	1,36E-01	1,29E-01	1,33E-01	1,74E-01	-3,27E-02	7,07E-02	2,15E-01	1,06E-01	1,61E-01
78,93	1,42E-01	1,34E-01	1,38E-01	1,80E-01	-2,65E-02	7,67E-02	2,22E-01	1,11E-01	1,66E-01
81,43	1,48E-01	1,40E-01	1,44E-01	1,86E-01	-2,04E-02	8,26E-02	2,28E-01	1,15E-01	1,71E-01
83,93	1,53E-01	1,43E-01	1,48E-01	1,90E-01	-1,55E-02	8,74E-02	2,34E-01	1,18E-01	1,76E-01
86,43	1,57E-01	1,46E-01	1,51E-01	1,95E-01	-1,10E-02	9,21E-02	2,39E-01	1,20E-01	1,80E-01
88,93	1,61E-01	1,49E-01	1,55E-01	2,00E-01	-6,80E-03	9,64E-02	2,43E-01	1,23E-01	1,83E-01
91,43	1,65E-01	1,53E-01	1,59E-01	2,04E-01	-2,03E-03	1,01E-01	2,48E-01	1,25E-01	1,87E-01
93,93	1,68E-01	1,55E-01	1,61E-01	2,06E-01	1,53E-03	1,04E-01	2,50E-01	1,26E-01	1,88E-01
96,43	1,72E-01	1,60E-01	1,66E-01	2,11E-01	7,19E-03	1,09E-01	2,53E-01	1,28E-01	1,90E-01
98,93	1,79E-01	1,63E-01	1,71E-01	2,17E-01	1,19E-02	1,14E-01	2,60E-01	1,32E-01	1,96E-01
101,43	1,81E-01	1,65E-01	1,73E-01	2,19E-01	1,49E-02	1,17E-01	2,62E-01	1,32E-01	1,97E-01
103,93	1,85E-01	1,68E-01	1,76E-01	2,23E-01	1,89E-02	1,21E-01	2,65E-01	1,34E-01	2,00E-01
106,43	1,88E-01	1,70E-01	1,79E-01	2,26E-01	2,29E-02	1,25E-01	2,68E-01	1,35E-01	2,01E-01
108,93	1,91E-01	1,72E-01	1,82E-01	2,29E-01	2,64E-02	1,28E-01	2,70E-01	1,36E-01	2,03E-01
111,43	1,93E-01	1,73E-01	1,83E-01	2,31E-01	2,91E-02	1,30E-01	2,70E-01	1,33E-01	2,02E-01
113,93	1,98E-01	1,77E-01	1,88E-01	2,36E-01	3,43E-02	1,35E-01	2,75E-01	1,36E-01	2,06E-01
116,43	2,05E-01	1,82E-01	1,93E-01	2,43E-01	3,97E-02	1,41E-01	2,81E-01	1,41E-01	2,11E-01
118,93	2,11E-01	1,86E-01	1,98E-01	2,48E-01	4,50E-02	1,46E-01	2,86E-01	1,46E-01	2,16E-01
121,43	2,15E-01	1,89E-01	2,02E-01	2,51E-01	4,88E-02	1,50E-01	2,88E-01	1,50E-01	2,19E-01
123,93	2,21E-01	1,92E-01	2,06E-01	2,55E-01	5,33E-02	1,54E-01	2,92E-01	1,54E-01	2,23E-01
126,43	2,24E-01	1,95E-01	2,10E-01	2,58E-01	5,71E-02	1,58E-01	2,94E-01	1,57E-01	2,26E-01
128,93	2,29E-01	1,97E-01	2,13E-01	2,61E-01	6,12E-02	1,61E-01	2,96E-01	1,60E-01	2,28E-01
131,43	2,32E-01	2,00E-01	2,16E-01	2,64E-01	6,48E-02	1,65E-01	2,98E-01	1,63E-01	2,31E-01
133,93	2,35E-01	2,01E-01	2,18E-01	2,66E-01	6,76E-02	1,67E-01	2,99E-01	1,66E-01	2,32E-01
136,43	2,39E-01	2,03E-01	2,21E-01	2,69E-01	7,11E-02	1,70E-01	3,00E-01	1,68E-01	2,34E-01
138,93	2,43E-01	2,06E-01	2,24E-01	2,72E-01	7,50E-02	1,73E-01	2,96E-01	1,72E-01	2,34E-01
141,43	2,45E-01	2,07E-01	2,26E-01	2,73E-01	7,70E-02	1,75E-01	3,00E-01	1,73E-01	2,36E-01
143,93	2,48E-01	2,09E-01	2,28E-01	2,76E-01	8,05E-02	1,78E-01	3,03E-01	1,76E-01	2,39E-01
146,43	2,50E-01	2,09E-01	2,30E-01	2,78E-01	8,24E-02	1,80E-01	3,04E-01	1,78E-01	2,41E-01
148,93	2,53E-01	2,12E-01	2,32E-01	2,80E-01	8,56E-02	1,83E-01	3,06E-01	1,81E-01	2,44E-01
151,43	2,54E-01	2,12E-01	2,33E-01	2,82E-01	8,71E-02	1,85E-01	3,07E-01	1,83E-01	2,45E-01
153,93	2,57E-01	2,13E-01	2,35E-01	2,84E-01	8,93E-02	1,87E-01	3,09E-01	1,85E-01	2,47E-01
156,43	2,59E-01	2,14E-01	2,37E-01	2,86E-01	9,15E-02	1,89E-01	3,10E-01	1,87E-01	2,49E-01
158,93	2,61E-01	2,15E-01	2,38E-01	2,88E-01	9,32E-02	1,91E-01	3,11E-01	1,88E-01	2,50E-01
161,43	2,63E-01	2,17E-01	2,40E-01	2,90E-01	9,51E-02	1,93E-01	3,12E-01	1,91E-01	2,51E-01
163,93	2,65E-01	2,18E-01	2,41E-01	2,92E-01	9,71E-02	1,95E-01	3,13E-01	1,94E-01	2,53E-01
166,43	2,67E-01	2,19E-01	2,43E-01	2,94E-01	9,89E-02	1,97E-01	3,14E-01	1,97E-01	2,55E-01

# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
168,93	2,69E-01	2,20E-01	2,45E-01	2,96E-01	1,01E-01	1,98E-01	3,15E-01	2,00E-01	2,57E-01
171,43	2,71E-01	2,21E-01	2,46E-01	2,98E-01	1,02E-01	2,00E-01	3,16E-01	2,02E-01	2,59E-01
173,93	2,72E-01	2,22E-01	2,47E-01	2,99E-01	1,03E-01	2,01E-01	3,16E-01	2,05E-01	2,60E-01
176,43	2,74E-01	2,24E-01	2,49E-01	3,02E-01	1,05E-01	2,04E-01	3,17E-01	2,07E-01	2,62E-01
178,93	2,76E-01	2,25E-01	2,51E-01	3,04E-01	1,07E-01	2,05E-01	3,18E-01	2,10E-01	2,64E-01
181,43	2,78E-01	2,27E-01	2,53E-01	3,06E-01	1,08E-01	2,07E-01	3,19E-01	2,14E-01	2,66E-01
183,93	2,80E-01	2,28E-01	2,54E-01	3,08E-01	1,10E-01	2,09E-01	3,18E-01	2,15E-01	2,67E-01
186,43	2,82E-01	2,29E-01	2,56E-01	3,10E-01	1,11E-01	2,11E-01	3,20E-01	2,18E-01	2,69E-01
188,93	2,84E-01	2,31E-01	2,58E-01	3,12E-01	1,13E-01	2,13E-01	3,21E-01	2,21E-01	2,71E-01
191,43	2,86E-01	2,33E-01	2,59E-01	3,14E-01	1,15E-01	2,15E-01	3,22E-01	2,25E-01	2,73E-01
193,93	2,88E-01	2,34E-01	2,61E-01	3,16E-01	1,16E-01	2,16E-01	3,23E-01	2,28E-01	2,75E-01
196,43	2,89E-01	2,35E-01	2,62E-01	3,18E-01	1,17E-01	2,17E-01	3,22E-01	2,29E-01	2,75E-01
198,93	2,91E-01	2,37E-01	2,64E-01	3,20E-01	1,19E-01	2,20E-01	3,24E-01	2,32E-01	2,78E-01
201,43	2,93E-01	2,38E-01	2,66E-01	3,23E-01	1,21E-01	2,22E-01	3,25E-01	2,35E-01	2,80E-01
203,93	2,96E-01	2,41E-01	2,69E-01	3,26E-01	1,24E-01	2,25E-01	3,27E-01	2,39E-01	2,83E-01
206,43	2,98E-01	2,44E-01	2,71E-01	3,28E-01	1,25E-01	2,27E-01	3,28E-01	2,41E-01	2,84E-01
208,93	3,01E-01	2,45E-01	2,73E-01	3,31E-01	1,28E-01	2,29E-01	3,30E-01	2,44E-01	2,87E-01
211,43	3,04E-01	2,48E-01	2,76E-01	3,34E-01	1,31E-01	2,32E-01	3,33E-01	2,48E-01	2,90E-01
213,93	3,06E-01	2,50E-01	2,78E-01	3,37E-01	1,33E-01	2,35E-01	3,34E-01	2,51E-01	2,93E-01
216,43	3,08E-01	2,52E-01	2,80E-01	3,39E-01	1,35E-01	2,37E-01	3,36E-01	2,54E-01	2,95E-01
218,93	3,11E-01	2,55E-01	2,83E-01	3,42E-01	1,38E-01	2,40E-01	3,39E-01	2,58E-01	2,98E-01
221,43	3,14E-01	2,58E-01	2,86E-01	3,45E-01	1,40E-01	2,43E-01	3,40E-01	2,61E-01	3,01E-01
223,93	3,17E-01	2,60E-01	2,89E-01	3,48E-01	1,43E-01	2,46E-01	3,43E-01	2,65E-01	3,04E-01
226,43	3,21E-01	2,64E-01	2,93E-01	3,52E-01	1,46E-01	2,49E-01	3,46E-01	2,69E-01	3,07E-01
228,93	3,25E-01	2,67E-01	2,96E-01	3,56E-01	1,49E-01	2,53E-01	3,48E-01	2,73E-01	3,10E-01
231,43	3,28E-01	2,69E-01	2,99E-01	3,59E-01	1,52E-01	2,56E-01	3,51E-01	2,76E-01	3,13E-01
233,93	3,31E-01	2,72E-01	3,02E-01	3,62E-01	1,55E-01	2,58E-01	3,53E-01	2,79E-01	3,16E-01
236,43	3,35E-01	2,75E-01	3,05E-01	3,66E-01	1,58E-01	2,62E-01	3,56E-01	2,83E-01	3,20E-01
238,93	3,37E-01	2,78E-01	3,08E-01	3,69E-01	1,61E-01	2,65E-01	3,59E-01	2,87E-01	3,23E-01
241,43	3,41E-01	2,82E-01	3,12E-01	3,73E-01	1,65E-01	2,69E-01	3,62E-01	2,91E-01	3,27E-01
243,93	3,45E-01	2,85E-01	3,15E-01	3,76E-01	1,69E-01	2,72E-01	3,65E-01	2,95E-01	3,30E-01
246,43	3,49E-01	2,88E-01	3,19E-01	3,80E-01	1,72E-01	2,76E-01	3,69E-01	3,00E-01	3,34E-01
248,93	3,54E-01	2,92E-01	3,23E-01	3,85E-01	1,76E-01	2,80E-01	3,72E-01	3,04E-01	3,38E-01
251,43	3,58E-01	2,96E-01	3,27E-01	3,89E-01	1,79E-01	2,84E-01	3,75E-01	3,09E-01	3,42E-01
253,93	3,62E-01	3,00E-01	3,31E-01	3,94E-01	1,83E-01	2,88E-01	3,79E-01	3,14E-01	3,46E-01
256,43	3,67E-01	3,04E-01	3,35E-01	3,98E-01	1,87E-01	2,93E-01	3,82E-01	3,18E-01	3,50E-01
258,93	3,71E-01	3,07E-01	3,39E-01	4,02E-01	1,91E-01	2,97E-01	3,85E-01	3,22E-01	3,54E-01
261,43	3,75E-01	3,10E-01	3,42E-01	4,06E-01	1,94E-01	3,00E-01	3,88E-01	3,26E-01	3,57E-01
263,93	3,80E-01	3,16E-01	3,48E-01	4,11E-01	1,99E-01	3,05E-01	3,93E-01	3,31E-01	3,62E-01
266,43	3,84E-01	3,19E-01	3,51E-01	4,15E-01	2,03E-01	3,09E-01	3,96E-01	3,35E-01	3,65E-01
268,93	3,89E-01	3,23E-01	3,56E-01	4,20E-01	2,08E-01	3,14E-01	4,00E-01	3,40E-01	3,70E-01
271,43	3,94E-01	3,27E-01	3,61E-01	4,25E-01	2,12E-01	3,19E-01	4,04E-01	3,45E-01	3,74E-01
273,93	3,99E-01	3,32E-01	3,65E-01	4,30E-01	2,16E-01	3,23E-01	4,08E-01	3,50E-01	3,79E-01
276,43	4,04E-01	3,36E-01	3,70E-01	4,35E-01	2,21E-01	3,28E-01	4,12E-01	3,55E-01	3,83E-01
278,93	4,09E-01	3,40E-01	3,74E-01	4,39E-01	2,25E-01	3,32E-01	4,14E-01	3,59E-01	3,87E-01
281,43	4,14E-01	3,45E-01	3,79E-01	4,44E-01	2,30E-01	3,37E-01	4,20E-01	3,65E-01	3,92E-01
283,93	4,18E-01	3,49E-01	3,83E-01	4,49E-01	2,34E-01	3,41E-01	4,24E-01	3,69E-01	3,97E-01
286,43	4,23E-01	3,53E-01	3,88E-01	4,54E-01	2,38E-01	3,46E-01	4,28E-01	3,74E-01	4,01E-01
288,93	4,29E-01	3,57E-01	3,93E-01	4,59E-01	2,43E-01	3,51E-01	4,32E-01	3,79E-01	4,06E-01
291,43	4,33E-01	3,61E-01	3,97E-01	4,63E-01	2,47E-01	3,55E-01	4,36E-01	3,84E-01	4,10E-01
293,93	4,38E-01	3,66E-01	4,02E-01	4,68E-01	2,51E-01	3,60E-01	4,39E-01	3,89E-01	4,14E-01
296,43	4,44E-01	3,70E-01	4,07E-01	4,74E-01	2,56E-01	3,65E-01	4,44E-01	3,94E-01	4,19E-01
298,93	4,49E-01	3,75E-01	4,12E-01	4,79E-01	2,61E-01	3,70E-01	4,47E-01	3,99E-01	4,23E-01
301,43	4,54E-01	3,79E-01	4,17E-01	4,84E-01	2,65E-01	3,74E-01	4,52E-01	4,04E-01	4,28E-01
303,93	4,60E-01	3,83E-01	4,21E-01	4,89E-01	2,70E-01	3,79E-01	4,56E-01	4,09E-01	4,32E-01
306,43	4,65E-01	3,88E-01	4,27E-01	4,94E-01	2,75E-01	3,84E-01	4,61E-01	4,14E-01	4,37E-01
308,93	4,70E-01	3,93E-01	4,31E-01	4,99E-01	2,79E-01	3,89E-01	4,64E-01	4,18E-01	4,41E-01
311,43	4,75E-01	3,98E-01	4,36E-01	5,04E-01	2,84E-01	3,94E-01	4,69E-01	4,24E-01	4,46E-01
313,93	4,80E-01	4,02E-01	4,41E-01	5,09E-01	2,88E-01	3,99E-01	4,72E-01	4,28E-01	4,50E-01
316,43	4,86E-01	4,07E-01	4,46E-01	5,15E-01	2,94E-01	4,04E-01	4,77E-01	4,33E-01	4,55E-01
318,93	4,91E-01	4,11E-01	4,51E-01	5,20E-01	2,98E-01	4,09E-01	4,81E-01	4,38E-01	4,60E-01
321,43	4,96E-01	4,15E-01	4,56E-01	5,26E-01	3,03E-01	4,14E-01	4,86E-01	4,43E-01	4,64E-01
323,93	5,01E-01	4,20E-01	4,60E-01	5,31E-01	3,08E-01	4,20E-01	4,90E-01	4,48E-01	4,69E-01
326,43	5,07E-01	4,24E-01	4,65E-01	5,37E-01	3,13E-01	4,25E-01	4,94E-01	4,53E-01	4,73E-01
328,93	5,12E-01	4,29E-01	4,71E-01	5,42E-01	3,18E-01	4,30E-01	4,98E-01	4,57E-01	4,78E-01

# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
331,43	5,17E-01	4,34E-01	4,76E-01	5,48E-01	3,23E-01	4,35E-01	5,03E-01	4,62E-01	4,83E-01
333,93	5,23E-01	4,38E-01	4,80E-01	5,53E-01	3,27E-01	4,40E-01	5,08E-01	4,66E-01	4,87E-01
336,43	5,27E-01	4,41E-01	4,84E-01	5,58E-01	3,31E-01	4,44E-01	5,12E-01	4,70E-01	4,91E-01
338,93	5,33E-01	4,46E-01	4,90E-01	5,64E-01	3,37E-01	4,50E-01	5,17E-01	4,75E-01	4,96E-01
341,43	5,39E-01	4,51E-01	4,95E-01	5,69E-01	3,42E-01	4,56E-01	5,22E-01	4,79E-01	5,01E-01
343,93	5,45E-01	4,56E-01	5,00E-01	5,76E-01	3,48E-01	4,62E-01	5,28E-01	4,84E-01	5,06E-01
346,43	5,50E-01	4,60E-01	5,05E-01	5,81E-01	3,52E-01	4,67E-01	5,32E-01	4,89E-01	5,10E-01
348,93	5,55E-01	4,65E-01	5,10E-01	5,86E-01	3,57E-01	4,72E-01	5,36E-01	4,93E-01	5,15E-01
351,43	5,62E-01	4,70E-01	5,16E-01	5,92E-01	3,63E-01	4,78E-01	5,41E-01	4,99E-01	5,20E-01
353,93	5,68E-01	4,75E-01	5,21E-01	5,98E-01	3,68E-01	4,83E-01	5,45E-01	5,03E-01	5,24E-01
356,43	5,73E-01	4,79E-01	5,26E-01	6,03E-01	3,74E-01	4,89E-01	5,49E-01	5,08E-01	5,29E-01
358,93	5,79E-01	4,84E-01	5,31E-01	6,09E-01	3,78E-01	4,94E-01	5,52E-01	5,13E-01	5,32E-01
361,43	5,85E-01	4,89E-01	5,37E-01	6,15E-01	3,84E-01	5,00E-01	5,56E-01	5,19E-01	5,37E-01
363,93	5,91E-01	4,93E-01	5,42E-01	6,21E-01	3,89E-01	5,05E-01	5,61E-01	5,24E-01	5,43E-01
366,43	5,96E-01	4,97E-01	5,47E-01	6,26E-01	3,94E-01	5,10E-01	5,57E-01	5,28E-01	5,43E-01
368,93	6,02E-01	5,02E-01	5,52E-01	6,32E-01	4,00E-01	5,16E-01	5,65E-01	5,33E-01	5,49E-01
371,43	6,08E-01	5,08E-01	5,58E-01	6,38E-01	4,05E-01	5,22E-01	5,72E-01	5,38E-01	5,55E-01
373,93	6,14E-01	5,13E-01	5,63E-01	6,44E-01	4,11E-01	5,27E-01	5,79E-01	5,44E-01	5,61E-01
376,43	6,19E-01	5,17E-01	5,68E-01	6,50E-01	4,16E-01	5,33E-01	5,85E-01	5,49E-01	5,67E-01
378,93	6,26E-01	5,23E-01	5,74E-01	6,56E-01	4,22E-01	5,39E-01	5,91E-01	5,54E-01	5,73E-01
381,43	6,32E-01	5,28E-01	5,80E-01	6,62E-01	4,27E-01	5,45E-01	5,95E-01	5,60E-01	5,78E-01
383,93	6,38E-01	5,33E-01	5,85E-01	6,68E-01	4,33E-01	5,50E-01	5,96E-01	5,65E-01	5,81E-01
386,43	6,43E-01	5,37E-01	5,90E-01	6,73E-01	4,38E-01	5,56E-01	6,03E-01	5,71E-01	5,87E-01
388,93	6,49E-01	5,42E-01	5,96E-01	6,79E-01	4,44E-01	5,62E-01	6,10E-01	5,76E-01	5,93E-01
391,43	6,56E-01	5,48E-01	6,02E-01	6,85E-01	4,50E-01	5,68E-01	6,17E-01	5,82E-01	5,99E-01
393,93	6,62E-01	5,53E-01	6,07E-01	6,92E-01	4,56E-01	5,74E-01	6,23E-01	5,89E-01	6,06E-01
396,43	6,68E-01	5,58E-01	6,13E-01	6,97E-01	4,62E-01	5,80E-01	6,29E-01	5,95E-01	6,12E-01
398,93	6,75E-01	5,64E-01	6,19E-01	7,04E-01	4,68E-01	5,86E-01	6,35E-01	6,01E-01	6,18E-01
401,43	6,81E-01	5,70E-01	6,25E-01	7,10E-01	4,74E-01	5,92E-01	6,40E-01	6,07E-01	6,24E-01
403,93	6,88E-01	5,75E-01	6,32E-01	7,16E-01	4,80E-01	5,98E-01	6,46E-01	6,13E-01	6,30E-01
406,43	6,94E-01	5,81E-01	6,38E-01	7,23E-01	4,87E-01	6,05E-01	6,52E-01	6,18E-01	6,35E-01
408,93	7,00E-01	5,87E-01	6,43E-01	7,29E-01	4,92E-01	6,10E-01	6,57E-01	6,23E-01	6,40E-01
411,43	7,06E-01	5,92E-01	6,49E-01	7,35E-01	4,98E-01	6,17E-01	6,62E-01	6,29E-01	6,46E-01
413,93	7,13E-01	5,99E-01	6,56E-01	7,42E-01	5,05E-01	6,23E-01	6,68E-01	6,36E-01	6,52E-01
416,43	7,20E-01	6,05E-01	6,62E-01	7,49E-01	5,12E-01	6,30E-01	6,74E-01	6,41E-01	6,58E-01
418,93	7,26E-01	6,10E-01	6,68E-01	7,55E-01	5,18E-01	6,36E-01	6,80E-01	6,47E-01	6,63E-01
421,43	7,33E-01	6,16E-01	6,75E-01	7,62E-01	5,25E-01	6,43E-01	6,85E-01	6,50E-01	6,68E-01
423,93	7,38E-01	6,23E-01	6,80E-01	7,68E-01	5,31E-01	6,50E-01	6,91E-01	6,57E-01	6,74E-01
426,43	7,46E-01	6,29E-01	6,87E-01	7,75E-01	5,37E-01	6,56E-01	6,96E-01	6,65E-01	6,81E-01
428,93	7,53E-01	6,35E-01	6,94E-01	7,82E-01	5,44E-01	6,63E-01	7,02E-01	6,73E-01	6,88E-01
431,43	7,60E-01	6,42E-01	7,01E-01	7,89E-01	5,51E-01	6,70E-01	7,09E-01	6,80E-01	6,94E-01
433,93	7,68E-01	6,48E-01	7,08E-01	7,96E-01	5,57E-01	6,77E-01	7,14E-01	6,88E-01	7,01E-01
436,43	7,74E-01	6,55E-01	7,14E-01	8,02E-01	5,64E-01	6,83E-01	7,20E-01	6,95E-01	7,07E-01
438,93	7,82E-01	6,61E-01	7,21E-01	8,09E-01	5,70E-01	6,90E-01	7,26E-01	7,02E-01	7,14E-01
441,43	7,89E-01	6,68E-01	7,28E-01	8,17E-01	5,77E-01	6,97E-01	7,32E-01	7,10E-01	7,21E-01
443,93	7,96E-01	6,74E-01	7,35E-01	8,24E-01	5,84E-01	7,04E-01	7,38E-01	7,18E-01	7,28E-01
446,43	8,03E-01	6,80E-01	7,42E-01	8,30E-01	5,90E-01	7,10E-01	7,44E-01	7,25E-01	7,34E-01
448,93	8,10E-01	6,87E-01	7,49E-01	8,38E-01	5,97E-01	7,17E-01	7,50E-01	7,33E-01	7,42E-01
451,43	8,17E-01	6,94E-01	7,56E-01	8,45E-01	6,04E-01	7,24E-01	7,56E-01	7,40E-01	7,48E-01
453,93	8,24E-01	7,01E-01	7,63E-01	8,52E-01	6,11E-01	7,31E-01	7,62E-01	7,47E-01	7,55E-01
456,43	8,32E-01	7,08E-01	7,70E-01	8,60E-01	6,18E-01	7,39E-01	7,69E-01	7,56E-01	7,62E-01
458,93	8,39E-01	7,15E-01	7,77E-01	8,67E-01	6,24E-01	7,46E-01	7,75E-01	7,63E-01	7,69E-01
461,43	8,46E-01	7,22E-01	7,84E-01	8,74E-01	6,31E-01	7,53E-01	7,81E-01	7,71E-01	7,76E-01
463,93	8,54E-01	7,29E-01	7,91E-01	8,81E-01	6,38E-01	7,60E-01	7,88E-01	7,78E-01	7,83E-01
466,43	8,61E-01	7,37E-01	7,99E-01	8,87E-01	6,44E-01	7,66E-01	7,93E-01	7,89E-01	7,91E-01
468,93	8,68E-01	7,44E-01	8,06E-01	8,94E-01	6,51E-01	7,73E-01	7,99E-01	7,96E-01	7,97E-01
471,43	8,76E-01	7,51E-01	8,13E-01	9,02E-01	6,59E-01	7,80E-01	8,06E-01	8,04E-01	8,05E-01
473,93	8,83E-01	7,58E-01	8,20E-01	9,09E-01	6,65E-01	7,87E-01	8,12E-01	8,12E-01	8,12E-01
476,43	8,91E-01	7,65E-01	8,28E-01	9,17E-01	6,73E-01	7,95E-01	8,19E-01	8,20E-01	8,20E-01
478,93	8,99E-01	7,72E-01	8,35E-01	9,24E-01	6,80E-01	8,02E-01	8,25E-01	8,28E-01	8,27E-01
481,43	9,07E-01	7,79E-01	8,43E-01	9,32E-01	6,87E-01	8,09E-01	8,32E-01	8,36E-01	8,34E-01
483,93	9,14E-01	7,86E-01	8,50E-01	9,40E-01	6,94E-01	8,17E-01	8,39E-01	8,43E-01	8,41E-01
486,43	9,22E-01	7,93E-01	8,58E-01	9,47E-01	7,01E-01	8,24E-01	8,45E-01	8,51E-01	8,48E-01
488,93	9,30E-01	8,01E-01	8,65E-01	9,55E-01	7,08E-01	8,31E-01	8,53E-01	8,59E-01	8,56E-01
491,43	9,38E-01	8,08E-01	8,73E-01	9,63E-01	7,15E-01	8,39E-01	8,59E-01	8,67E-01	8,63E-01

# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
493,93	9,46E-01	8,15E-01	8,80E-01	9,70E-01	7,22E-01	8,46E-01	8,66E-01	8,75E-01	8,71E-01
496,43	9,53E-01	8,22E-01	8,87E-01	9,78E-01	7,29E-01	8,53E-01	8,72E-01	8,83E-01	8,77E-01
498,93	9,61E-01	8,29E-01	8,95E-01	9,85E-01	7,37E-01	8,61E-01	8,79E-01	8,91E-01	8,85E-01
501,43	9,70E-01	8,37E-01	9,03E-01	9,94E-01	7,44E-01	8,69E-01	8,86E-01	8,99E-01	8,93E-01
503,93	9,77E-01	8,44E-01	9,10E-01	1,00E+00	7,51E-01	8,76E-01	8,93E-01	9,07E-01	9,00E-01
506,43	9,86E-01	8,52E-01	9,19E-01	1,01E+00	7,59E-01	8,84E-01	9,01E-01	9,16E-01	9,09E-01
508,93	9,94E-01	8,59E-01	9,27E-01	1,02E+00	7,67E-01	8,92E-01	9,08E-01	9,25E-01	9,16E-01
511,43	1,00E+00	8,67E-01	9,34E-01	1,03E+00	7,74E-01	9,00E-01	9,15E-01	9,33E-01	9,24E-01
513,93	1,01E+00	8,73E-01	9,42E-01	1,03E+00	7,81E-01	9,07E-01	9,22E-01	9,41E-01	9,32E-01
516,43	1,02E+00	8,81E-01	9,50E-01	1,04E+00	7,89E-01	9,15E-01	9,29E-01	9,50E-01	9,40E-01
518,93	1,03E+00	8,89E-01	9,58E-01	1,05E+00	7,97E-01	9,23E-01	9,37E-01	9,59E-01	9,48E-01
521,43	1,04E+00	8,97E-01	9,66E-01	1,06E+00	8,05E-01	9,32E-01	9,45E-01	9,68E-01	9,57E-01
523,93	1,04E+00	9,05E-01	9,75E-01	1,07E+00	8,13E-01	9,40E-01	9,53E-01	9,77E-01	9,65E-01
526,43	1,05E+00	9,13E-01	9,83E-01	1,08E+00	8,21E-01	9,48E-01	9,61E-01	9,87E-01	9,74E-01
528,93	1,06E+00	9,21E-01	9,91E-01	1,08E+00	8,29E-01	9,57E-01	9,69E-01	9,97E-01	9,83E-01
531,43	1,07E+00	9,30E-01	1,00E+00	1,10E+00	8,39E-01	9,67E-01	9,79E-01	1,01E+00	9,93E-01
533,93	1,08E+00	9,39E-01	1,01E+00	1,10E+00	8,48E-01	9,76E-01	9,89E-01	1,02E+00	1,00E+00
536,43	1,09E+00	9,48E-01	1,02E+00	1,11E+00	8,57E-01	9,86E-01	9,98E-01	1,03E+00	1,01E+00
538,93	1,10E+00	9,58E-01	1,03E+00	1,13E+00	8,67E-01	9,96E-01	1,01E+00	1,04E+00	1,02E+00
541,43	1,11E+00	9,67E-01	1,04E+00	1,13E+00	8,76E-01	1,01E+00	1,02E+00	1,05E+00	1,03E+00
543,93	1,12E+00	9,77E-01	1,05E+00	1,15E+00	8,87E-01	1,02E+00	1,03E+00	1,06E+00	1,04E+00
546,43	1,13E+00	9,87E-01	1,06E+00	1,16E+00	8,96E-01	1,03E+00	1,04E+00	1,07E+00	1,05E+00
548,93	1,14E+00	9,97E-01	1,07E+00	1,17E+00	9,06E-01	1,04E+00	1,05E+00	1,08E+00	1,06E+00
551,43	1,15E+00	1,01E+00	1,08E+00	1,17E+00	9,15E-01	1,04E+00	1,06E+00	1,09E+00	1,07E+00
553,93	1,16E+00	1,02E+00	1,09E+00	1,18E+00	9,26E-01	1,05E+00	1,06E+00	1,10E+00	1,08E+00
556,43	1,17E+00	1,02E+00	1,10E+00	1,19E+00	9,34E-01	1,06E+00	1,07E+00	1,11E+00	1,09E+00
558,93	1,18E+00	1,03E+00	1,11E+00	1,20E+00	9,44E-01	1,07E+00	1,08E+00	1,12E+00	1,10E+00
561,43	1,19E+00	1,04E+00	1,12E+00	1,21E+00	9,54E-01	1,08E+00	1,09E+00	1,12E+00	1,11E+00
563,93	1,20E+00	1,05E+00	1,12E+00	1,22E+00	9,63E-01	1,09E+00	1,10E+00	1,13E+00	1,11E+00
566,43	1,21E+00	1,06E+00	1,13E+00	1,23E+00	9,72E-01	1,10E+00	1,11E+00	1,14E+00	1,12E+00
568,93	1,22E+00	1,07E+00	1,14E+00	1,24E+00	9,80E-01	1,11E+00	1,11E+00	1,15E+00	1,13E+00
571,43	1,22E+00	1,08E+00	1,15E+00	1,25E+00	9,99E-01	1,12E+00	1,12E+00	1,15E+00	1,14E+00
573,93	1,23E+00	1,08E+00	1,16E+00	1,25E+00	1,01E+00	1,13E+00	1,13E+00	1,16E+00	1,14E+00
576,43	1,24E+00	1,09E+00	1,17E+00	1,26E+00	1,02E+00	1,14E+00	1,13E+00	1,17E+00	1,15E+00
578,93	1,25E+00	1,10E+00	1,17E+00	1,27E+00	1,02E+00	1,15E+00	1,14E+00	1,18E+00	1,16E+00
581,43	1,26E+00	1,11E+00	1,18E+00	1,28E+00	1,03E+00	1,16E+00	1,15E+00	1,19E+00	1,17E+00
583,93	1,27E+00	1,12E+00	1,19E+00	1,29E+00	1,04E+00	1,16E+00	1,16E+00	1,20E+00	1,18E+00
586,43	1,28E+00	1,12E+00	1,20E+00	1,29E+00	1,05E+00	1,17E+00	1,16E+00	1,20E+00	1,18E+00
588,93	1,28E+00	1,13E+00	1,21E+00	1,30E+00	1,06E+00	1,18E+00	1,17E+00	1,21E+00	1,19E+00
591,43	1,29E+00	1,14E+00	1,22E+00	1,31E+00	1,06E+00	1,19E+00	1,18E+00	1,22E+00	1,20E+00
593,93	1,30E+00	1,15E+00	1,22E+00	1,32E+00	1,07E+00	1,20E+00	1,18E+00	1,23E+00	1,21E+00
596,43	1,31E+00	1,15E+00	1,23E+00	1,33E+00	1,08E+00	1,20E+00	1,19E+00	1,24E+00	1,21E+00
598,93	1,32E+00	1,16E+00	1,24E+00	1,34E+00	1,09E+00	1,21E+00	1,20E+00	1,24E+00	1,22E+00
601,43	1,33E+00	1,17E+00	1,25E+00	1,34E+00	1,09E+00	1,22E+00	1,21E+00	1,25E+00	1,23E+00
603,93	1,33E+00	1,18E+00	1,26E+00	1,35E+00	1,10E+00	1,23E+00	1,21E+00	1,26E+00	1,24E+00
606,43	1,34E+00	1,18E+00	1,26E+00	1,36E+00	1,11E+00	1,23E+00	1,22E+00	1,27E+00	1,24E+00
608,93	1,35E+00	1,19E+00	1,27E+00	1,37E+00	1,12E+00	1,24E+00	1,23E+00	1,27E+00	1,25E+00
611,43	1,36E+00	1,20E+00	1,28E+00	1,38E+00	1,13E+00	1,25E+00	1,23E+00	1,28E+00	1,26E+00
613,93	1,37E+00	1,21E+00	1,29E+00	1,38E+00	1,13E+00	1,26E+00	1,24E+00	1,29E+00	1,27E+00
616,43	1,37E+00	1,22E+00	1,29E+00	1,39E+00	1,14E+00	1,27E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,27E+00
618,93	1,38E+00	1,22E+00	1,30E+00	1,40E+00	1,15E+00	1,27E+00	1,26E+00	1,31E+00	1,28E+00
621,43	1,39E+00	1,23E+00	1,31E+00	1,41E+00	1,16E+00	1,28E+00	1,26E+00	1,32E+00	1,29E+00
623,93	1,40E+00	1,24E+00	1,32E+00	1,42E+00	1,16E+00	1,29E+00	1,27E+00	1,32E+00	1,30E+00
626,43	1,41E+00	1,25E+00	1,33E+00	1,42E+00	1,17E+00	1,30E+00	1,28E+00	1,33E+00	1,30E+00
628,93	1,42E+00	1,25E+00	1,33E+00	1,43E+00	1,18E+00	1,31E+00	1,28E+00	1,34E+00	1,31E+00
631,43	1,42E+00	1,26E+00	1,34E+00	1,44E+00	1,19E+00	1,31E+00	1,29E+00	1,35E+00	1,32E+00
633,93	1,43E+00	1,27E+00	1,35E+00	1,45E+00	1,20E+00	1,32E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,33E+00
636,43	1,44E+00	1,28E+00	1,36E+00	1,46E+00	1,20E+00	1,33E+00	1,30E+00	1,36E+00	1,33E+00
638,93	1,45E+00	1,28E+00	1,37E+00	1,46E+00	1,21E+00	1,34E+00	1,31E+00	1,37E+00	1,34E+00
641,43	1,46E+00	1,29E+00	1,37E+00	1,47E+00	1,22E+00	1,35E+00	1,32E+00	1,38E+00	1,35E+00
643,93	1,46E+00	1,30E+00	1,38E+00	1,48E+00	1,23E+00	1,35E+00	1,32E+00	1,39E+00	1,36E+00
646,43	1,47E+00	1,31E+00	1,39E+00	1,49E+00	1,23E+00	1,36E+00	1,33E+00	1,39E+00	1,36E+00
648,93	1,48E+00	1,31E+00	1,40E+00	1,50E+00	1,24E+00	1,37E+00	1,34E+00	1,40E+00	1,37E+00
651,43	1,49E+00	1,32E+00	1,41E+00	1,50E+00	1,25E+00	1,38E+00	1,34E+00	1,41E+00	1,38E+00
653,93	1,50E+00	1,33E+00	1,41E+00	1,51E+00	1,26E+00	1,38E+00	1,35E+00	1,42E+00	1,39E+00

# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
656,43	1,50E+00	1,34E+00	1,42E+00	1,52E+00	1,26E+00	1,39E+00	1,36E+00	1,43E+00	1,39E+00
658,93	1,51E+00	1,34E+00	1,43E+00	1,53E+00	1,27E+00	1,40E+00	1,36E+00	1,43E+00	1,40E+00
661,43	1,52E+00	1,35E+00	1,44E+00	1,54E+00	1,28E+00	1,41E+00	1,37E+00	1,44E+00	1,41E+00
663,93	1,53E+00	1,36E+00	1,44E+00	1,54E+00	1,29E+00	1,41E+00	1,38E+00	1,45E+00	1,41E+00
666,43	1,54E+00	1,37E+00	1,45E+00	1,55E+00	1,29E+00	1,42E+00	1,38E+00	1,46E+00	1,42E+00
668,93	1,55E+00	1,38E+00	1,46E+00	1,56E+00	1,30E+00	1,43E+00	1,39E+00	1,47E+00	1,43E+00
671,43	1,55E+00	1,38E+00	1,47E+00	1,57E+00	1,31E+00	1,44E+00	1,40E+00	1,47E+00	1,44E+00
673,93	1,56E+00	1,39E+00	1,48E+00	1,58E+00	1,32E+00	1,45E+00	1,40E+00	1,48E+00	1,44E+00
676,43	1,57E+00	1,40E+00	1,48E+00	1,58E+00	1,32E+00	1,45E+00	1,41E+00	1,49E+00	1,45E+00
678,93	1,58E+00	1,41E+00	1,49E+00	1,59E+00	1,33E+00	1,46E+00	1,42E+00	1,50E+00	1,46E+00
681,43	1,59E+00	1,41E+00	1,50E+00	1,60E+00	1,34E+00	1,47E+00	1,42E+00	1,51E+00	1,47E+00
683,93	1,60E+00	1,42E+00	1,51E+00	1,61E+00	1,35E+00	1,48E+00	1,43E+00	1,52E+00	1,47E+00
686,43	1,60E+00	1,43E+00	1,52E+00	1,62E+00	1,36E+00	1,49E+00	1,44E+00	1,52E+00	1,48E+00
688,93	1,61E+00	1,44E+00	1,53E+00	1,63E+00	1,36E+00	1,49E+00	1,44E+00	1,53E+00	1,49E+00
691,43	1,62E+00	1,44E+00	1,53E+00	1,63E+00	1,37E+00	1,50E+00	1,45E+00	1,54E+00	1,49E+00
693,93	1,63E+00	1,45E+00	1,54E+00	1,64E+00	1,38E+00	1,51E+00	1,46E+00	1,55E+00	1,50E+00
696,43	1,64E+00	1,46E+00	1,55E+00	1,65E+00	1,39E+00	1,52E+00	1,46E+00	1,55E+00	1,51E+00
698,93	1,65E+00	1,47E+00	1,56E+00	1,66E+00	1,39E+00	1,53E+00	1,47E+00	1,56E+00	1,52E+00
701,43	1,65E+00	1,48E+00	1,57E+00	1,67E+00	1,40E+00	1,53E+00	1,48E+00	1,57E+00	1,52E+00
703,93	1,66E+00	1,49E+00	1,57E+00	1,68E+00	1,41E+00	1,54E+00	1,48E+00	1,58E+00	1,53E+00
706,43	1,67E+00	1,49E+00	1,58E+00	1,68E+00	1,42E+00	1,55E+00	1,49E+00	1,58E+00	1,54E+00
708,93	1,68E+00	1,50E+00	1,59E+00	1,69E+00	1,42E+00	1,56E+00	1,50E+00	1,59E+00	1,54E+00
711,43	1,69E+00	1,51E+00	1,60E+00	1,70E+00	1,43E+00	1,57E+00	1,50E+00	1,60E+00	1,55E+00
713,93	1,70E+00	1,52E+00	1,61E+00	1,71E+00	1,44E+00	1,57E+00	1,51E+00	1,61E+00	1,56E+00
716,43	1,70E+00	1,52E+00	1,61E+00	1,72E+00	1,45E+00	1,58E+00	1,52E+00	1,62E+00	1,57E+00
718,93	1,71E+00	1,53E+00	1,62E+00	1,73E+00	1,46E+00	1,59E+00	1,52E+00	1,62E+00	1,57E+00
721,43	1,72E+00	1,54E+00	1,63E+00	1,74E+00	1,46E+00	1,60E+00	1,53E+00	1,63E+00	1,58E+00
723,93	1,73E+00	1,55E+00	1,64E+00	1,74E+00	1,47E+00	1,61E+00	1,54E+00	1,64E+00	1,59E+00
726,43	1,74E+00	1,56E+00	1,65E+00	1,75E+00	1,48E+00	1,62E+00	1,54E+00	1,65E+00	1,60E+00
728,93	1,75E+00	1,56E+00	1,66E+00	1,76E+00	1,49E+00	1,62E+00	1,55E+00	1,66E+00	1,60E+00
731,43	1,76E+00	1,57E+00	1,66E+00	1,77E+00	1,50E+00	1,63E+00	1,56E+00	1,67E+00	1,61E+00
733,93	1,77E+00	1,58E+00	1,67E+00	1,78E+00	1,50E+00	1,64E+00	1,56E+00	1,67E+00	1,62E+00
736,43	1,77E+00	1,59E+00	1,68E+00	1,79E+00	1,51E+00	1,65E+00	1,57E+00	1,68E+00	1,63E+00
738,93	1,78E+00	1,60E+00	1,69E+00	1,80E+00	1,52E+00	1,66E+00	1,58E+00	1,69E+00	1,63E+00
741,43	1,79E+00	1,61E+00	1,70E+00	1,81E+00	1,53E+00	1,67E+00	1,59E+00	1,70E+00	1,64E+00
743,93	1,80E+00	1,61E+00	1,71E+00	1,81E+00	1,54E+00	1,68E+00	1,59E+00	1,71E+00	1,65E+00
746,43	1,81E+00	1,62E+00	1,72E+00	1,82E+00	1,55E+00	1,68E+00	1,60E+00	1,71E+00	1,66E+00
748,93	1,82E+00	1,63E+00	1,72E+00	1,83E+00	1,55E+00	1,69E+00	1,61E+00	1,72E+00	1,66E+00
751,43	1,83E+00	1,64E+00	1,73E+00	1,84E+00	1,56E+00	1,70E+00	1,61E+00	1,73E+00	1,67E+00
753,93	1,84E+00	1,65E+00	1,74E+00	1,85E+00	1,57E+00	1,71E+00	1,62E+00	1,74E+00	1,68E+00
756,43	1,84E+00	1,66E+00	1,75E+00	1,86E+00	1,58E+00	1,72E+00	1,63E+00	1,75E+00	1,69E+00
758,93	1,85E+00	1,66E+00	1,76E+00	1,87E+00	1,59E+00	1,73E+00	1,64E+00	1,76E+00	1,70E+00
761,43	1,86E+00	1,67E+00	1,77E+00	1,88E+00	1,60E+00	1,74E+00	1,64E+00	1,76E+00	1,70E+00
763,93	1,87E+00	1,68E+00	1,78E+00	1,89E+00	1,60E+00	1,75E+00	1,65E+00	1,77E+00	1,71E+00
766,43	1,88E+00	1,69E+00	1,79E+00	1,90E+00	1,61E+00	1,76E+00	1,66E+00	1,78E+00	1,72E+00
768,93	1,89E+00	1,70E+00	1,79E+00	1,91E+00	1,62E+00	1,77E+00	1,67E+00	1,78E+00	1,73E+00
771,43	1,90E+00	1,71E+00	1,80E+00	1,92E+00	1,63E+00	1,77E+00	1,67E+00	1,79E+00	1,73E+00
773,93	1,91E+00	1,71E+00	1,81E+00	1,93E+00	1,64E+00	1,78E+00	1,68E+00	1,80E+00	1,74E+00
776,43	1,92E+00	1,72E+00	1,82E+00	1,94E+00	1,65E+00	1,79E+00	1,69E+00	1,81E+00	1,75E+00
778,93	1,92E+00	1,73E+00	1,83E+00	1,95E+00	1,66E+00	1,80E+00	1,70E+00	1,81E+00	1,75E+00
781,43	1,93E+00	1,74E+00	1,84E+00	1,96E+00	1,66E+00	1,81E+00	1,71E+00	1,82E+00	1,76E+00
783,93	1,94E+00	1,75E+00	1,85E+00	1,97E+00	1,67E+00	1,82E+00	1,71E+00	1,82E+00	1,77E+00
786,43	1,95E+00	1,76E+00	1,85E+00	1,98E+00	1,68E+00	1,83E+00	1,72E+00	1,83E+00	1,78E+00
788,93	1,96E+00	1,77E+00	1,86E+00	1,99E+00	1,69E+00	1,84E+00	1,73E+00	1,84E+00	1,78E+00
791,43	1,97E+00	1,78E+00	1,87E+00	2,00E+00	1,70E+00	1,85E+00	1,74E+00	1,84E+00	1,79E+00
793,93	1,98E+00	1,78E+00	1,88E+00	2,01E+00	1,71E+00	1,86E+00	1,75E+00	1,85E+00	1,80E+00
796,43	1,99E+00	1,79E+00	1,89E+00	2,02E+00	1,72E+00	1,87E+00	1,75E+00	1,85E+00	1,80E+00
798,93	2,00E+00	1,80E+00	1,90E+00	2,03E+00	1,73E+00	1,88E+00	1,76E+00	1,86E+00	1,81E+00
801,43	2,00E+00	1,81E+00	1,90E+00	2,04E+00	1,73E+00	1,88E+00	1,77E+00	1,86E+00	1,82E+00

Tabelle 69: Thermischer Ausdehnungskoeffizient der mit 20 Vol.-% zylindrischem Porosierungsmittel porosierten Probe in x-, y- und z-Richtung, gemessen in Abhängigkeit der Temperatur. Aus je 2 Werten wurde ein der Mittelwert gebildet.

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
21,43	2,74E-02	1,89E-02	2,32E-02	1,75E-02	2,23E-02	1,99E-02	2,26E-02	2,28E-02	2,27E-02
23,93	1,13E-02	9,70E-03	1,05E-02	1,29E-02	1,36E-02	1,33E-02	1,67E-02	1,52E-02	1,60E-02
26,43	-3,85E-04	-5,35E-03	-2,87E-03	6,83E-04	9,35E-04	8,09E-04	6,35E-03	5,26E-03	5,81E-03
28,93	6,72E-04	-5,91E-02	-2,92E-02	9,86E-04	2,62E-04	6,24E-04	7,12E-03	6,60E-03	6,86E-03
31,43	1,26E-02	-4,96E-02	-1,85E-02	1,13E-02	9,88E-03	1,06E-02	1,87E-02	1,96E-02	1,92E-02
33,93	2,24E-02	-4,27E-02	-1,02E-02	2,04E-02	1,82E-02	1,93E-02	2,86E-02	3,12E-02	2,99E-02
36,43	3,14E-02	-4,08E-02	-4,70E-03	2,84E-02	2,54E-02	2,69E-02	3,71E-02	4,18E-02	3,95E-02
38,93	3,98E-02	-3,40E-02	2,89E-03	3,63E-02	3,30E-02	3,46E-02	4,54E-02	5,26E-02	4,90E-02
41,43	4,77E-02	-2,81E-02	9,84E-03	4,39E-02	3,96E-02	4,18E-02	5,32E-02	6,35E-02	5,83E-02
43,93	5,57E-02	-2,19E-02	1,69E-02	5,14E-02	4,62E-02	4,88E-02	6,11E-02	7,46E-02	6,78E-02
46,43	6,30E-02	-1,64E-02	2,33E-02	5,83E-02	5,23E-02	5,53E-02	6,80E-02	8,54E-02	7,67E-02
48,93	7,03E-02	-1,08E-02	2,98E-02	6,52E-02	5,84E-02	6,18E-02	7,53E-02	9,56E-02	8,54E-02
51,43	7,71E-02	-5,47E-03	3,58E-02	7,19E-02	6,46E-02	6,82E-02	8,23E-02	1,04E-01	9,33E-02
53,93	8,38E-02	-1,77E-04	4,18E-02	7,85E-02	7,05E-02	7,45E-02	8,91E-02	1,13E-01	1,01E-01
56,43	9,02E-02	4,72E-03	4,74E-02	8,48E-02	7,58E-02	8,03E-02	9,56E-02	1,21E-01	1,08E-01
58,93	9,63E-02	9,10E-03	5,27E-02	9,11E-02	8,08E-02	8,60E-02	1,02E-01	1,29E-01	1,16E-01
61,43	1,02E-01	1,41E-02	5,82E-02	9,72E-02	8,65E-02	9,19E-02	1,09E-01	1,37E-01	1,23E-01
63,93	1,08E-01	1,86E-02	6,33E-02	1,03E-01	9,17E-02	9,72E-02	1,15E-01	1,45E-01	1,30E-01
66,43	1,14E-01	2,24E-02	6,80E-02	1,08E-01	9,66E-02	1,02E-01	1,21E-01	1,52E-01	1,36E-01
68,93	1,19E-01	2,70E-02	7,32E-02	1,14E-01	1,02E-01	1,08E-01	1,27E-01	1,60E-01	1,43E-01
71,43	1,23E-01	2,96E-02	7,64E-02	1,17E-01	1,05E-01	1,11E-01	1,31E-01	1,65E-01	1,48E-01
73,93	1,27E-01	3,21E-02	7,95E-02	1,21E-01	1,09E-01	1,15E-01	1,35E-01	1,70E-01	1,53E-01
76,43	1,30E-01	3,45E-02	8,22E-02	1,25E-01	1,12E-01	1,18E-01	1,38E-01	1,75E-01	1,56E-01
78,93	1,34E-01	3,80E-02	8,61E-02	1,30E-01	1,16E-01	1,23E-01	1,43E-01	1,81E-01	1,62E-01
81,43	1,38E-01	4,19E-02	9,02E-02	1,35E-01	1,20E-01	1,27E-01	1,48E-01	1,87E-01	1,67E-01
83,93	1,42E-01	4,49E-02	9,34E-02	1,39E-01	1,23E-01	1,31E-01	1,52E-01	1,91E-01	1,71E-01
86,43	1,45E-01	4,70E-02	9,60E-02	1,43E-01	1,26E-01	1,35E-01	1,55E-01	1,95E-01	1,75E-01
88,93	1,48E-01	4,91E-02	9,84E-02	1,45E-01	1,29E-01	1,37E-01	1,59E-01	1,99E-01	1,79E-01
91,43	1,51E-01	5,21E-02	1,01E-01	1,50E-01	1,33E-01	1,41E-01	1,62E-01	2,03E-01	1,82E-01
93,93	1,52E-01	5,18E-02	1,02E-01	1,51E-01	1,34E-01	1,42E-01	1,63E-01	2,06E-01	1,84E-01
96,43	1,54E-01	5,34E-02	1,04E-01	1,54E-01	1,36E-01	1,45E-01	1,65E-01	2,11E-01	1,88E-01
98,93	1,60E-01	5,93E-02	1,10E-01	1,62E-01	1,42E-01	1,52E-01	1,72E-01	2,15E-01	1,93E-01
101,43	1,61E-01	5,93E-02	1,10E-01	1,64E-01	1,44E-01	1,54E-01	1,73E-01	2,17E-01	1,95E-01
103,93	1,64E-01	6,12E-02	1,12E-01	1,67E-01	1,46E-01	1,57E-01	1,76E-01	2,20E-01	1,98E-01
106,43	1,66E-01	6,21E-02	1,14E-01	1,70E-01	1,48E-01	1,59E-01	1,78E-01	2,23E-01	2,01E-01
108,93	1,68E-01	6,35E-02	1,16E-01	1,73E-01	1,50E-01	1,62E-01	1,81E-01	2,24E-01	2,02E-01
111,43	1,68E-01	6,08E-02	1,15E-01	1,74E-01	1,49E-01	1,61E-01	1,81E-01	2,26E-01	2,03E-01
113,93	1,73E-01	6,46E-02	1,19E-01	1,80E-01	1,55E-01	1,67E-01	1,87E-01	2,30E-01	2,08E-01
116,43	1,79E-01	7,48E-02	1,27E-01	1,90E-01	1,66E-01	1,78E-01	1,93E-01	2,34E-01	2,14E-01
118,93	1,84E-01	8,16E-02	1,33E-01	1,96E-01	1,74E-01	1,85E-01	1,99E-01	2,38E-01	2,19E-01
121,43	1,87E-01	8,53E-02	1,36E-01	2,01E-01	1,80E-01	1,90E-01	2,05E-01	2,41E-01	2,23E-01
123,93	1,91E-01	9,01E-02	1,40E-01	2,06E-01	1,85E-01	1,96E-01	2,09E-01	2,45E-01	2,27E-01
126,43	1,94E-01	9,29E-02	1,43E-01	2,09E-01	1,89E-01	1,99E-01	2,12E-01	2,48E-01	2,30E-01
128,93	1,97E-01	9,48E-02	1,46E-01	2,13E-01	1,93E-01	2,03E-01	2,15E-01	2,52E-01	2,33E-01
131,43	2,00E-01	9,65E-02	1,48E-01	2,16E-01	1,97E-01	2,07E-01	2,17E-01	2,55E-01	2,36E-01
133,93	2,02E-01	9,78E-02	1,50E-01	2,20E-01	2,01E-01	2,10E-01	2,19E-01	2,57E-01	2,38E-01
136,43	2,06E-01	9,97E-02	1,53E-01	2,23E-01	2,04E-01	2,14E-01	2,21E-01	2,61E-01	2,41E-01
138,93	2,09E-01	1,02E-01	1,56E-01	2,27E-01	2,08E-01	2,18E-01	2,24E-01	2,65E-01	2,44E-01
141,43	2,11E-01	1,03E-01	1,57E-01	2,29E-01	2,11E-01	2,20E-01	2,25E-01	2,67E-01	2,46E-01
143,93	2,14E-01	1,05E-01	1,60E-01	2,33E-01	2,14E-01	2,23E-01	2,27E-01	2,70E-01	2,49E-01
146,43	2,17E-01	1,06E-01	1,61E-01	2,35E-01	2,16E-01	2,26E-01	2,28E-01	2,73E-01	2,51E-01
148,93	2,20E-01	1,08E-01	1,64E-01	2,37E-01	2,19E-01	2,28E-01	2,31E-01	2,76E-01	2,53E-01
151,43	2,22E-01	1,10E-01	1,66E-01	2,39E-01	2,21E-01	2,30E-01	2,32E-01	2,79E-01	2,55E-01
153,93	2,24E-01	1,11E-01	1,68E-01	2,42E-01	2,23E-01	2,32E-01	2,34E-01	2,81E-01	2,58E-01
156,43	2,27E-01	1,13E-01	1,70E-01	2,44E-01	2,26E-01	2,35E-01	2,37E-01	2,84E-01	2,60E-01
158,93	2,29E-01	1,14E-01	1,71E-01	2,46E-01	2,27E-01	2,36E-01	2,38E-01	2,86E-01	2,62E-01
161,43	2,31E-01	1,15E-01	1,73E-01	2,48E-01	2,29E-01	2,38E-01	2,40E-01	2,89E-01	2,64E-01
163,93	2,34E-01	1,17E-01	1,76E-01	2,50E-01	2,31E-01	2,41E-01	2,41E-01	2,91E-01	2,66E-01
166,43	2,36E-01	1,18E-01	1,77E-01	2,52E-01	2,32E-01	2,42E-01	2,42E-01	2,93E-01	2,68E-01



# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
168,93	2,39E-01	1,19E-01	1,79E-01	2,54E-01	2,34E-01	2,44E-01	2,44E-01	2,95E-01	2,70E-01
171,43	2,40E-01	1,20E-01	1,80E-01	2,55E-01	2,35E-01	2,45E-01	2,45E-01	2,97E-01	2,71E-01
173,93	2,42E-01	1,21E-01	1,81E-01	2,55E-01	2,35E-01	2,45E-01	2,47E-01	2,99E-01	2,73E-01
176,43	2,44E-01	1,22E-01	1,83E-01	2,57E-01	2,37E-01	2,47E-01	2,48E-01	3,01E-01	2,75E-01
178,93	2,46E-01	1,23E-01	1,85E-01	2,58E-01	2,38E-01	2,48E-01	2,50E-01	3,03E-01	2,77E-01
181,43	2,48E-01	1,25E-01	1,86E-01	2,59E-01	2,40E-01	2,49E-01	2,53E-01	3,05E-01	2,79E-01
183,93	2,49E-01	1,23E-01	1,86E-01	2,59E-01	2,40E-01	2,50E-01	2,54E-01	3,06E-01	2,80E-01
186,43	2,51E-01	1,25E-01	1,88E-01	2,61E-01	2,42E-01	2,51E-01	2,56E-01	3,09E-01	2,82E-01
188,93	2,53E-01	1,26E-01	1,90E-01	2,61E-01	2,43E-01	2,52E-01	2,58E-01	3,11E-01	2,85E-01
191,43	2,55E-01	1,27E-01	1,91E-01	2,62E-01	2,44E-01	2,53E-01	2,60E-01	3,13E-01	2,86E-01
193,93	2,57E-01	1,28E-01	1,93E-01	2,63E-01	2,46E-01	2,54E-01	2,62E-01	3,15E-01	2,89E-01
196,43	2,59E-01	1,27E-01	1,93E-01	2,63E-01	2,43E-01	2,53E-01	2,63E-01	3,17E-01	2,90E-01
198,93	2,62E-01	1,29E-01	1,95E-01	2,65E-01	2,47E-01	2,56E-01	2,66E-01	3,20E-01	2,93E-01
201,43	2,64E-01	1,29E-01	1,97E-01	2,66E-01	2,48E-01	2,57E-01	2,67E-01	3,22E-01	2,95E-01
203,93	2,68E-01	1,31E-01	1,99E-01	2,69E-01	2,51E-01	2,60E-01	2,70E-01	3,26E-01	2,98E-01
206,43	2,70E-01	1,32E-01	2,01E-01	2,70E-01	2,52E-01	2,61E-01	2,72E-01	3,29E-01	3,01E-01
208,93	2,73E-01	1,32E-01	2,03E-01	2,73E-01	2,54E-01	2,63E-01	2,75E-01	3,32E-01	3,03E-01
211,43	2,77E-01	1,34E-01	2,06E-01	2,76E-01	2,58E-01	2,67E-01	2,78E-01	3,36E-01	3,07E-01
213,93	2,80E-01	1,36E-01	2,08E-01	2,77E-01	2,59E-01	2,68E-01	2,80E-01	3,39E-01	3,09E-01
216,43	2,82E-01	1,37E-01	2,10E-01	2,79E-01	2,61E-01	2,70E-01	2,82E-01	3,42E-01	3,12E-01
218,93	2,86E-01	1,33E-01	2,10E-01	2,82E-01	2,63E-01	2,73E-01	2,86E-01	3,46E-01	3,16E-01
221,43	2,89E-01	1,35E-01	2,12E-01	2,84E-01	2,65E-01	2,75E-01	2,89E-01	3,49E-01	3,19E-01
223,93	2,93E-01	1,37E-01	2,15E-01	2,87E-01	2,68E-01	2,78E-01	2,93E-01	3,53E-01	3,23E-01
226,43	2,97E-01	1,40E-01	2,18E-01	2,90E-01	2,71E-01	2,81E-01	2,97E-01	3,58E-01	3,27E-01
228,93	3,01E-01	1,42E-01	2,22E-01	2,94E-01	2,74E-01	2,84E-01	3,01E-01	3,62E-01	3,31E-01
231,43	3,05E-01	1,44E-01	2,24E-01	2,96E-01	2,76E-01	2,86E-01	3,05E-01	3,66E-01	3,35E-01
233,93	3,08E-01	1,46E-01	2,27E-01	3,00E-01	2,79E-01	2,89E-01	3,08E-01	3,70E-01	3,39E-01
236,43	3,12E-01	1,48E-01	2,30E-01	3,03E-01	2,82E-01	2,92E-01	3,12E-01	3,74E-01	3,43E-01
238,93	3,16E-01	1,50E-01	2,33E-01	3,06E-01	2,84E-01	2,95E-01	3,15E-01	3,78E-01	3,47E-01
241,43	3,20E-01	1,52E-01	2,36E-01	3,09E-01	2,86E-01	2,98E-01	3,19E-01	3,82E-01	3,51E-01
243,93	3,24E-01	1,55E-01	2,40E-01	3,13E-01	2,90E-01	3,01E-01	3,22E-01	3,87E-01	3,55E-01
246,43	3,29E-01	1,58E-01	2,43E-01	3,16E-01	2,93E-01	3,05E-01	3,26E-01	3,92E-01	3,59E-01
248,93	3,33E-01	1,61E-01	2,47E-01	3,20E-01	2,96E-01	3,08E-01	3,31E-01	3,97E-01	3,64E-01
251,43	3,38E-01	1,63E-01	2,51E-01	3,24E-01	2,99E-01	3,12E-01	3,36E-01	4,01E-01	3,69E-01
253,93	3,43E-01	1,67E-01	2,55E-01	3,27E-01	3,03E-01	3,15E-01	3,39E-01	4,06E-01	3,73E-01
256,43	3,47E-01	1,69E-01	2,58E-01	3,31E-01	3,06E-01	3,19E-01	3,44E-01	4,11E-01	3,77E-01
258,93	3,52E-01	1,72E-01	2,62E-01	3,35E-01	3,09E-01	3,22E-01	3,48E-01	4,16E-01	3,82E-01
261,43	3,56E-01	1,75E-01	2,65E-01	3,39E-01	3,12E-01	3,26E-01	3,52E-01	4,21E-01	3,86E-01
263,93	3,62E-01	1,79E-01	2,70E-01	3,43E-01	3,17E-01	3,30E-01	3,58E-01	4,27E-01	3,92E-01
266,43	3,66E-01	1,81E-01	2,74E-01	3,46E-01	3,20E-01	3,33E-01	3,61E-01	4,31E-01	3,96E-01
268,93	3,72E-01	1,85E-01	2,78E-01	3,51E-01	3,25E-01	3,38E-01	3,66E-01	4,37E-01	4,02E-01
271,43	3,77E-01	1,88E-01	2,83E-01	3,55E-01	3,29E-01	3,42E-01	3,71E-01	4,43E-01	4,07E-01
273,93	3,83E-01	1,92E-01	2,87E-01	3,59E-01	3,33E-01	3,46E-01	3,76E-01	4,49E-01	4,13E-01
276,43	3,88E-01	1,95E-01	2,91E-01	3,64E-01	3,37E-01	3,50E-01	3,81E-01	4,55E-01	4,18E-01
278,93	3,93E-01	1,98E-01	2,96E-01	3,68E-01	3,41E-01	3,54E-01	3,86E-01	4,61E-01	4,23E-01
281,43	3,99E-01	2,02E-01	3,00E-01	3,72E-01	3,45E-01	3,59E-01	3,92E-01	4,67E-01	4,29E-01
283,93	4,04E-01	2,05E-01	3,05E-01	3,77E-01	3,48E-01	3,63E-01	3,96E-01	4,73E-01	4,35E-01
286,43	4,10E-01	2,09E-01	3,09E-01	3,81E-01	3,53E-01	3,67E-01	4,01E-01	4,79E-01	4,40E-01
288,93	4,16E-01	2,13E-01	3,14E-01	3,87E-01	3,57E-01	3,72E-01	4,07E-01	4,86E-01	4,46E-01
291,43	4,21E-01	2,16E-01	3,18E-01	3,91E-01	3,61E-01	3,76E-01	4,10E-01	4,92E-01	4,51E-01
293,93	4,26E-01	2,19E-01	3,23E-01	3,95E-01	3,65E-01	3,80E-01	4,15E-01	4,99E-01	4,57E-01
296,43	4,32E-01	2,24E-01	3,28E-01	4,01E-01	3,70E-01	3,85E-01	4,20E-01	5,06E-01	4,63E-01
298,93	4,38E-01	2,28E-01	3,33E-01	4,05E-01	3,74E-01	3,90E-01	4,25E-01	5,14E-01	4,69E-01
301,43	4,44E-01	2,31E-01	3,37E-01	4,10E-01	3,79E-01	3,94E-01	4,30E-01	5,21E-01	4,75E-01
303,93	4,49E-01	2,35E-01	3,42E-01	4,15E-01	3,83E-01	3,99E-01	4,35E-01	5,28E-01	4,81E-01
306,43	4,55E-01	2,39E-01	3,47E-01	4,20E-01	3,87E-01	4,04E-01	4,40E-01	5,35E-01	4,88E-01
308,93	4,61E-01	2,43E-01	3,52E-01	4,24E-01	3,91E-01	4,08E-01	4,45E-01	5,42E-01	4,94E-01
311,43	4,67E-01	2,47E-01	3,57E-01	4,30E-01	3,96E-01	4,13E-01	4,50E-01	5,50E-01	5,00E-01
313,93	4,73E-01	2,51E-01	3,62E-01	4,35E-01	3,99E-01	4,17E-01	4,55E-01	5,56E-01	5,06E-01
316,43	4,79E-01	2,56E-01	3,68E-01	4,40E-01	4,04E-01	4,22E-01	4,58E-01	5,64E-01	5,11E-01
318,93	4,85E-01	2,60E-01	3,72E-01	4,45E-01	4,09E-01	4,27E-01	4,63E-01	5,71E-01	5,17E-01
321,43	4,91E-01	2,64E-01	3,78E-01	4,51E-01	4,13E-01	4,32E-01	4,69E-01	5,79E-01	5,24E-01
323,93	4,97E-01	2,69E-01	3,83E-01	4,56E-01	4,18E-01	4,37E-01	4,74E-01	5,86E-01	5,30E-01
326,43	5,03E-01	2,73E-01	3,88E-01	4,61E-01	4,23E-01	4,42E-01	4,80E-01	5,92E-01	5,36E-01
328,93	5,09E-01	2,77E-01	3,93E-01	4,66E-01	4,27E-01	4,47E-01	4,84E-01	5,99E-01	5,42E-01

# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
331,43	5,16E-01	2,82E-01	3,99E-01	4,72E-01	4,32E-01	4,52E-01	4,89E-01	6,06E-01	5,48E-01
333,93	5,22E-01	2,86E-01	4,04E-01	4,77E-01	4,36E-01	4,57E-01	4,95E-01	6,12E-01	5,53E-01
336,43	5,27E-01	2,90E-01	4,09E-01	4,81E-01	4,40E-01	4,61E-01	4,99E-01	6,18E-01	5,59E-01
338,93	5,34E-01	2,95E-01	4,14E-01	4,88E-01	4,46E-01	4,67E-01	5,05E-01	6,25E-01	5,65E-01
341,43	5,40E-01	2,99E-01	4,20E-01	4,94E-01	4,51E-01	4,72E-01	5,11E-01	6,32E-01	5,71E-01
343,93	5,47E-01	3,02E-01	4,25E-01	5,00E-01	4,57E-01	4,78E-01	5,16E-01	6,38E-01	5,77E-01
346,43	5,53E-01	3,07E-01	4,30E-01	5,05E-01	4,62E-01	4,84E-01	5,22E-01	6,44E-01	5,83E-01
348,93	5,60E-01	3,12E-01	4,36E-01	5,11E-01	4,67E-01	4,89E-01	5,27E-01	6,50E-01	5,88E-01
351,43	5,67E-01	3,17E-01	4,42E-01	5,17E-01	4,73E-01	4,95E-01	5,34E-01	6,57E-01	5,95E-01
353,93	5,73E-01	3,21E-01	4,47E-01	5,22E-01	4,78E-01	5,00E-01	5,40E-01	6,63E-01	6,01E-01
356,43	5,80E-01	3,25E-01	4,53E-01	5,28E-01	4,83E-01	5,05E-01	5,46E-01	6,69E-01	6,07E-01
358,93	5,86E-01	3,30E-01	4,58E-01	5,33E-01	4,88E-01	5,10E-01	5,51E-01	6,75E-01	6,13E-01
361,43	5,93E-01	3,35E-01	4,64E-01	5,39E-01	4,93E-01	5,16E-01	5,57E-01	6,82E-01	6,20E-01
363,93	5,99E-01	3,40E-01	4,70E-01	5,44E-01	4,98E-01	5,21E-01	5,63E-01	6,88E-01	6,26E-01
366,43	6,06E-01	3,44E-01	4,75E-01	5,50E-01	5,02E-01	5,26E-01	5,68E-01	6,95E-01	6,31E-01
368,93	6,12E-01	3,47E-01	4,80E-01	5,56E-01	5,08E-01	5,32E-01	5,74E-01	7,01E-01	6,38E-01
371,43	6,19E-01	3,52E-01	4,86E-01	5,62E-01	5,13E-01	5,37E-01	5,80E-01	7,07E-01	6,43E-01
373,93	6,26E-01	3,57E-01	4,92E-01	5,67E-01	5,18E-01	5,43E-01	5,85E-01	7,14E-01	6,49E-01
376,43	6,32E-01	3,62E-01	4,97E-01	5,73E-01	5,23E-01	5,48E-01	5,90E-01	7,20E-01	6,55E-01
378,93	6,39E-01	3,67E-01	5,03E-01	5,79E-01	5,28E-01	5,53E-01	5,96E-01	7,26E-01	6,61E-01
381,43	6,46E-01	3,73E-01	5,09E-01	5,85E-01	5,34E-01	5,59E-01	6,02E-01	7,32E-01	6,67E-01
383,93	6,53E-01	3,78E-01	5,15E-01	5,90E-01	5,39E-01	5,65E-01	6,08E-01	7,39E-01	6,74E-01
386,43	6,59E-01	3,82E-01	5,21E-01	5,96E-01	5,44E-01	5,70E-01	6,14E-01	7,45E-01	6,79E-01
388,93	6,66E-01	3,87E-01	5,26E-01	6,01E-01	5,49E-01	5,75E-01	6,20E-01	7,52E-01	6,86E-01
391,43	6,73E-01	3,92E-01	5,33E-01	6,07E-01	5,55E-01	5,81E-01	6,26E-01	7,58E-01	6,92E-01
393,93	6,80E-01	3,98E-01	5,39E-01	6,13E-01	5,61E-01	5,87E-01	6,33E-01	7,65E-01	6,99E-01
396,43	6,86E-01	4,03E-01	5,44E-01	6,19E-01	5,66E-01	5,93E-01	6,38E-01	7,72E-01	7,05E-01
398,93	6,94E-01	4,08E-01	5,51E-01	6,25E-01	5,72E-01	5,99E-01	6,44E-01	7,78E-01	7,11E-01
401,43	7,01E-01	4,13E-01	5,57E-01	6,31E-01	5,77E-01	6,04E-01	6,50E-01	7,85E-01	7,17E-01
403,93	7,08E-01	4,18E-01	5,63E-01	6,37E-01	5,83E-01	6,10E-01	6,56E-01	7,91E-01	7,24E-01
406,43	7,15E-01	4,23E-01	5,69E-01	6,43E-01	5,89E-01	6,16E-01	6,63E-01	7,98E-01	7,30E-01
408,93	7,21E-01	4,27E-01	5,74E-01	6,49E-01	5,93E-01	6,21E-01	6,69E-01	8,04E-01	7,36E-01
411,43	7,29E-01	4,33E-01	5,81E-01	6,55E-01	5,99E-01	6,27E-01	6,75E-01	8,11E-01	7,43E-01
413,93	7,36E-01	4,39E-01	5,87E-01	6,61E-01	6,05E-01	6,33E-01	6,83E-01	8,17E-01	7,50E-01
416,43	7,44E-01	4,45E-01	5,94E-01	6,68E-01	6,12E-01	6,40E-01	6,90E-01	8,24E-01	7,57E-01
418,93	7,50E-01	4,49E-01	6,00E-01	6,73E-01	6,18E-01	6,45E-01	6,96E-01	8,30E-01	7,63E-01
421,43	7,58E-01	4,55E-01	6,06E-01	6,80E-01	6,24E-01	6,52E-01	7,04E-01	8,37E-01	7,70E-01
423,93	7,65E-01	4,60E-01	6,13E-01	6,86E-01	6,29E-01	6,58E-01	7,10E-01	8,43E-01	7,76E-01
426,43	7,72E-01	4,66E-01	6,19E-01	6,92E-01	6,36E-01	6,64E-01	7,15E-01	8,49E-01	7,82E-01
428,93	7,79E-01	4,72E-01	6,26E-01	6,99E-01	6,42E-01	6,70E-01	7,23E-01	8,55E-01	7,89E-01
431,43	7,87E-01	4,78E-01	6,32E-01	7,05E-01	6,48E-01	6,77E-01	7,30E-01	8,61E-01	7,96E-01
433,93	7,94E-01	4,85E-01	6,39E-01	7,12E-01	6,54E-01	6,83E-01	7,38E-01	8,68E-01	8,03E-01
436,43	8,01E-01	4,91E-01	6,46E-01	7,18E-01	6,60E-01	6,89E-01	7,44E-01	8,73E-01	8,09E-01
438,93	8,08E-01	4,97E-01	6,53E-01	7,24E-01	6,66E-01	6,95E-01	7,52E-01	8,79E-01	8,15E-01
441,43	8,16E-01	5,04E-01	6,60E-01	7,31E-01	6,73E-01	7,02E-01	7,59E-01	8,85E-01	8,22E-01
443,93	8,23E-01	5,10E-01	6,67E-01	7,37E-01	6,79E-01	7,08E-01	7,66E-01	8,91E-01	8,29E-01
446,43	8,31E-01	5,16E-01	6,73E-01	7,43E-01	6,85E-01	7,14E-01	7,74E-01	8,97E-01	8,35E-01
448,93	8,39E-01	5,23E-01	6,81E-01	7,50E-01	6,91E-01	7,21E-01	7,82E-01	9,04E-01	8,43E-01
451,43	8,46E-01	5,29E-01	6,88E-01	7,55E-01	6,97E-01	7,26E-01	7,89E-01	9,11E-01	8,50E-01
453,93	8,54E-01	5,36E-01	6,95E-01	7,62E-01	7,04E-01	7,33E-01	7,96E-01	9,18E-01	8,57E-01
456,43	8,62E-01	5,43E-01	7,02E-01	7,69E-01	7,10E-01	7,40E-01	8,04E-01	9,25E-01	8,65E-01
458,93	8,69E-01	5,49E-01	7,09E-01	7,76E-01	7,16E-01	7,46E-01	8,12E-01	9,32E-01	8,72E-01
461,43	8,77E-01	5,56E-01	7,16E-01	7,82E-01	7,22E-01	7,52E-01	8,20E-01	9,39E-01	8,79E-01
463,93	8,85E-01	5,62E-01	7,24E-01	7,90E-01	7,29E-01	7,59E-01	8,28E-01	9,47E-01	8,87E-01
466,43	8,92E-01	5,68E-01	7,30E-01	7,93E-01	7,32E-01	7,63E-01	8,34E-01	9,55E-01	8,95E-01
468,93	8,99E-01	5,74E-01	7,37E-01	8,01E-01	7,38E-01	7,69E-01	8,30E-01	9,62E-01	8,96E-01
471,43	9,08E-01	5,81E-01	7,44E-01	8,08E-01	7,45E-01	7,77E-01	8,40E-01	9,70E-01	9,05E-01
473,93	9,15E-01	5,87E-01	7,51E-01	8,15E-01	7,51E-01	7,83E-01	8,48E-01	9,77E-01	9,13E-01
476,43	9,23E-01	5,95E-01	7,59E-01	8,23E-01	7,58E-01	7,91E-01	8,57E-01	9,85E-01	9,21E-01
478,93	9,31E-01	6,01E-01	7,66E-01	8,30E-01	7,65E-01	7,97E-01	8,64E-01	9,93E-01	9,29E-01
481,43	9,39E-01	6,08E-01	7,74E-01	8,38E-01	7,72E-01	8,05E-01	8,73E-01	1,00E+00	9,37E-01
483,93	9,47E-01	6,15E-01	7,81E-01	8,45E-01	7,78E-01	8,12E-01	8,81E-01	1,01E+00	9,45E-01
486,43	9,55E-01	6,22E-01	7,88E-01	8,52E-01	7,85E-01	8,19E-01	8,89E-01	1,02E+00	9,53E-01
488,93	9,64E-01	6,29E-01	7,96E-01	8,60E-01	7,92E-01	8,26E-01	8,98E-01	1,02E+00	9,61E-01
491,43	9,71E-01	6,36E-01	8,04E-01	8,68E-01	7,99E-01	8,33E-01	9,06E-01	1,03E+00	9,69E-01



# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
493,93	9,80E-01	6,43E-01	8,11E-01	8,75E-01	8,06E-01	8,40E-01	9,14E-01	1,04E+00	9,78E-01
496,43	9,87E-01	6,49E-01	8,18E-01	8,82E-01	8,12E-01	8,47E-01	9,22E-01	1,05E+00	9,85E-01
498,93	9,96E-01	6,56E-01	8,26E-01	8,90E-01	8,20E-01	8,55E-01	9,31E-01	1,06E+00	9,94E-01
501,43	1,00E+00	6,63E-01	8,33E-01	8,98E-01	8,27E-01	8,62E-01	9,40E-01	1,06E+00	1,00E+00
503,93	1,01E+00	6,69E-01	8,41E-01	9,05E-01	8,34E-01	8,70E-01	9,48E-01	1,07E+00	1,01E+00
506,43	1,02E+00	6,77E-01	8,49E-01	9,14E-01	8,41E-01	8,77E-01	9,58E-01	1,08E+00	1,02E+00
508,93	1,03E+00	6,84E-01	8,56E-01	9,21E-01	8,49E-01	8,85E-01	9,66E-01	1,09E+00	1,03E+00
511,43	1,04E+00	6,91E-01	8,64E-01	9,29E-01	8,56E-01	8,93E-01	9,75E-01	1,10E+00	1,04E+00
513,93	1,05E+00	6,98E-01	8,71E-01	9,36E-01	8,63E-01	9,00E-01	9,84E-01	1,11E+00	1,05E+00
516,43	1,05E+00	7,05E-01	8,79E-01	9,45E-01	8,70E-01	9,08E-01	9,93E-01	1,12E+00	1,05E+00
518,93	1,06E+00	7,13E-01	8,87E-01	9,53E-01	8,78E-01	9,15E-01	1,00E+00	1,12E+00	1,06E+00
521,43	1,07E+00	7,21E-01	8,96E-01	9,61E-01	8,86E-01	9,24E-01	1,01E+00	1,13E+00	1,07E+00
523,93	1,08E+00	7,28E-01	9,04E-01	9,70E-01	8,94E-01	9,32E-01	1,02E+00	1,14E+00	1,08E+00
526,43	1,09E+00	7,36E-01	9,12E-01	9,79E-01	9,02E-01	9,41E-01	1,03E+00	1,15E+00	1,09E+00
528,93	1,10E+00	7,45E-01	9,21E-01	9,89E-01	9,11E-01	9,50E-01	1,05E+00	1,16E+00	1,10E+00
531,43	1,11E+00	7,55E-01	9,30E-01	9,99E-01	9,19E-01	9,59E-01	1,06E+00	1,17E+00	1,11E+00
533,93	1,11E+00	7,65E-01	9,40E-01	1,01E+00	9,29E-01	9,69E-01	1,07E+00	1,18E+00	1,12E+00
536,43	1,12E+00	7,74E-01	9,49E-01	1,02E+00	9,38E-01	9,78E-01	1,08E+00	1,19E+00	1,14E+00
538,93	1,13E+00	7,85E-01	9,59E-01	1,03E+00	9,48E-01	9,88E-01	1,09E+00	1,20E+00	1,15E+00
541,43	1,14E+00	7,93E-01	9,68E-01	1,04E+00	9,57E-01	9,97E-01	1,11E+00	1,21E+00	1,16E+00
543,93	1,15E+00	8,03E-01	9,78E-01	1,05E+00	9,66E-01	1,01E+00	1,12E+00	1,22E+00	1,17E+00
546,43	1,16E+00	8,12E-01	9,87E-01	1,06E+00	9,74E-01	1,02E+00	1,12E+00	1,23E+00	1,18E+00
548,93	1,17E+00	8,21E-01	9,96E-01	1,07E+00	9,83E-01	1,02E+00	1,13E+00	1,24E+00	1,19E+00
551,43	1,18E+00	8,29E-01	1,00E+00	1,07E+00	9,91E-01	1,03E+00	1,14E+00	1,25E+00	1,20E+00
553,93	1,19E+00	8,36E-01	1,01E+00	1,08E+00	1,00E+00	1,04E+00	1,15E+00	1,26E+00	1,21E+00
556,43	1,20E+00	8,45E-01	1,02E+00	1,09E+00	1,01E+00	1,05E+00	1,16E+00	1,27E+00	1,22E+00
558,93	1,21E+00	8,53E-01	1,03E+00	1,10E+00	1,02E+00	1,06E+00	1,17E+00	1,28E+00	1,22E+00
561,43	1,22E+00	8,61E-01	1,04E+00	1,11E+00	1,02E+00	1,07E+00	1,18E+00	1,29E+00	1,23E+00
563,93	1,22E+00	8,69E-01	1,05E+00	1,12E+00	1,03E+00	1,07E+00	1,19E+00	1,30E+00	1,24E+00
566,43	1,23E+00	8,77E-01	1,06E+00	1,12E+00	1,04E+00	1,08E+00	1,20E+00	1,31E+00	1,25E+00
568,93	1,24E+00	8,83E-01	1,06E+00	1,13E+00	1,05E+00	1,09E+00	1,20E+00	1,32E+00	1,26E+00
571,43	1,25E+00	8,91E-01	1,07E+00	1,14E+00	1,05E+00	1,10E+00	1,21E+00	1,33E+00	1,27E+00
573,93	1,26E+00	8,98E-01	1,08E+00	1,15E+00	1,06E+00	1,10E+00	1,22E+00	1,34E+00	1,28E+00
576,43	1,27E+00	9,05E-01	1,09E+00	1,15E+00	1,07E+00	1,11E+00	1,23E+00	1,34E+00	1,29E+00
578,93	1,27E+00	9,12E-01	1,09E+00	1,16E+00	1,08E+00	1,12E+00	1,24E+00	1,35E+00	1,30E+00
581,43	1,28E+00	9,20E-01	1,10E+00	1,17E+00	1,08E+00	1,13E+00	1,25E+00	1,36E+00	1,30E+00
583,93	1,28E+00	9,27E-01	1,11E+00	1,18E+00	1,09E+00	1,13E+00	1,26E+00	1,37E+00	1,31E+00
586,43	1,29E+00	9,33E-01	1,11E+00	1,19E+00	1,10E+00	1,14E+00	1,26E+00	1,38E+00	1,32E+00
588,93	1,30E+00	9,40E-01	1,12E+00	1,19E+00	1,10E+00	1,15E+00	1,27E+00	1,39E+00	1,33E+00
591,43	1,31E+00	9,47E-01	1,13E+00	1,20E+00	1,11E+00	1,16E+00	1,28E+00	1,39E+00	1,34E+00
593,93	1,32E+00	9,54E-01	1,14E+00	1,21E+00	1,12E+00	1,16E+00	1,29E+00	1,40E+00	1,35E+00
596,43	1,33E+00	9,61E-01	1,14E+00	1,22E+00	1,13E+00	1,17E+00	1,30E+00	1,41E+00	1,35E+00
598,93	1,34E+00	9,68E-01	1,15E+00	1,22E+00	1,13E+00	1,18E+00	1,31E+00	1,42E+00	1,36E+00
601,43	1,34E+00	9,75E-01	1,16E+00	1,23E+00	1,14E+00	1,18E+00	1,31E+00	1,43E+00	1,37E+00
603,93	1,35E+00	9,83E-01	1,17E+00	1,24E+00	1,15E+00	1,19E+00	1,32E+00	1,44E+00	1,38E+00
606,43	1,36E+00	9,90E-01	1,18E+00	1,24E+00	1,15E+00	1,20E+00	1,33E+00	1,45E+00	1,39E+00
608,93	1,37E+00	9,97E-01	1,18E+00	1,25E+00	1,16E+00	1,21E+00	1,34E+00	1,45E+00	1,40E+00
611,43	1,38E+00	1,00E+00	1,19E+00	1,26E+00	1,17E+00	1,21E+00	1,34E+00	1,46E+00	1,40E+00
613,93	1,39E+00	1,01E+00	1,20E+00	1,27E+00	1,18E+00	1,22E+00	1,35E+00	1,47E+00	1,41E+00
616,43	1,39E+00	1,02E+00	1,21E+00	1,27E+00	1,18E+00	1,23E+00	1,36E+00	1,48E+00	1,42E+00
618,93	1,40E+00	1,03E+00	1,22E+00	1,28E+00	1,19E+00	1,24E+00	1,37E+00	1,49E+00	1,43E+00
621,43	1,41E+00	1,03E+00	1,22E+00	1,29E+00	1,20E+00	1,24E+00	1,38E+00	1,50E+00	1,44E+00
623,93	1,42E+00	1,04E+00	1,23E+00	1,30E+00	1,21E+00	1,25E+00	1,38E+00	1,51E+00	1,44E+00
626,43	1,43E+00	1,05E+00	1,24E+00	1,30E+00	1,22E+00	1,26E+00	1,39E+00	1,51E+00	1,45E+00
628,93	1,44E+00	1,06E+00	1,25E+00	1,31E+00	1,22E+00	1,27E+00	1,40E+00	1,52E+00	1,46E+00
631,43	1,45E+00	1,06E+00	1,26E+00	1,32E+00	1,23E+00	1,27E+00	1,41E+00	1,53E+00	1,47E+00
633,93	1,46E+00	1,07E+00	1,26E+00	1,32E+00	1,24E+00	1,28E+00	1,42E+00	1,54E+00	1,48E+00
636,43	1,46E+00	1,08E+00	1,27E+00	1,33E+00	1,24E+00	1,29E+00	1,42E+00	1,55E+00	1,49E+00
638,93	1,47E+00	1,09E+00	1,28E+00	1,34E+00	1,25E+00	1,30E+00	1,43E+00	1,56E+00	1,49E+00
641,43	1,48E+00	1,09E+00	1,29E+00	1,35E+00	1,26E+00	1,30E+00	1,44E+00	1,57E+00	1,50E+00
643,93	1,49E+00	1,10E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,27E+00	1,31E+00	1,45E+00	1,58E+00	1,51E+00
646,43	1,50E+00	1,11E+00	1,30E+00	1,36E+00	1,27E+00	1,32E+00	1,46E+00	1,58E+00	1,52E+00
648,93	1,51E+00	1,12E+00	1,31E+00	1,37E+00	1,28E+00	1,32E+00	1,46E+00	1,59E+00	1,53E+00
651,43	1,51E+00	1,12E+00	1,32E+00	1,38E+00	1,29E+00	1,33E+00	1,47E+00	1,60E+00	1,54E+00
653,93	1,52E+00	1,13E+00	1,33E+00	1,38E+00	1,29E+00	1,34E+00	1,48E+00	1,61E+00	1,55E+00

# Anlage / Anhang

Richtung	x-Achse			y-Achse			z-Achse		
Temperatur	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert	dL/L <sub>0</sub>	dL/L <sub>0</sub>	Mittelwert
[°C]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]	[10 <sup>-6</sup> ·1/K]
656,43	1,53E+00	1,14E+00	1,34E+00	1,39E+00	1,30E+00	1,35E+00	1,49E+00	1,62E+00	1,55E+00
658,93	1,54E+00	1,15E+00	1,34E+00	1,40E+00	1,31E+00	1,35E+00	1,50E+00	1,63E+00	1,56E+00
661,43	1,55E+00	1,16E+00	1,35E+00	1,41E+00	1,32E+00	1,36E+00	1,50E+00	1,64E+00	1,57E+00
663,93	1,55E+00	1,16E+00	1,36E+00	1,41E+00	1,32E+00	1,37E+00	1,51E+00	1,64E+00	1,58E+00
666,43	1,56E+00	1,17E+00	1,37E+00	1,42E+00	1,33E+00	1,38E+00	1,52E+00	1,65E+00	1,59E+00
668,93	1,57E+00	1,18E+00	1,37E+00	1,43E+00	1,34E+00	1,38E+00	1,53E+00	1,66E+00	1,60E+00
671,43	1,58E+00	1,19E+00	1,38E+00	1,44E+00	1,34E+00	1,39E+00	1,54E+00	1,67E+00	1,61E+00
673,93	1,59E+00	1,19E+00	1,39E+00	1,44E+00	1,35E+00	1,40E+00	1,55E+00	1,68E+00	1,61E+00
676,43	1,60E+00	1,20E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,36E+00	1,40E+00	1,56E+00	1,69E+00	1,62E+00
678,93	1,61E+00	1,20E+00	1,41E+00	1,46E+00	1,37E+00	1,41E+00	1,56E+00	1,70E+00	1,63E+00
681,43	1,61E+00	1,21E+00	1,41E+00	1,46E+00	1,37E+00	1,42E+00	1,57E+00	1,71E+00	1,64E+00
683,93	1,62E+00	1,22E+00	1,42E+00	1,47E+00	1,38E+00	1,43E+00	1,58E+00	1,72E+00	1,65E+00
686,43	1,63E+00	1,23E+00	1,43E+00	1,48E+00	1,39E+00	1,43E+00	1,59E+00	1,73E+00	1,66E+00
688,93	1,64E+00	1,23E+00	1,44E+00	1,49E+00	1,40E+00	1,44E+00	1,60E+00	1,73E+00	1,67E+00
691,43	1,65E+00	1,24E+00	1,44E+00	1,49E+00	1,40E+00	1,45E+00	1,61E+00	1,74E+00	1,67E+00
693,93	1,66E+00	1,25E+00	1,45E+00	1,50E+00	1,41E+00	1,46E+00	1,61E+00	1,75E+00	1,68E+00
696,43	1,67E+00	1,25E+00	1,46E+00	1,51E+00	1,42E+00	1,46E+00	1,62E+00	1,76E+00	1,69E+00
698,93	1,68E+00	1,26E+00	1,47E+00	1,52E+00	1,43E+00	1,47E+00	1,63E+00	1,77E+00	1,70E+00
701,43	1,69E+00	1,27E+00	1,48E+00	1,52E+00	1,43E+00	1,48E+00	1,64E+00	1,78E+00	1,71E+00
703,93	1,69E+00	1,28E+00	1,49E+00	1,53E+00	1,44E+00	1,49E+00	1,65E+00	1,79E+00	1,72E+00
706,43	1,70E+00	1,28E+00	1,49E+00	1,54E+00	1,45E+00	1,49E+00	1,66E+00	1,80E+00	1,73E+00
708,93	1,71E+00	1,29E+00	1,50E+00	1,55E+00	1,46E+00	1,50E+00	1,67E+00	1,81E+00	1,74E+00
711,43	1,72E+00	1,30E+00	1,51E+00	1,55E+00	1,46E+00	1,51E+00	1,67E+00	1,82E+00	1,74E+00
713,93	1,73E+00	1,31E+00	1,52E+00	1,56E+00	1,47E+00	1,51E+00	1,68E+00	1,82E+00	1,75E+00
716,43	1,74E+00	1,31E+00	1,53E+00	1,57E+00	1,48E+00	1,52E+00	1,69E+00	1,83E+00	1,76E+00
718,93	1,75E+00	1,32E+00	1,54E+00	1,58E+00	1,49E+00	1,53E+00	1,70E+00	1,84E+00	1,77E+00
721,43	1,76E+00	1,33E+00	1,54E+00	1,58E+00	1,49E+00	1,54E+00	1,71E+00	1,85E+00	1,78E+00
723,93	1,76E+00	1,34E+00	1,55E+00	1,59E+00	1,50E+00	1,55E+00	1,72E+00	1,86E+00	1,79E+00
726,43	1,77E+00	1,35E+00	1,56E+00	1,60E+00	1,51E+00	1,55E+00	1,73E+00	1,87E+00	1,80E+00
728,93	1,78E+00	1,36E+00	1,57E+00	1,61E+00	1,52E+00	1,56E+00	1,73E+00	1,88E+00	1,81E+00
731,43	1,79E+00	1,36E+00	1,58E+00	1,61E+00	1,52E+00	1,57E+00	1,74E+00	1,89E+00	1,82E+00
733,93	1,80E+00	1,37E+00	1,59E+00	1,62E+00	1,53E+00	1,58E+00	1,75E+00	1,90E+00	1,83E+00
736,43	1,81E+00	1,38E+00	1,59E+00	1,63E+00	1,54E+00	1,58E+00	1,76E+00	1,91E+00	1,83E+00
738,93	1,82E+00	1,39E+00	1,60E+00	1,64E+00	1,55E+00	1,59E+00	1,77E+00	1,92E+00	1,84E+00
741,43	1,83E+00	1,40E+00	1,61E+00	1,64E+00	1,56E+00	1,60E+00	1,78E+00	1,93E+00	1,85E+00
743,93	1,84E+00	1,40E+00	1,62E+00	1,65E+00	1,56E+00	1,61E+00	1,79E+00	1,94E+00	1,86E+00
746,43	1,85E+00	1,41E+00	1,63E+00	1,66E+00	1,57E+00	1,62E+00	1,80E+00	1,95E+00	1,87E+00
748,93	1,85E+00	1,42E+00	1,64E+00	1,67E+00	1,58E+00	1,62E+00	1,80E+00	1,95E+00	1,88E+00
751,43	1,86E+00	1,43E+00	1,65E+00	1,67E+00	1,59E+00	1,63E+00	1,81E+00	1,96E+00	1,89E+00
753,93	1,87E+00	1,44E+00	1,66E+00	1,68E+00	1,60E+00	1,64E+00	1,82E+00	1,97E+00	1,90E+00
756,43	1,88E+00	1,45E+00	1,67E+00	1,69E+00	1,60E+00	1,65E+00	1,83E+00	1,98E+00	1,91E+00
758,93	1,89E+00	1,46E+00	1,67E+00	1,70E+00	1,61E+00	1,65E+00	1,84E+00	1,99E+00	1,92E+00
761,43	1,90E+00	1,47E+00	1,68E+00	1,70E+00	1,62E+00	1,66E+00	1,85E+00	2,00E+00	1,93E+00
763,93	1,91E+00	1,47E+00	1,69E+00	1,71E+00	1,63E+00	1,67E+00	1,86E+00	2,01E+00	1,94E+00
766,43	1,92E+00	1,48E+00	1,70E+00	1,72E+00	1,64E+00	1,68E+00	1,87E+00	2,02E+00	1,94E+00
768,93	1,93E+00	1,49E+00	1,71E+00	1,73E+00	1,65E+00	1,69E+00	1,88E+00	2,03E+00	1,95E+00
771,43	1,94E+00	1,50E+00	1,72E+00	1,73E+00	1,65E+00	1,69E+00	1,89E+00	2,04E+00	1,96E+00
773,93	1,95E+00	1,51E+00	1,73E+00	1,74E+00	1,66E+00	1,70E+00	1,89E+00	2,05E+00	1,97E+00
776,43	1,96E+00	1,52E+00	1,74E+00	1,75E+00	1,67E+00	1,71E+00	1,90E+00	2,06E+00	1,98E+00
778,93	1,97E+00	1,53E+00	1,75E+00	1,76E+00	1,68E+00	1,72E+00	1,91E+00	2,07E+00	1,99E+00
781,43	1,98E+00	1,54E+00	1,76E+00	1,77E+00	1,69E+00	1,73E+00	1,92E+00	2,08E+00	2,00E+00
783,93	1,99E+00	1,54E+00	1,76E+00	1,77E+00	1,70E+00	1,73E+00	1,93E+00	2,09E+00	2,01E+00
786,43	2,00E+00	1,55E+00	1,77E+00	1,78E+00	1,71E+00	1,74E+00	1,94E+00	2,10E+00	2,02E+00
788,93	2,00E+00	1,56E+00	1,78E+00	1,79E+00	1,71E+00	1,75E+00	1,95E+00	2,11E+00	2,03E+00
791,43	2,01E+00	1,57E+00	1,79E+00	1,79E+00	1,72E+00	1,76E+00	1,96E+00	2,12E+00	2,04E+00
793,93	2,02E+00	1,58E+00	1,80E+00	1,80E+00	1,73E+00	1,77E+00	1,97E+00	2,13E+00	2,05E+00
796,43	2,03E+00	1,58E+00	1,81E+00	1,81E+00	1,74E+00	1,77E+00	1,98E+00	2,14E+00	2,06E+00
798,93	2,04E+00	1,59E+00	1,82E+00	1,82E+00	1,75E+00	1,78E+00	1,99E+00	2,15E+00	2,07E+00
801,43	2,05E+00	1,60E+00	1,82E+00	1,82E+00	1,75E+00	1,79E+00	1,99E+00	2,15E+00	2,07E+00

Tabelle 70: STA-Ergebnisse der einfachen Thermoschockversuche für ungeschockte Proben mit der Temperaturdifferenz  $\Delta T = 0$  K und mit der Temperaturdifferenz  $\Delta T = 730$  K geschockte Proben, die ohne Porosierungsmittel hergestellt wurden (N.P.) oder mit 20 Vol.-% sphärischem (SPH), kubischem (KUB) oder zylindrischem (ZYL) porosiert wurden. Dargestellt sind die ein- und ausgespeicherten Wärmemengen  $Q_{m, \text{ein}}$  und  $Q_{m, \text{aus}}$  sowie die daraus resultierende Effizienz  $\eta$  für die Temperaturbereiche 200 °C/400 °C, 400 °C/600 °C und 600 °C/800 °C.

Temperaturdifferenz Thermoschock	Temperaturbereich [°C]	Probetyp	Einspeichern $Q_{m, \text{ein}}$ [J/g]	Auspeichern $Q_{m, \text{aus}}$ [J/g]	Effizienz $\eta$ [-]
$\Delta T = 0$ K	200/400	N.P.	187,50	96,35	0,51
		SPH 20	183,60	99,47	0,54
		KUB 20	199,10	101,90	0,51
		ZYL 20	191,60	95,80	0,50
	400/600	N.P.	156,20	148,80	0,95
		SPH 20	164,60	160,00	0,97
		KUB 20	147,40	137,50	0,93
		ZYL 20	162,60	158,60	0,98
	600/800	N.P.	184,80	177,60	0,96
		SPH 20	172,00	170,20	0,99
		KUB 20	137,00	133,60	0,98
		ZYL 20	171,50	170,90	1,00
$\Delta T = 730$ K	200/400	N.P.	207,70	103,10	0,50
		SPH 20	229,60	120,00	0,52
		KUB 20	233,90	113,90	0,49
		ZYL 20	212,90	103,70	0,49
	400/600	N.P.	196,60	193,90	0,99
		SPH 20	197,80	190,20	0,96
		KUB 20	217,40	212,20	0,98
		ZYL 20	169,50	161,40	0,95
	600/800	N.P.	223,60	222,70	1,00
		SPH 20	199,60	198,40	0,99
		KUB 20	231,70	227,70	0,98
		ZYL 20	178,50	168,90	0,95

Tabelle 71: Die 3-Punkt-Biegefestigkeiten und die mittels Impulserregung bestimmten E-Moduln der einfachen Thermoschockversuche für die nicht porosierten Referenzproben (N.P.) sowie die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Porosierungsmittelanteil (PA) für die sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen (ZYL) Porenformen (PF). Die zur Berechnung notwendigen Werte Höhe h, Breite b und Länge l wurden für jede Probe dreifach bestimmt und daraus die Mittelwerte  $h_m$ ,  $b_m$  sowie  $l_m$  berechnet. Weiterhin aufgelistet sind die mit der Impulserregung bestimmten Poisson-Zahlen  $\mu$  und Frequenzen f sowie die berechneten Korrekturterme T, die gewogenen Massen m und die beim 3-Punkt-Biegeversuch aufgenommenen Bruchkräfte F.

Probe	PF-	PA	T-Diff.	Breite				Höhe				Länge				Masse	Bruch- kraft	3-Punkt- Biege- festigkeit	Poisson- zahl	Korrektur- term	Fre- quenz	E-Modul (Impuls- erregung)
Nr.		$\xi_{PM}$ [Vol.-%]	$\Delta T$ [K]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]	$b_3$ [mm]	$b_m$ [mm]	$h_1$ [mm]	$h_2$ [mm]	$h_3$ [mm]	$h_m$ [mm]	$l_1$ [mm]	$l_2$ [mm]	$l_3$ [mm]	$l_m$ [mm]	m [g]	F [N]	$\sigma_{3P}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	T [-] [-]	f [kHz]	E [GPa]
1	SPH	5	330	25,19	25,07	25,21	25,16	20,94	20,82	21,08	20,95	119,86	126,43	119,52	121,94	119,13	1591,9	12,98	0,15	1,27	4,65	24,36
2	SPH	5	330	24,92	24,99	25,01	24,97	19,92	19,71	19,55	19,73	121,06	120,80	121,13	121,00	112,27	1537,3	14,24	0,15	1,27	4,27	22,82
3	SPH	5	330	25,15	24,99	24,97	25,04	19,28	19,74	19,78	19,60	121,30	121,07	120,90	121,09	111,11	1363,1	12,76	0,15	1,28	4,25	22,82
4	SPH	5	330	25,21	25,24	25,20	25,22	19,70	19,53	19,26	19,50	118,89	118,81	118,75	118,82	109,51	1318,5	12,38	0,15	1,29	4,42	23,44
5	SPH	5	330	25,33	25,34	25,16	25,28	19,65	19,43	19,60	19,56	118,75	118,76	118,81	118,77	111,01	1498,8	13,95	0,15	1,29	4,47	24,01
6	SPH	5	430	25,34	25,16	25,20	25,23	19,22	19,37	19,48	19,36	120,01	119,93	119,87	119,94	109,36	1375,0	13,09	0,15	1,28	4,27	22,86
7	SPH	5	430	25,42	25,12	25,10	25,21	19,29	19,17	19,22	19,23	119,44	119,36	119,24	119,35	108,18	1453,3	14,03	0,15	1,29	4,33	23,44
8	SPH	5	430	25,09	25,20	25,33	25,21	18,97	18,97	19,19	19,04	119,38	119,30	119,40	119,36	107,82	1273,3	12,54	0,15	1,29	4,30	23,72
9	SPH	5	430	25,32	25,28	25,36	25,32	19,18	19,14	19,23	19,18	118,90	118,93	118,88	118,90	107,67	1323,2	12,78	0,15	1,29	4,33	23,21
10	SPH	5	430	25,27	25,31	25,05	25,21	19,98	19,66	19,29	19,64	118,62	118,64	118,56	118,61	109,96	1512,7	14,00	0,15	1,29	4,52	23,96
11	SPH	5	530	24,98	25,04	25,08	25,03	19,65	19,61	19,59	19,62	120,07	119,84	119,84	119,92	110,92	1361,7	12,72	0,15	1,28	4,33	23,00
12	SPH	5	530	25,01	25,08	25,08	25,06	19,93	19,87	19,48	19,76	120,71	120,70	120,76	120,72	112,03	1381,5	12,71	0,15	1,28	4,27	22,48
13	SPH	5	530	25,27	25,27	25,27	25,27	19,31	19,09	19,00	19,13	118,94	119,09	118,86	118,96	108,79	1336,1	13,00	0,15	1,29	4,27	23,04
14	SPH	5	530	24,94	25,07	24,97	24,99	19,37	19,29	19,21	19,29	119,93	119,76	119,77	119,82	107,80	1352,0	13,08	0,15	1,28	4,22	22,30
15	SPH	5	530	25,01	24,91	24,82	24,91	19,76	19,47	19,06	19,43	120,24	119,76	119,69	119,90	107,14	1288,2	12,33	0,15	1,28	4,17	21,26
16	SPH	5	630	25,15	25,13	25,20	25,16	20,75	20,86	20,91	20,84	121,17	120,95	120,81	120,98	118,95	1217,1	10,02	0,15	1,28	4,29	20,60
17	SPH	5	630	25,12	25,19	25,24	25,18	19,92	20,07	20,39	20,13	120,00	119,95	119,82	119,92	114,91	1292,0	11,40	0,15	1,28	4,29	21,59
18	SPH	5	630	24,97	25,01	25,20	25,06	19,83	20,08	20,28	20,06	120,52	120,48	120,35	120,45	114,99	1297,6	11,58	0,15	1,28	4,02	19,42
19	SPH	5	630	25,11	24,84	24,87	24,94	20,42	20,30	20,20	20,31	120,31	120,21	119,99	120,17	115,37	1441,9	12,62	0,15	1,28	4,12	19,68
20	SPH	5	630	25,29	25,21	25,25	25,25	19,98	20,04	20,31	20,11	120,22	120,04	119,83	120,03	114,57	1296,4	11,43	0,15	1,28	4,32	21,89
21	SPH	5	730	25,00	25,12	25,16	25,09	20,01	20,21	20,36	20,19	120,57	120,34	120,38	120,43	115,75	1115,4	9,81	0,15	1,28	4,24	21,30
22	SPH	5	730	25,01	24,96	24,76	24,91	20,30	20,19	20,12	20,20	119,65	119,39	119,22	119,42	109,89	1180,9	10,45	0,15	1,28	4,24	19,85
23	SPH	5	730	24,73	24,86	25,00	24,86	20,14	20,34	20,54	20,34	119,67	119,81	119,54	119,67	111,15	1167,1	10,21	0,15	1,28	4,32	20,55
24	SPH	5	730	25,16	25,00	24,83	25,00	20,24	20,26	20,05	20,18	119,71	119,87	119,62	119,73	109,73	1007,0	8,90	0,15	1,28	4,10	18,67
25	SPH	5	730	24,73	24,77	25,04	24,85	20,20	20,22	20,31	20,24	119,06	118,94	119,04	119,01	109,40	1040,9	9,20	0,15	1,28	4,21	19,22
26	SPH	5	0	24,99	24,93	24,93	24,95	21,26	21,09	20,87	21,07	121,14	120,86	121,02	121,01	120,85	1540,3	12,51	0,15	1,27	4,42	21,60
27	SPH	5	0	24,97	24,97	24,98	24,97	20,06	20,36	20,43	20,28	119,11	118,90	119,36	119,12	113,97	1520,1	13,32	0,15	1,28	4,50	22,73

Nr.	PF	$\xi_{PM}$	$\Delta T$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_m$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_m$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_m$	$m$	$F$	$\sigma_{3P}$	$\mu$	$T [-]$	$f$	$E$
		[Vol.-%]	[K]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[kHz]	[GPa]
28	SPH	5	0	25,14	25,06	25,10	25,10	19,19	19,42	19,79	19,47	118,88	118,84	119,04	118,92	110,23	1447,4	13,70	0,15	1,29	4,50	24,69
29	SPH	5	0	24,92	24,88	24,97	24,92	19,94	19,75	19,60	19,76	120,83	120,90	120,83	120,85	112,60	1524,0	14,09	0,15	1,27	4,42	24,34
30	SPH	5	0	25,22	25,16	25,06	25,15	19,41	19,54	19,63	19,53	118,88	118,90	118,86	118,88	111,35	1517,7	14,25	0,15	1,29	4,53	24,99
31	SPH	10	330	24,97	24,83	24,79	24,86	19,77	20,03	20,29	20,03	120,51	120,84	120,77	120,71	103,47	1188,1	10,72	0,15	1,27	4,27	20,02
32	SPH	10	330	24,92	24,84	24,60	24,79	20,10	20,26	20,48	20,28	120,87	120,99	120,77	120,88	106,70	1327,3	11,72	0,15	1,27	4,22	19,53
33	SPH	10	330	24,86	24,79	24,76	24,80	20,19	20,18	20,17	20,18	120,34	120,21	120,08	120,21	106,18	1382,5	12,32	0,15	1,27	4,29	20,09
34	SPH	10	330	25,20	25,12	25,12	25,15	19,85	20,29	20,39	20,18	120,27	120,19	120,33	120,26	108,43	1377,5	12,11	0,15	1,28	4,37	21,15
35	SPH	10	330	25,09	25,08	25,11	25,09	19,82	19,98	19,98	19,93	120,38	120,35	120,15	120,29	105,73	1401,2	12,66	0,15	1,28	4,34	21,16
36	SPH	10	430	25,15	25,29	25,30	25,25	20,26	20,31	20,38	20,32	119,94	119,78	119,93	119,88	106,79	1378,5	11,91	0,15	1,29	4,35	20,01
37	SPH	10	430	25,24	25,31	25,32	25,29	20,09	20,17	20,44	20,23	119,53	119,54	119,62	119,56	102,77	1149,1	9,99	0,15	1,29	4,16	17,69
38	SPH	10	430	25,15	25,26	25,26	25,22	20,49	20,35	20,67	20,50	119,90	119,97	120,20	120,02	107,48	1281,8	10,88	0,15	1,28	4,31	19,30
39	SPH	10	430	24,56	24,74	24,68	24,66	20,25	20,32	20,17	20,25	119,70	119,76	120,02	119,83	109,41	1370,3	12,20	0,15	1,27	4,42	21,65
40	SPH	10	430	25,01	25,03	24,96	25,00	19,57	20,00	20,23	19,93	121,04	120,77	120,70	120,84	105,15	1300,9	11,79	0,15	1,28	4,22	20,15
41	SPH	10	530	25,03	25,06	25,05	25,05	20,24	20,38	20,24	20,29	120,75	120,18	120,64	120,52	108,81	1253,9	10,95	0,15	1,28	4,22	19,63
42	SPH	10	530	24,60	24,70	24,88	24,73	20,16	20,48	20,28	20,31	121,48	121,16	121,16	121,27	108,24	1303,1	11,50	0,15	1,27	4,12	18,99
43	SPH	10	530	24,70	24,79	24,91	24,80	20,22	20,20	20,50	20,31	120,74	120,67	120,97	120,79	107,55	1067,8	9,40	0,15	1,27	4,22	19,57
44	SPH	10	530	24,80	24,83	24,81	24,81	20,20	20,21	20,02	20,14	121,53	121,47	121,62	121,54	110,65	1299,9	11,62	0,15	1,27	4,17	20,46
45	SPH	10	530	24,89	24,94	25,03	24,95	19,84	20,21	20,43	20,16	122,58	122,52	122,56	122,55	110,73	1194,2	10,60	0,15	1,27	4,13	20,40
46	SPH	10	630	24,79	24,80	24,90	24,83	19,98	20,09	20,08	20,05	122,10	122,19	122,19	122,16	110,30	1121,3	10,11	0,15	1,27	3,99	19,18
47	SPH	10	630	25,14	25,17	25,09	25,13	20,13	20,29	20,35	20,26	120,81	120,80	120,74	120,78	108,61	1113,8	9,72	0,15	1,28	4,11	18,73
48	SPH	10	630	24,85	24,87	25,00	24,91	20,44	20,46	20,71	20,54	121,53	121,50	121,52	121,52	108,33	1263,1	10,82	0,15	1,27	4,11	18,31
49	SPH	10	630	25,04	24,98	24,87	24,96	20,21	20,13	20,35	20,23	121,36	120,95	121,04	121,12	108,24	1240,2	10,93	0,15	1,27	4,09	18,77
50	SPH	10	630	25,12	25,07	24,90	25,03	20,07	20,05	20,27	20,13	121,10	121,18	121,17	121,15	108,24	1095,6	9,72	0,15	1,28	4,02	18,38
51	SPH	10	730	24,72	24,83	24,94	24,83	20,35	20,54	20,62	20,50	120,75	120,57	120,45	120,59	109,03	1103,8	9,52	0,15	1,27	4,11	18,19
52	SPH	10	730	24,75	24,92	24,88	24,85	20,29	20,55	20,55	20,46	120,45	120,34	120,60	120,46	108,43	1085,8	9,39	0,15	1,27	4,06	17,70
53	SPH	10	730	24,67	24,81	24,90	24,79	20,36	20,52	20,33	20,40	120,76	120,34	120,20	120,43	107,39	1012,9	8,83	0,15	1,27	4,13	18,31
54	SPH	10	730	25,18	25,01	24,86	25,02	20,16	20,50	20,48	20,38	120,12	120,00	119,93	120,02	107,01	1147,6	9,94	0,15	1,28	4,08	17,61
55	SPH	10	730	25,20	25,15	25,10	25,15	19,83	20,06	20,27	20,05	121,47	121,38	121,68	121,51	109,82	1097,3	9,76	0,15	1,28	3,91	17,94
56	SPH	10	0	24,99	25,06	25,08	25,04	20,44	20,30	20,18	20,31	121,47	121,21	121,71	121,46	110,32	1321,9	11,52	0,15	1,27	4,22	20,24
57	SPH	10	0	25,17	25,05	24,79	25,00	20,10	20,59	20,38	20,36	120,97	121,08	120,91	120,99	110,68	1443,7	12,54	0,15	1,28	4,32	20,93
58	SPH	10	0	25,32	25,24	25,22	25,26	20,42	20,47	20,41	20,43	121,14	121,10	121,11	121,12	113,85	1367,5	11,67	0,15	1,28	4,31	21,12
59	SPH	10	0	25,54	25,68	25,72	25,65	20,42	20,23	20,09	20,25	120,96	120,65	120,70	120,77	115,39	1328,6	11,37	0,15	1,29	4,29	21,46
60	SPH	10	0	25,20	25,21	25,26	25,22	20,03	20,28	20,15	20,15	120,18	119,94	119,82	119,98	106,73	1391,4	12,22	0,15	1,28	4,34	20,44
61	SPH	15	330	25,74	25,54	25,51	25,60	19,92	19,29	18,87	19,36	120,06	119,84	120,42	120,11	97,52	973,9	9,14	0,15	1,29	4,01	17,89
62	SPH	15	330	25,53	25,47	25,37	25,46	19,75	19,71	19,72	19,73	120,56	120,15	120,77	120,49	100,65	955,9	8,68	0,15	1,29	4,02	17,74
63	SPH	15	330	25,49	25,41	25,28	25,39	20,25	19,88	19,80	19,98	120,05	119,97	120,62	120,21	102,42	1116,1	9,91	0,15	1,29	4,10	18,00
64	SPH	15	330	25,41	25,32	25,23	25,32	19,89	19,75	19,77	19,80	120,93	120,35	120,62	120,63	101,34	1111,2	10,07	0,15	1,28	3,87	16,46
65	SPH	15	330	25,44	25,15	25,11	25,23	19,46	19,74	19,69	19,63	120,01	119,60	120,01	119,87	95,40	1077,9	9,98	0,15	1,29	4,09	17,52
66	SPH	15	430	24,89	24,77	24,64	24,77	19,65	19,92	19,69	19,75	119,67	119,49	120,14	119,77	96,41	983,2	9,16	0,15	1,28	4,12	17,78

Nr.	PF	$\xi_{PM}$	$\Delta T$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_m$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_m$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_m$	$m$	$F$	$\sigma_{3P}$	$\mu$	$T [-]$	$f$	$E$
		[Vol.-%]	[K]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[kHz]	[GPa]
67	SPH	15	430	24,97	24,95	24,75	24,89	19,48	19,76	19,85	19,70	119,84	119,78	119,83	119,82	96,29	1050,0	9,79	0,15	1,28	4,03	17,11
68	SPH	15	430	25,03	24,95	24,82	24,93	19,70	19,68	19,45	19,61	119,86	119,57	119,51	119,65	94,81	941,2	8,83	0,15	1,28	3,84	15,42
69	SPH	15	430	25,30	25,32	25,46	25,36	20,53	20,38	20,24	20,38	119,93	119,97	120,05	119,98	102,56	1195,2	10,21	0,15	1,29	4,27	18,32
70	SPH	15	430	25,54	25,42	25,40	25,45	20,15	20,47	20,68	20,43	119,57	119,23	119,19	119,33	101,89	1131,1	9,58	0,15	1,29	4,17	16,96
71	SPH	15	530	25,76	25,67	25,64	25,69	20,30	20,20	20,01	20,17	120,28	119,92	119,99	120,06	106,28	1152,1	9,92	0,15	1,29	4,12	18,14
72	SPH	15	530	24,98	24,93	24,89	24,93	19,78	19,82	19,62	19,74	119,65	119,29	119,35	119,43	95,92	952,9	8,83	0,15	1,28	3,83	15,15
73	SPH	15	530	25,42	25,27	25,46	25,38	19,84	19,91	19,93	19,89	119,94	119,99	120,34	120,09	103,38	1038,8	9,31	0,15	1,29	3,97	17,21
74	SPH	15	530	24,45	24,48	24,47	24,47	20,40	20,13	20,85	20,46	120,42	120,56	120,46	120,48	99,07	1023,1	8,99	0,15	1,27	3,97	15,62
75	SPH	15	530	24,49	24,47	24,49	24,48	20,33	20,06	19,73	20,04	120,34	120,35	120,26	120,32	98,41	1060,9	9,71	0,15	1,27	3,98	16,53
76	SPH	15	630	24,38	24,53	24,52	24,48	20,23	20,14	21,38	20,58	120,29	120,15	120,09	120,18	97,06	1034,0	8,97	0,15	1,27	3,96	14,85
77	SPH	15	630	25,30	25,22	25,19	25,24	20,15	20,38	20,92	20,48	119,75	119,93	119,81	119,83	99,43	1097,0	9,32	0,15	1,29	3,87	14,37
78	SPH	15	630	25,38	25,44	25,21	25,34	19,95	20,04	20,18	20,06	119,84	119,84	119,67	119,78	104,35	969,7	8,56	0,15	1,29	4,00	17,11
79	SPH	15	630	24,66	24,71	25,09	24,82	20,28	20,09	19,82	20,06	120,14	120,13	120,26	120,18	96,90	939,5	8,46	0,15	1,27	3,87	15,16
80	SPH	15	630	24,24	24,25	24,70	24,40	20,38	20,20	19,89	20,16	119,73	119,67	119,70	119,70	97,02	911,3	8,27	0,15	1,27	4,02	16,15
81	SPH	15	730	24,73	24,93	24,92	24,86	20,26	20,05	19,76	20,02	119,99	119,50	119,51	119,67	98,80	906,5	8,19	0,15	1,28	3,81	14,90
82	SPH	15	730	24,34	24,48	24,47	24,43	20,25	20,08	19,78	20,04	120,38	120,43	120,49	120,43	99,74	893,6	8,20	0,15	1,27	3,84	15,66
83	SPH	15	730	25,61	25,43	25,72	25,59	19,91	20,14	20,20	20,08	119,90	119,90	119,94	119,91	103,30	896,4	7,82	0,15	1,29	3,95	16,40
84	SPH	15	730	24,42	24,41	24,72	24,52	20,01	20,36	20,57	20,31	120,92	120,99	120,81	120,91	98,66	908,1	8,08	0,15	1,27	3,77	14,44
85	SPH	15	730	25,39	25,47	25,57	25,48	20,31	20,40	20,10	20,27	119,75	119,76	119,62	119,71	102,47	950,0	8,17	0,15	1,29	3,94	15,72
86	SPH	15	0	24,80	24,78	24,63	24,74	19,95	20,29	20,49	20,24	120,25	120,04	120,04	120,11	97,71	1027,5	9,12	0,15	1,27	3,95	15,52
87	SPH	15	0	24,66	24,77	24,89	24,77	20,25	20,18	19,91	20,11	119,18	119,07	118,84	119,03	97,03	1052,6	9,45	0,15	1,28	4,01	15,80
88	SPH	15	0	24,28	24,33	24,33	24,31	20,36	20,15	19,88	20,13	119,89	119,93	120,06	119,96	98,49	1049,9	9,59	0,15	1,27	4,01	16,51
89	SPH	15	0	24,51	24,42	24,55	24,49	19,83	19,93	20,23	20,00	121,15	120,91	120,94	121,00	99,90	1112,2	10,22	0,15	1,26	4,23	19,35
90	SPH	15	0	24,89	24,69	24,56	24,71	19,94	20,31	20,06	20,10	120,44	120,55	120,64	120,54	96,87	1053,5	9,49	0,15	1,27	4,54	20,95
91	SPH	20	330	24,95	24,99	25,07	25,00	20,43	20,26	20,16	20,28	118,19	117,80	117,85	117,95	98,30	1139,3	9,97	0,15	1,29	4,31	17,52
92	SPH	20	330	24,86	24,95	24,96	24,92	20,27	20,17	19,85	20,10	119,74	119,62	119,29	119,55	97,00	967,9	8,65	0,15	1,28	3,88	14,94
93	SPH	20	330	25,24	25,01	25,03	25,09	20,30	20,40	20,29	20,33	118,26	118,23	118,18	118,22	98,89	1092,7	9,48	0,15	1,29	4,12	16,06
94	SPH	20	330	24,92	24,54	24,89	24,78	20,26	20,15	20,29	20,23	119,35	119,22	119,23	119,27	96,64	1029,3	9,13	0,15	1,28	4,02	15,61
95	SPH	20	330	24,98	24,70	24,67	24,78	20,28	19,83	19,90	20,00	119,38	119,32	119,53	119,41	99,11	1134,1	10,29	0,15	1,28	4,21	18,23
96	SPH	20	430	25,36	25,03	25,09	25,16	20,56	20,32	20,06	20,31	120,22	120,10	120,13	120,15	98,50	925,4	8,02	0,15	1,28	4,06	16,21
97	SPH	20	430	25,24	25,22	24,99	25,15	20,11	20,23	19,87	20,07	120,19	120,11	120,14	120,15	97,39	938,9	8,34	0,15	1,28	3,93	15,57
98	SPH	20	430	24,74	24,58	24,57	24,63	20,23	20,17	19,90	20,10	119,65	119,52	119,63	119,60	99,01	1031,0	9,32	0,15	1,27	4,02	16,49
99	SPH	20	430	24,93	24,91	24,92	24,92	20,71	20,52	20,25	20,49	117,85	117,80	117,69	117,78	99,14	1349,0	11,60	0,15	1,29	4,30	17,02
100	SPH	20	430	25,07	24,97	24,56	24,87	20,33	20,21	20,14	20,23	119,19	119,11	119,28	119,19	97,00	986,1	8,72	0,15	1,28	4,00	15,48
101	SPH	20	530	24,72	24,56	24,23	24,50	20,95	20,98	20,88	20,94	119,71	119,65	119,76	119,71	100,45	1100,2	9,22	0,15	1,27	4,04	15,04
102	SPH	20	530	25,25	24,87	24,87	25,00	20,67	20,43	20,49	20,53	120,06	119,98	119,90	119,98	97,39	943,9	8,06	0,15	1,28	4,09	15,75
103	SPH	20	530	24,80	24,40	24,54	24,58	20,12	20,11	20,11	20,11	119,68	119,61	119,58	119,62	98,82	1073,3	9,71	0,15	1,27	4,04	16,62
104	SPH	20	530	25,20	25,07	24,75	25,01	19,97	19,81	19,99	19,92	118,38	118,22	118,28	118,29	94,75	929,7	8,43	0,15	1,29	3,99	15,38
105	SPH	20	530	24,88	24,82	24,98	24,89	20,10	20,42	20,43	20,32	119,18	119,23	119,20	119,20	94,64	1045,4	9,16	0,15	1,28	4,07	15,42

Nr.	PF	$\xi_{PM}$	$\Delta T$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_m$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_m$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_m$	$m$	$F$	$\sigma_{3P}$	$\mu$	$T [-]$	$f$	$E$
		[Vol.-%]	[K]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[kHz]	[GPa]
106	SPH	20	630	25,76	25,33	25,11	25,40	20,05	20,22	20,28	20,18	120,26	120,16	120,04	120,15	98,57	1053,8	9,17	0,15	1,29	3,79	14,33
107	SPH	20	630	25,20	25,28	25,20	25,23	20,37	20,56	20,53	20,49	119,18	119,20	119,20	119,19	97,70	1003,0	8,53	0,15	1,29	3,86	13,85
108	SPH	20	630	25,07	25,20	25,27	25,18	20,37	19,69	19,72	19,93	120,72	119,38	119,53	119,88	97,75	949,5	8,55	0,15	1,28	3,84	15,15
109	SPH	20	630	25,07	25,20	24,95	25,07	20,32	20,26	19,98	20,19	119,30	119,37	118,94	119,20	99,60	1010,6	8,90	0,15	1,28	4,09	16,64
110	SPH	20	630	25,00	25,00	24,94	24,98	20,21	20,24	20,16	20,20	118,56	118,16	118,07	118,26	96,61	1016,9	8,98	0,15	1,29	4,18	16,51
111	SPH	20	730	25,72	25,49	25,10	25,44	20,12	20,30	20,44	20,29	119,73	119,58	119,79	119,70	96,45	974,8	8,38	0,15	1,29	3,98	15,07
112	SPH	20	730	25,36	25,24	24,96	25,19	20,73	20,30	20,23	20,42	120,30	120,47	120,20	120,32	98,11	861,0	7,38	0,15	1,28	3,65	12,88
113	SPH	20	730	25,04	25,32	25,58	25,31	20,37	20,13	19,92	20,14	119,83	119,89	119,99	119,90	98,00	911,9	7,99	0,15	1,29	3,81	14,44
114	SPH	20	730	24,68	24,76	24,84	24,76	20,59	20,34	20,16	20,36	119,23	119,06	119,14	119,14	94,34	1128,7	9,89	0,15	1,28	4,28	16,91
115	SPH	20	730	24,93	25,20	25,10	25,08	20,26	20,46	20,55	20,42	119,62	119,55	119,53	119,57	97,03	947,9	8,16	0,15	1,28	3,85	13,98
116	SPH	20	0	24,79	24,87	24,99	24,88	20,58	20,56	20,41	20,52	118,31	118,29	118,45	118,35	97,73	1137,1	9,77	0,15	1,28	4,31	17,02
117	SPH	20	0	25,26	25,28	25,19	25,24	20,24	20,28	20,27	20,26	119,87	119,77	119,87	119,84	98,75	1114,5	9,68	0,15	1,29	4,12	16,71
118	SPH	20	0	25,03	24,85	25,02	24,97	20,62	20,33	20,09	20,35	119,36	119,35	119,52	119,41	97,80	1077,6	9,38	0,15	1,28	4,28	17,59
119	SPH	20	0	25,01	25,00	24,92	24,98	20,55	20,31	20,05	20,30	118,97	118,92	118,91	118,93	95,16	1132,0	9,90	0,15	1,28	4,19	16,34
120	SPH	20	0	24,85	24,82	24,75	24,81	20,26	20,21	20,32	20,26	119,07	119,10	119,10	119,09	95,96	1030,6	9,11	0,15	1,28	4,04	15,52
121	ZYL	5	330	25,05	24,97	24,95	24,99	19,62	19,65	19,48	19,58	120,25	120,23	120,24	120,24	110,39	1391,4	13,07	0,15	1,28	4,13	21,10
122	ZYL	5	330	25,10	25,00	24,92	25,01	19,42	19,38	19,54	19,45	119,90	119,88	119,90	119,89	106,92	1027,5	9,78	0,15	1,28	4,06	20,01
123	ZYL	5	330	25,03	25,15	25,15	25,11	18,84	18,83	18,69	18,79	120,06	120,12	120,08	120,09	103,99	1149,8	11,68	0,15	1,28	4,06	21,62
124	ZYL	5	330	25,06	25,14	25,18	25,13	19,15	19,36	19,21	19,24	120,09	120,06	120,20	120,12	107,41	1183,2	11,45	0,15	1,28	4,17	21,94
125	ZYL	5	330	25,11	25,18	25,12	25,14	19,55	19,57	19,51	19,54	120,21	120,29	120,09	120,20	108,56	1311,1	12,29	0,15	1,28	4,10	20,49
126	ZYL	5	430	24,76	25,08	25,03	24,96	19,28	19,25	19,08	19,20	120,57	120,49	120,39	120,48	104,92	1121,9	10,97	0,15	1,28	3,97	19,77
127	ZYL	5	430	25,22	25,32	25,21	25,25	19,33	19,49	19,26	19,36	120,43	120,49	120,39	120,44	109,78	1291,5	12,28	0,15	1,28	4,03	20,64
128	ZYL	5	430	25,27	25,37	25,19	25,28	19,22	19,34	19,39	19,32	120,52	120,42	120,49	120,48	109,82	1224,5	11,68	0,15	1,28	4,08	21,31
129	ZYL	5	430	25,29	25,20	25,32	25,27	19,45	19,32	19,50	19,42	120,54	120,54	120,53	120,54	110,32	1147,9	10,84	0,15	1,28	4,10	21,30
130	ZYL	5	430	25,05	24,97	25,10	25,04	19,78	19,84	19,69	19,77	118,50	118,42	118,46	118,46	108,52	1204,3	11,07	0,15	1,29	4,41	22,09
131	ZYL	5	530	25,29	25,06	24,98	25,11	19,38	19,29	19,32	19,33	119,51	119,32	119,43	119,42	106,34	1185,0	11,37	0,15	1,28	4,05	19,91
132	ZYL	5	530	24,84	25,02	25,05	24,97	19,54	19,52	19,21	19,42	119,58	119,65	119,72	119,65	107,62	1268,2	12,12	0,15	1,28	4,16	21,13
133	ZYL	5	530	24,91	24,99	24,98	24,96	19,60	19,63	19,50	19,58	118,39	118,30	118,24	118,31	106,30	1277,0	12,01	0,15	1,29	4,21	20,28
134	ZYL	5	530	25,05	24,82	24,81	24,89	19,17	19,21	19,43	19,27	119,89	119,82	119,78	119,83	105,93	984,0	9,58	0,15	1,28	3,96	19,41
135	ZYL	5	530	25,14	25,01	24,89	25,01	19,30	19,20	19,00	19,17	119,51	119,60	119,60	119,57	106,49	1228,1	12,03	0,15	1,28	4,19	22,01
136	ZYL	5	630	24,82	24,90	24,95	24,89	19,13	19,19	19,26	19,19	118,59	118,43	118,35	118,46	104,58	985,3	9,67	0,15	1,28	4,00	19,21
137	ZYL	5	630	25,05	25,10	24,96	25,04	19,35	19,38	19,20	19,31	119,53	119,56	119,62	119,57	106,50	1074,6	10,36	0,15	1,28	4,02	19,81
138	ZYL	5	630	25,14	25,12	24,79	25,02	19,37	19,26	19,23	19,29	119,16	118,98	119,06	119,07	105,91	950,7	9,19	0,15	1,28	3,91	18,51
139	ZYL	5	630	25,29	25,28	25,18	25,25	19,16	19,01	18,91	19,03	119,50	119,54	119,53	119,52	107,41	1026,0	10,10	0,15	1,29	4,08	21,38
140	ZYL	5	630	25,36	25,20	25,01	25,19	19,26	19,47	19,44	19,39	119,91	119,85	119,67	119,81	108,81	1038,3	9,87	0,15	1,28	4,11	20,93
141	ZYL	5	730	25,17	25,09	25,04	25,10	19,33	19,38	19,48	19,40	119,78	119,63	119,64	119,68	108,35	975,3	9,30	0,15	1,28	3,99	19,61
142	ZYL	5	730	25,44	25,34	25,14	25,31	19,50	19,56	19,20	19,42	119,55	119,52	119,54	119,54	109,89	927,7	8,75	0,15	1,29	4,09	20,66
143	ZYL	5	730	24,92	24,81	24,65	24,79	19,52	19,55	19,42	19,50	120,91	120,70	120,82	120,81	106,32	956,6	9,14	0,15	1,27	3,82	17,92
144	ZYL	5	730	25,59	25,06	25,01	25,22	19,29	19,33	19,29	19,30	119,01	118,80	119,05	118,95	104,87	979,9	9,38	0,15	1,29	3,84	17,51

# Anlage / Anhang

Nr.	PF	$\xi_{PM}$	$\Delta T$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_m$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_m$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_m$	$m$	$F$	$\sigma_{3P}$	$\mu$	$T [-]$	$f$	$E$
		[Vol.-%]	[K]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[kHz]	[GPa]
145	ZYL	5	730	25,11	25,12	25,18	25,14	19,37	19,41	19,47	19,42	118,92	118,91	118,97	118,93	106,77	901,4	8,56	0,15	1,29	3,83	17,45
146	ZYL	5	0	25,01	25,10	25,17	25,09	19,09	19,08	18,93	19,03	119,60	119,57	119,59	119,59	105,42	1129,3	11,18	0,15	1,28	4,05	20,76
147	ZYL	5	0	24,91	24,99	25,01	24,97	19,41	19,38	19,43	19,41	119,30	119,30	119,19	119,26	107,20	1274,7	12,20	0,15	1,28	4,22	21,53
148	ZYL	5	0	24,83	24,73	24,78	24,78	19,22	19,30	19,27	19,26	120,28	120,28	120,16	120,24	107,27	1195,2	11,70	0,15	1,27	4,11	21,44
149	ZYL	5	0	24,78	25,00	24,87	24,88	19,26	19,36	19,27	19,30	120,35	120,38	120,26	120,33	107,86	1161,5	11,28	0,15	1,28	4,07	21,02
150	ZYL	5	0	25,03	24,99	24,86	24,96	19,41	19,51	19,53	19,48	120,51	120,55	120,55	120,54	109,39	1314,9	12,49	0,15	1,28	4,18	21,90
151	ZYL	10	330	25,62	25,30	25,69	25,54	20,03	20,31	20,29	20,21	120,53	119,99	119,88	120,13	104,01	859,0	7,41	0,15	1,29	3,63	13,77
152	ZYL	10	330	25,06	25,00	25,13	25,06	20,51	20,43	20,48	20,47	120,52	120,42	120,34	120,43	104,25	678,1	5,81	0,15	1,28	3,60	13,28
153	ZYL	10	330	24,75	24,77	24,99	24,84	20,42	20,19	19,88	20,16	119,13	119,07	118,87	119,02	101,27	687,1	6,12	0,15	1,28	3,45	12,10
154	ZYL	10	330	24,74	25,02	25,11	24,96	20,01	19,90	20,13	20,01	121,31	121,01	121,10	121,14	104,89	948,4	8,54	0,15	1,27	3,58	14,40
155	ZYL	10	330	25,65	25,74	25,75	25,71	20,02	19,96	20,10	20,03	120,48	120,07	120,03	120,19	104,78	704,0	6,14	0,15	1,29	3,35	12,11
156	ZYL	10	430	25,14	25,05	25,14	25,11	20,20	20,21	20,63	20,35	120,52	120,30	120,23	120,35	106,71	816,6	7,07	0,15	1,28	3,58	13,66
157	ZYL	10	430	25,61	25,72	25,64	25,66	19,93	19,81	19,79	19,84	120,34	120,15	120,32	120,27	104,12	814,1	7,25	0,15	1,29	3,48	13,39
158	ZYL	10	430	25,30	25,16	25,28	25,25	21,02	21,02	21,02	21,02	120,64	120,42	120,57	120,54	109,41	848,1	6,84	0,15	1,28	3,50	12,15
159	ZYL	10	430	25,28	25,11	24,85	25,08	20,11	20,44	20,44	20,33	120,08	119,96	119,73	119,92	105,15	717,6	6,23	0,15	1,28	3,36	11,78
160	ZYL	10	430	25,32	25,21	24,88	25,14	19,87	20,25	20,53	20,22	120,02	119,95	120,51	120,16	106,31	828,6	7,26	0,15	1,28	3,63	14,19
161	ZYL	10	530	25,30	25,25	25,21	25,25	20,13	19,79	19,97	19,96	119,16	119,15	119,04	119,12	104,52	721,5	6,45	0,15	1,29	3,50	13,14
162	ZYL	10	530	23,29	23,85	24,41	23,85	19,77	19,66	20,02	19,82	120,73	120,13	120,71	120,52	99,83	583,1	5,60	0,15	1,25	3,16	11,15
163	ZYL	10	530	24,02	24,46	24,86	24,45	20,67	20,66	20,54	20,62	120,19	120,05	119,82	120,02	101,64	672,9	5,82	0,15	1,27	3,54	12,32
164	ZYL	10	530	25,61	25,87	25,92	25,80	20,25	20,01	19,98	20,08	120,42	119,57	119,71	119,90	104,79	699,0	6,05	0,15	1,30	3,27	11,35
165	ZYL	10	530	25,69	25,48	25,17	25,45	20,24	20,45	20,50	20,40	121,50	120,66	121,10	121,09	105,82	884,6	7,52	0,15	1,28	3,52	13,10
166	ZYL	10	630	24,92	24,88	25,07	24,96	20,63	20,44	20,73	20,60	121,37	121,32	120,90	121,20	106,11	693,0	5,89	0,15	1,27	3,28	11,23
167	ZYL	10	630	25,59	25,56	25,31	25,49	20,13	20,33	20,58	20,35	121,22	120,75	122,41	121,46	105,22	707,1	6,03	0,15	1,28	3,19	10,86
168	ZYL	10	630	25,64	25,27	25,13	25,35	20,29	20,72	20,66	20,56	118,83	119,06	119,30	119,06	101,15	673,5	5,66	0,15	1,29	3,38	10,83
169	ZYL	10	630	24,68	24,89	24,87	24,81	21,06	20,96	20,96	20,99	120,78	120,86	120,42	120,69	104,64	745,0	6,13	0,15	1,27	3,48	11,69
170	ZYL	10	630	24,86	24,97	25,10	24,98	20,55	20,53	20,57	20,55	120,89	121,01	120,85	120,92	105,25	675,1	5,76	0,15	1,27	3,31	11,35
171	ZYL	10	730	25,27	24,98	24,98	25,08	20,11	20,20	20,37	20,23	120,53	120,70	120,39	120,54	104,34	759,5	6,66	0,15	1,28	3,28	11,47
172	ZYL	10	730	25,39	25,14	25,19	25,24	20,04	20,33	20,07	20,15	120,55	120,56	120,65	120,59	105,23	695,6	6,11	0,15	1,28	3,27	11,60
173	ZYL	10	730	25,16	25,29	25,30	25,25	20,40	20,37	20,03	20,27	120,50	120,56	120,56	120,54	105,65	711,0	6,17	0,15	1,28	3,24	11,22
174	ZYL	10	730	24,82	25,07	25,16	25,02	19,58	19,77	20,25	19,87	120,73	120,56	120,87	120,72	103,19	532,4	4,85	0,15	1,28	2,99	10,00
175	ZYL	10	730	25,13	25,21	25,22	25,19	20,38	20,33	20,25	20,32	120,47	120,51	120,52	120,50	105,59	488,1	4,22	0,15	1,28	3,46	12,69
176	ZYL	10	0	25,59	25,89	25,46	25,65	21,89	20,21	20,34	20,81	120,30	120,08	120,05	120,14	106,26	831,8	6,74	0,15	1,29	3,53	12,15
177	ZYL	10	0	25,37	25,67	25,72	25,59	20,51	20,77	20,77	20,68	120,55	120,39	120,71	120,55	108,74	980,7	8,06	0,15	1,29	3,85	15,22
178	ZYL	10	0	24,73	25,09	25,42	25,08	20,77	20,84	21,00	20,87	120,88	120,98	120,91	120,92	106,96	1003,5	8,27	0,15	1,28	3,79	14,40
179	ZYL	10	0	24,63	25,08	25,45	25,05	20,46	20,62	20,70	20,59	120,78	120,57	120,50	120,62	106,85	821,0	6,95	0,15	1,28	3,49	12,62
180	ZYL	10	0	24,73	25,16	25,46	25,12	20,34	20,52	20,65	20,50	120,68	120,66	121,12	120,82	104,34	694,7	5,92	0,15	1,28	3,37	11,68
181	ZYL	15	330	24,50	24,54	24,73	24,59	19,69	19,82	19,70	19,74	121,98	121,85	121,67	121,83	93,90	480,5	4,51	0,15	1,26	2,71	7,89
182	ZYL	15	330	24,63	24,68	24,67	24,66	19,66	19,47	19,47	19,53	122,00	122,07	121,89	121,99	94,25	471,7	4,51	0,15	1,26	2,63	7,70
183	ZYL	15	330	24,55	24,52	24,61	24,56	19,51	19,67	19,66	19,61	121,45	121,32	121,27	121,35	93,04	388,7	3,70	0,15	1,26	2,74	8,06



Nr.	PF	$\xi_{PM}$	$\Delta T$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_m$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_m$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_m$	$m$	$F$	$\sigma_{3P}$	$\mu$	$T [-]$	$f$	$E$
		[Vol.-%]	[K]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[kHz]	[GPa]
184	ZYL	15	330	25,79	25,82	25,72	25,78	19,66	19,88	19,95	19,83	121,84	121,44	121,59	121,62	106,10	519,6	4,61	0,15	1,29	2,84	9,34
185	ZYL	15	330	24,62	24,71	24,68	24,67	19,76	19,27	18,83	19,29	122,64	122,54	122,24	122,47	94,53	433,0	4,25	0,15	1,26	2,67	8,36
186	ZYL	15	430	24,72	25,05	25,00	24,92	19,38	19,28	19,34	19,33	123,08	123,01	123,04	123,04	94,42	410,7	3,97	0,15	1,26	2,62	8,03
187	ZYL	15	430	25,28	25,06	25,04	25,13	19,94	19,76	19,71	19,80	120,89	120,74	121,09	120,91	97,04	493,3	4,51	0,15	1,28	2,82	8,46
188	ZYL	15	430	25,44	25,57	25,60	25,54	20,07	19,94	19,68	19,90	124,04	123,90	124,38	124,11	98,73	395,6	3,52	0,15	1,27	2,39	6,46
189	ZYL	15	430	25,08	25,10	25,07	25,08	19,83	19,96	20,00	19,93	121,51	121,49	121,20	121,40	95,73	583,5	5,27	0,15	1,28	3,09	9,94
190	ZYL	15	430	24,87	24,85	24,87	24,86	19,80	19,79	19,53	19,71	121,31	121,23	121,14	121,23	94,58	445,6	4,15	0,15	1,27	2,77	8,18
191	ZYL	15	530	25,44	25,67	25,91	25,67	19,71	19,65	19,59	19,65	121,59	121,48	121,57	121,55	98,70	443,5	4,03	0,15	1,29	2,65	7,78
192	ZYL	15	530	25,58	25,67	25,81	25,69	19,52	19,56	19,63	19,57	121,25	121,30	121,25	121,27	97,53	466,7	4,27	0,15	1,29	2,68	7,91
193	ZYL	15	530	25,43	25,44	25,43	25,43	19,96	19,94	19,97	19,96	120,89	120,54	120,74	120,72	99,09	443,7	3,94	0,15	1,29	2,85	8,52
194	ZYL	15	530	25,12	25,27	25,24	25,21	19,57	19,74	19,74	19,68	120,83	120,71	120,71	120,75	97,40	394,4	3,63	0,15	1,28	2,44	6,44
195	ZYL	15	530	24,81	24,81	24,83	24,82	19,79	19,79	19,86	19,81	118,76	118,64	118,62	118,67	92,72	405,7	3,75	0,15	1,28	2,56	6,38
196	ZYL	15	630	24,82	24,82	24,93	24,86	19,61	19,82	19,88	19,77	119,00	118,77	118,68	118,82	92,83	401,5	3,72	0,15	1,28	2,63	6,80
197	ZYL	15	630	22,64	22,79	22,62	22,68	19,59	19,53	19,56	19,56	119,80	120,03	119,86	119,90	84,42	269,8	2,80	0,15	1,23	2,34	5,47
198	ZYL	15	630	22,64	22,55	22,54	22,58	20,00	19,96	19,74	19,90	119,42	119,60	119,37	119,46	84,01	351,6	3,54	0,15	1,23	2,36	5,23
199	ZYL	15	630	24,76	24,80	24,80	24,79	19,46	19,40	19,59	19,48	122,33	121,08	121,18	121,53	93,41	420,5	4,02	0,15	1,27	2,92	9,36
200	ZYL	15	630	25,61	25,46	25,35	25,47	19,89	19,82	20,53	20,08	123,90	123,99	123,65	123,85	98,09	423,9	3,71	0,15	1,27	2,33	5,91
201	ZYL	15	730	25,49	25,28	25,19	25,32	19,26	19,24	19,23	19,24	123,59	123,38	123,16	123,38	94,42	338,6	3,25	0,15	1,27	2,41	6,87
202	ZYL	15	730	25,67	25,68	25,53	25,63	19,87	19,81	19,72	19,80	123,77	123,82	123,64	123,74	98,52	381,7	3,42	0,15	1,28	2,29	5,94
203	ZYL	15	730	24,96	24,93	25,26	25,05	19,20	19,09	19,00	19,10	123,99	123,24	122,89	123,37	92,70	313,5	3,09	0,15	1,27	2,28	6,22
204	ZYL	15	730	24,52	24,66	24,65	24,61	19,61	19,76	19,77	19,71	123,17	123,75	122,38	123,10	94,82	379,2	3,57	0,15	1,26	2,79	8,70
205	ZYL	15	730	24,76	24,91	24,90	24,86	19,70	19,70	19,69	19,70	122,45	122,74	122,96	122,72	93,13	252,7	2,36	0,15	1,26	2,12	4,88
206	ZYL	15	0	25,53	25,36	25,24	25,38	19,61	19,66	19,86	19,71	123,35	123,33	123,20	123,29	97,20	449,8	4,11	0,15	1,27	2,51	7,12
207	ZYL	15	0	24,85	24,76	24,86	24,82	20,49	20,55	20,55	20,53	117,02	116,87	116,43	116,77	94,20	491,3	4,23	0,15	1,29	3,18	8,63
208	ZYL	15	0	24,84	24,74	24,76	24,78	20,62	20,69	20,66	20,66	116,81	116,98	116,47	116,75	94,87	487,1	4,15	0,15	1,29	3,21	8,69
209	ZYL	15	0	24,87	24,89	24,84	24,87	20,95	20,98	20,91	20,95	116,45	117,83	116,30	116,86	95,24	654,9	5,40	0,15	1,29	3,38	9,28
210	ZYL	15	0	24,78	24,67	24,68	24,71	20,75	20,73	20,65	20,71	116,71	117,11	116,46	116,76	93,69	444,3	3,77	0,15	1,29	3,11	8,01
211	ZYL	20	330	25,22	24,94	24,76	24,97	19,69	19,69	20,78	20,05	121,05	120,73	122,00	121,26	88,84	213,5	1,91	0,15	1,27	1,88	3,35
212	ZYL	20	330	24,80	24,89	24,99	24,89	19,91	20,24	20,16	20,10	118,68	118,99	119,53	119,07	89,29	258,2	2,31	0,15	1,28	1,92	3,33
213	ZYL	20	330	24,94	25,61	25,60	25,38	20,40	20,41	21,88	20,90	121,15	123,01	124,22	122,79	92,44	267,3	2,17	0,15	1,28	2,19	4,28
214	ZYL	20	330	25,24	25,08	25,15	25,16	19,39	19,48	20,61	19,83	120,04	119,39	119,13	119,52	90,62	328,8	2,99	0,15	1,29	2,30	5,08
215	ZYL	20	330	25,25	25,29	25,20	25,25	19,37	20,01	19,63	19,67	119,69	121,15	120,81	120,55	92,69	311,1	2,87	0,15	1,28	2,39	5,86
216	ZYL	20	430	24,97	24,80	25,02	24,93	19,81	19,78	20,00	19,86	120,65	121,94	123,14	121,91	91,81	315,1	2,88	0,15	1,27	2,54	6,60
217	ZYL	20	430	25,17	25,09	25,16	25,14	20,03	20,83	20,15	20,34	118,40	118,30	120,48	119,06	89,56	315,4	2,73	0,15	1,29	2,23	4,33
218	ZYL	20	430	25,03	25,11	25,17	25,10	19,73	21,34	21,10	20,72	120,64	122,27	122,70	121,87	91,54	249,4	2,08	0,15	1,27	2,15	4,13
219	ZYL	20	430	25,31	25,37	25,14	25,27	19,84	20,40	23,21	21,15	119,71	123,66	120,42	121,26	91,57	338,2	2,69	0,15	1,28	2,34	4,53
220	ZYL	20	430	25,19	25,21	25,89	25,43	19,60	20,66	23,05	21,10	120,06	120,47	121,41	120,65	87,16	184,1	1,46	0,15	1,29	1,53	1,82
221	ZYL	20	530	25,19	25,04	29,42	26,55	19,43	20,40	21,50	20,44	120,51	120,26	120,41	120,39	88,53	240,2	1,95	0,15	1,31	1,82	2,80
222	ZYL	20	530	25,66	25,65	29,85	27,05	19,59	21,54	22,64	21,26	120,24	120,76	119,89	120,30	89,21	244,0	1,80	0,15	1,32	1,81	2,45

Nr.	PF	$\xi_{PM}$	$\Delta T$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_m$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_m$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_m$	$m$	$F$	$\sigma_{3P}$	$\mu$	$T [-]$	$f$	$E$
		[Vol.-%]	[K]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[kHz]	[GPa]
223	ZYL	20	530	25,62	26,32	27,12	26,35	19,62	20,68	19,58	19,96	120,21	120,30	120,63	120,38	87,93	293,0	2,51	0,15	1,31	2,53	5,80
224	ZYL	20	530	25,23	25,35	26,68	25,75	19,91	20,68	23,58	21,39	120,74	120,55	120,54	120,61	90,79	255,8	1,95	0,15	1,29	2,19	3,71
225	ZYL	20	530	25,30	26,40	25,37	25,69	20,70	21,61	23,15	21,82	120,09	120,35	119,67	120,04	89,09	184,2	1,36	0,15	1,29	1,88	2,50
226	ZYL	20	630	24,87	24,87	24,97	24,90	20,18	20,15	19,52	19,95	119,79	120,02	119,36	119,72	85,94	221,2	2,01	0,15	1,28	2,22	4,45
227	ZYL	20	630	25,19	25,09	24,96	25,08	19,45	19,27	20,01	19,58	119,87	120,12	119,70	119,90	84,06	201,1	1,88	0,15	1,28	1,71	2,73
228	ZYL	20	630	24,95	24,96	25,37	25,09	19,65	20,47	19,45	19,86	120,44	120,34	119,83	120,20	86,21	199,1	1,81	0,15	1,28	1,75	2,83
229	ZYL	20	630	25,01	25,11	25,88	25,33	19,62	20,17	20,26	20,02	120,28	120,17	119,85	120,10	86,43	191,6	1,70	0,15	1,29	1,66	2,47
230	ZYL	20	630	24,91	25,06	25,03	25,00	19,88	20,27	20,33	20,16	120,55	120,83	120,77	120,72	90,93	223,8	1,98	0,15	1,28	2,06	4,00
231	ZYL	20	730	25,26	24,93	26,03	25,41	19,25	19,29	19,40	19,31	120,30	120,26	119,64	120,07	85,98	206,4	1,96	0,15	1,29	1,65	2,70
232	ZYL	20	730	27,55	26,93	25,69	26,72	18,33	19,59	20,67	19,53	119,82	120,45	119,95	120,07	88,01	191,8	1,69	0,15	1,32	1,95	3,63
233	ZYL	20	730	25,22	25,12	25,23	25,19	19,69	19,92	20,11	19,91	120,47	120,39	120,30	120,39	84,24	158,5	1,43	0,15	1,28	1,45	1,89
234	ZYL	20	730	25,02	25,57	26,28	25,62	20,06	21,01	19,84	20,30	118,54	117,88	117,78	118,07	89,45	234,2	2,00	0,15	1,30	1,92	3,12
235	ZYL	20	730	24,35	24,72	24,64	24,57	20,04	19,64	19,43	19,70	119,58	119,35	119,53	119,49	83,46	201,9	1,91	0,15	1,27	2,09	3,99
236	ZYL	20	0	25,84	25,94	25,58	25,79	19,96	21,15	19,67	20,26	120,47	120,35	120,68	120,50	92,31	226,0	1,92	0,15	1,29	1,67	2,57
237	ZYL	20	0	25,25	25,28	26,50	25,68	19,62	19,58	19,44	19,55	120,09	121,01	120,33	120,48	90,23	223,7	2,05	0,15	1,29	2,27	5,18
238	ZYL	20	0	25,69	24,74	25,45	25,29	19,92	19,54	19,51	19,66	120,60	120,49	120,66	120,58	87,93	291,3	2,68	0,15	1,28	2,23	4,85
239	ZYL	20	0	24,28	24,85	24,84	24,66	19,68	19,54	19,50	19,57	120,00	120,40	120,40	120,27	88,61	218,3	2,08	0,15	1,27	1,78	3,18
240	ZYL	20	0	25,36	24,93	24,82	25,04	19,87	19,58	19,25	19,57	119,35	119,15	119,25	119,25	90,17	410,1	3,85	0,15	1,28	2,59	6,64
241	N.P.	0	230	24,65	24,71	24,74	24,70	21,03	20,71	20,25	20,66	120,41	120,41	120,43	120,42	119,00	1709,4	14,59	0,15	1,27	4,70	25,34
242	N.P.	0	230	24,79	24,93	24,90	24,87	20,85	20,87	20,58	20,77	120,51	120,36	120,51	120,46	119,48	1873,4	15,72	0,15	1,27	4,75	25,52
243	N.P.	0	230	25,33	24,98	24,91	25,07	20,97	20,73	20,62	20,77	120,35	120,32	120,39	120,35	119,68	1929,5	16,05	0,15	1,28	4,80	25,90
244	N.P.	0	230	24,83	24,86	24,88	24,86	20,92	20,97	20,50	20,80	120,32	120,21	120,34	120,29	120,22	2018,9	16,90	0,15	1,28	4,79	25,92
245	N.P.	0	230	25,47	25,26	25,22	25,32	21,07	21,11	21,12	21,10	119,14	119,14	119,18	119,15	122,65	2051,8	16,38	0,15	1,29	4,91	25,68
246	N.P.	0	330	25,10	25,18	25,40	25,23	21,14	21,17	21,12	21,14	119,08	119,07	118,99	119,05	123,16	2023,1	16,15	0,15	1,29	4,92	25,73
247	N.P.	0	330	25,61	25,22	24,95	25,26	20,93	20,71	20,52	20,72	119,29	119,27	119,37	119,31	120,61	2023,2	16,79	0,15	1,29	4,80	25,61
248	N.P.	0	330	25,20	25,18	25,31	25,23	20,63	20,83	21,00	20,82	119,27	119,26	119,42	119,32	120,58	1871,8	15,40	0,15	1,29	4,80	25,26
249	N.P.	0	330	25,06	25,03	25,07	25,05	21,16	21,09	21,02	21,09	120,40	120,39	120,51	120,43	123,40	2238,3	18,08	0,15	1,28	4,78	25,36
250	N.P.	0	330	25,07	25,04	25,09	25,07	21,04	21,04	20,90	20,99	121,49	121,44	121,50	121,48	123,44	2086,1	16,99	0,15	1,27	4,76	26,08
251	N.P.	0	430	25,07	25,07	25,07	25,07	21,00	20,80	20,56	20,79	121,35	121,31	121,33	121,33	122,80	1926,2	16,00	0,15	1,28	4,64	25,31
252	N.P.	0	430	25,15	24,96	25,03	25,05	21,12	21,22	21,01	21,12	121,48	121,48	121,00	121,32	124,13	2021,5	16,29	0,15	1,27	4,66	24,62
253	N.P.	0	430	25,08	24,96	24,88	24,97	21,19	21,18	21,25	21,21	121,54	121,77	121,65	121,65	124,74	2095,8	16,79	0,15	1,27	4,69	24,96
254	N.P.	0	430	24,87	25,01	25,11	25,00	20,58	20,65	20,83	20,69	121,81	121,81	121,70	121,77	122,04	1959,1	16,48	0,15	1,27	4,57	25,03
255	N.P.	0	430	24,98	25,05	25,10	25,04	20,91	20,96	21,09	20,99	121,82	121,92	121,91	121,88	122,38	1840,3	15,02	0,15	1,27	4,61	24,50
256	N.P.	0	530	24,97	25,10	25,08	25,05	20,63	20,97	21,02	20,87	121,82	121,60	121,75	121,72	122,98	1725,9	14,23	0,15	1,27	4,58	24,61
257	N.P.	0	530	25,14	25,10	25,09	25,11	21,06	20,89	20,80	20,92	120,49	120,45	120,41	120,45	123,04	1706,2	13,98	0,15	1,28	4,67	24,72
258	N.P.	0	530	25,07	24,94	24,87	24,96	21,29	21,08	20,97	21,11	121,37	121,32	121,31	121,33	123,82	1753,9	14,19	0,15	1,27	4,61	24,10
259	N.P.	0	530	25,10	25,00	25,52	25,21	21,04	21,17	21,17	21,13	120,32	120,31	120,28	120,30	123,54	1886,3	15,09	0,15	1,28	4,72	24,47
260	N.P.	0	530	25,09	25,14	25,03	25,09	20,89	21,05	21,50	21,15	120,22	120,17	120,25	120,21	121,44	2082,3	16,71	0,15	1,28	4,64	23,20
261	N.P.	0	630	25,02	24,99	24,92	24,98	20,76	20,96	20,96	20,89	120,86	120,80	120,76	120,81	123,09	1471,4	12,15	0,15	1,28	4,55	23,81

Nr.	PF	$\xi_{PM}$	$\Delta T$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_m$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_m$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_m$	$m$	$F$	$\sigma_{3P}$	$\mu$	$T [-]$	$f$	$E$
		[Vol.-%]	[K]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[kHz]	[GPa]
262	N.P.	0	630	24,84	24,87	24,89	24,87	20,61	20,76	21,12	20,83	120,84	120,74	120,84	120,81	122,65	1680,3	14,02	0,15	1,27	4,55	24,00
263	N.P.	0	630	24,92	24,88	24,96	24,92	20,55	20,78	21,07	20,80	120,69	120,71	120,63	120,68	121,12	1502,6	12,54	0,15	1,27	4,49	23,09
264	N.P.	0	630	25,03	24,89	24,84	24,92	20,78	20,82	20,85	20,82	121,01	120,89	120,90	120,93	122,73	1390,3	11,59	0,15	1,27	4,33	21,83
265	N.P.	0	630	24,64	24,72	24,87	24,74	20,72	20,78	20,51	20,67	120,84	120,99	121,00	120,94	120,70	1510,0	12,86	0,15	1,27	4,51	23,89
266	N.P.	0	730	24,83	24,88	25,10	24,94	20,68	20,81	20,78	20,76	120,78	120,87	121,25	120,97	120,65	1261,8	10,57	0,15	1,27	4,31	21,45
267	N.P.	0	730	24,85	24,80	24,99	24,88	20,86	20,76	20,56	20,73	120,92	120,86	120,96	120,91	120,77	1073,2	9,04	0,15	1,27	3,89	17,57
268	N.P.	0	730	24,96	24,87	24,91	24,91	20,77	20,88	21,01	20,89	120,66	120,71	120,64	120,67	122,09	1614,4	13,37	0,15	1,27	4,62	24,34
269	N.P.	0	730	25,22	25,52	25,55	25,43	20,98	20,96	20,77	20,90	120,04	120,07	120,04	120,05	124,22	1335,0	10,81	0,15	1,29	4,23	20,19
270	N.P.	0	730	25,36	25,54	25,63	25,51	20,51	20,54	20,73	20,59	120,03	120,03	120,03	120,03	122,03	1149,1	9,56	0,15	1,29	4,02	18,69
271	N.P.	0	0	25,25	25,45	25,65	25,45	20,92	20,60	20,36	20,63	119,92	120,07	119,90	119,96	122,72	2032,5	16,89	0,15	1,29	4,75	26,12
272	N.P.	0	0	25,46	25,43	25,35	25,41	20,52	20,80	20,89	20,74	119,94	119,99	120,07	120,00	124,07	2256,1	18,58	0,15	1,29	4,82	26,80
273	N.P.	0	0	25,07	25,06	25,07	25,07	20,82	20,88	20,69	20,80	117,62	117,63	117,67	117,64	118,56	1891,2	15,70	0,15	1,29	4,99	26,06
274	N.P.	0	0	25,12	25,20	25,29	25,20	20,69	20,61	20,57	20,62	117,28	117,29	117,32	117,30	118,66	2073,2	17,41	0,15	1,30	5,02	26,79
275	N.P.	0	0	24,98	25,13	25,26	25,12	20,17	20,53	20,79	20,50	117,42	117,33	117,39	117,38	117,20	1863,7	15,89	0,15	1,29	4,87	25,46
276	KUB	5	330	23,28	22,74	22,17	22,73	19,77	19,87	19,83	19,82	118,98	119,27	119,09	119,11	106,35	1532,8	15,44	0,15	1,24	4,82	27,59
277	KUB	5	330	24,80	24,38	24,44	24,54	20,27	19,89	19,56	19,91	119,29	119,17	119,14	119,20	115,46	1669,8	15,45	0,15	1,27	4,71	27,00
278	KUB	5	330	24,19	24,03	24,22	24,15	19,61	19,64	19,42	19,56	119,69	119,55	119,33	119,52	109,87	1447,5	14,11	0,15	1,26	4,58	26,06
279	KUB	5	330	24,72	24,09	24,44	24,42	20,27	20,17	20,21	20,22	118,93	118,69	118,91	118,84	114,96	1564,5	14,11	0,15	1,27	4,71	25,55
280	KUB	5	330	23,81	23,39	23,29	23,50	20,12	20,04	20,16	20,11	118,25	117,96	117,94	118,05	104,31	1500,4	14,22	0,15	1,26	4,63	22,90
281	KUB	5	430	24,73	24,73	24,31	24,59	20,08	19,95	20,43	20,15	119,15	118,86	118,62	118,88	114,28	1648,5	14,85	0,15	1,28	4,81	26,64
282	KUB	5	430	24,47	24,63	24,20	24,43	20,17	20,00	19,92	20,03	118,88	119,00	118,70	118,86	111,60	1630,6	14,97	0,15	1,27	4,79	26,37
283	KUB	5	430	24,58	23,80	23,93	24,10	19,77	19,69	19,58	19,68	119,20	118,86	118,71	118,92	110,32	1425,6	13,74	0,15	1,27	4,61	25,70
284	KUB	5	430	24,63	24,33	24,02	24,33	20,38	19,62	19,75	19,92	119,10	118,63	118,57	118,77	113,32	1614,7	15,06	0,15	1,27	4,56	24,70
285	KUB	5	430	24,61	24,28	23,75	24,21	19,28	19,28	19,11	19,22	118,77	119,28	118,76	118,94	109,04	1543,2	15,52	0,15	1,27	4,45	25,34
286	KUB	5	530	24,58	24,58	24,21	24,46	20,24	19,80	19,53	19,86	118,81	118,91	118,69	118,80	115,56	1543,5	14,41	0,15	1,27	4,52	24,91
287	KUB	5	530	24,51	24,54	24,48	24,51	19,55	19,98	20,13	19,89	118,19	118,00	117,80	118,00	113,76	1591,2	14,77	0,15	1,28	4,60	24,81
288	KUB	5	530	24,64	24,45	24,31	24,47	19,39	19,57	19,18	19,38	118,69	118,54	118,24	118,49	111,41	1181,5	11,57	0,15	1,27	4,59	26,45
289	KUB	5	530	24,85	24,68	24,54	24,69	19,82	19,54	19,26	19,54	118,70	118,50	118,23	118,48	113,44	1528,4	14,59	0,15	1,28	4,68	27,17
290	KUB	5	530	24,78	24,88	24,57	24,74	19,81	20,22	19,86	19,96	118,44	118,11	118,29	118,28	118,02	1618,4	14,77	0,15	1,28	4,58	25,24
291	KUB	5	630	24,90	24,52	24,46	24,63	20,09	19,80	19,44	19,78	118,70	118,58	118,35	118,54	114,26	1283,1	11,99	0,15	1,28	4,51	24,58
292	KUB	5	630	24,67	24,46	24,34	24,49	19,82	19,20	19,01	19,34	118,95	119,04	118,60	118,86	113,06	995,3	9,78	0,15	1,27	4,38	24,77
293	KUB	5	630	24,25	24,40	24,07	24,24	19,57	19,72	19,53	19,61	118,63	118,71	118,48	118,61	111,89	1280,4	12,37	0,15	1,27	4,40	23,77
294	KUB	5	630	24,24	24,34	24,54	24,37	19,90	19,85	19,31	19,69	118,27	118,06	117,81	118,05	113,75	1192,1	11,36	0,15	1,27	4,47	24,26
295	KUB	5	630	24,08	24,46	24,56	24,37	19,14	19,55	18,72	19,14	118,42	118,12	118,35	118,30	108,25	1084,7	10,94	0,15	1,27	4,24	22,74
296	KUB	5	730	24,60	24,66	24,44	24,57	19,14	19,69	19,85	19,56	118,43	118,52	118,39	118,45	110,58	1046,5	10,02	0,15	1,28	4,19	21,21
297	KUB	5	730	24,68	24,56	24,52	24,59	20,42	20,51	20,21	20,38	119,09	118,71	118,59	118,80	113,83	1217,6	10,73	0,15	1,28	4,53	22,73
298	KUB	5	730	23,12	22,94	22,96	23,01	20,23	20,11	19,79	20,04	118,95	118,73	118,54	118,74	105,14	771,2	7,51	0,15	1,24	4,28	20,48
299	KUB	5	730	24,16	23,93	24,52	24,20	20,71	20,81	20,38	20,63	118,45	118,19	118,22	118,29	115,73	1236,5	10,80	0,15	1,27	4,62	23,11
300	KUB	5	730	24,89	24,74	24,33	24,65	19,45	19,80	19,71	19,65	118,82	118,96	118,63	118,80	114,32	1178,7	11,14	0,15	1,28	4,31	23,00

Nr.	PF	$\xi_{PM}$	$\Delta T$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_m$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_m$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_m$	$m$	$F$	$\sigma_{3P}$	$\mu$	$T [-]$	$f$	$E$
		[Vol.-%]	[K]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[kHz]	[GPa]
301	KUB	5	0	24,19	24,46	24,35	24,33	19,77	20,09	19,87	19,91	118,54	118,76	118,04	118,45	113,46	1580,2	14,74	0,15	1,27	4,66	25,67
302	KUB	5	0	24,83	24,85	24,73	24,80	19,61	19,81	19,59	19,67	119,03	119,44	118,94	119,14	111,86	1555,1	14,58	0,15	1,28	4,73	27,14
303	KUB	5	0	24,96	24,72	24,59	24,76	19,63	19,69	19,60	19,64	118,44	118,62	118,37	118,48	113,69	1663,0	15,67	0,15	1,28	4,93	29,71
304	KUB	5	0	23,91	24,32	24,09	24,11	19,31	19,77	19,73	19,60	118,78	119,27	118,69	118,91	110,42	1473,5	14,31	0,15	1,27	4,52	25,01
305	KUB	5	0	24,83	24,83	24,64	24,77	19,75	19,47	19,60	19,61	118,30	118,57	118,29	118,39	110,67	1607,7	15,20	0,15	1,28	4,78	27,27
306	KUB	10	330	24,71	24,76	24,66	24,71	20,45	20,09	19,82	20,12	119,81	119,65	119,57	119,68	101,78	1127,6	10,15	0,15	1,27	4,26	18,98
307	KUB	10	330	25,21	24,92	24,85	24,99	21,03	20,62	20,46	20,70	119,28	119,02	119,16	119,15	107,17	1231,3	10,34	0,15	1,28	4,31	18,44
308	KUB	10	330	24,81	24,73	24,76	24,77	20,55	20,59	20,26	20,47	119,01	118,92	119,10	119,01	104,64	1187,6	10,30	0,15	1,28	4,25	18,16
309	KUB	10	330	24,61	24,43	24,53	24,52	18,96	19,57	20,50	19,68	119,98	120,26	119,92	120,05	99,39	1057,9	10,03	0,15	1,27	3,95	17,25
310	KUB	10	330	24,80	24,70	25,08	24,86	20,28	20,43	20,47	20,39	118,73	118,84	118,86	118,81	104,04	1184,8	10,31	0,15	1,28	4,10	16,88
311	KUB	10	430	25,01	24,27	23,73	24,34	20,40	19,10	19,52	19,67	119,54	119,08	119,22	119,28	102,42	917,2	8,76	0,15	1,27	3,92	17,31
312	KUB	10	430	24,79	24,35	24,62	24,59	20,01	20,12	19,95	20,03	119,91	119,76	119,82	119,83	107,16	1188,5	10,85	0,15	1,27	4,16	19,44
313	KUB	10	430	24,52	24,46	25,04	24,67	19,97	19,78	19,83	19,86	119,43	119,43	119,74	119,53	103,99	868,7	8,03	0,15	1,27	4,05	18,18
314	KUB	10	430	25,01	25,20	25,11	25,11	20,23	20,05	20,22	20,17	119,85	119,78	119,86	119,83	105,35	979,5	8,63	0,15	1,28	3,62	14,00
315	KUB	10	430	24,91	25,02	25,43	25,12	21,03	20,87	21,43	21,11	118,71	118,76	118,65	118,71	109,34	1145,6	9,21	0,15	1,29	4,16	16,33
316	KUB	10	530	24,25	23,71	23,64	23,87	20,28	19,93	20,06	20,09	118,92	119,03	118,93	118,96	105,84	1003,4	9,37	0,15	1,26	3,92	16,87
317	KUB	10	530	23,91	23,97	24,24	24,04	20,26	19,60	19,69	19,85	119,08	119,28	119,50	119,29	102,96	887,0	8,43	0,15	1,26	3,68	15,04
318	KUB	10	530	24,75	24,46	24,50	24,57	21,13	21,04	20,60	20,92	119,56	119,88	120,44	119,96	106,47	1085,3	9,08	0,15	1,27	4,00	15,71
319	KUB	10	530	24,76	24,73	25,53	25,01	20,62	19,60	20,64	20,29	118,91	118,81	118,73	118,82	101,97	833,0	7,28	0,15	1,28	3,90	15,16
320	KUB	10	530	24,83	25,17	24,49	24,83	20,24	20,10	19,60	19,98	120,13	119,78	119,76	119,89	106,89	1096,5	9,96	0,15	1,28	3,94	17,44
321	KUB	10	630	24,72	24,64	24,79	24,72	19,80	19,69	20,27	19,92	119,46	119,08	119,59	119,38	103,82	943,5	8,66	0,15	1,28	4,00	17,47
322	KUB	10	630	24,78	24,51	24,43	24,57	20,84	20,41	20,39	20,55	118,22	117,55	117,89	117,89	104,70	942,7	8,18	0,15	1,28	3,82	14,22
323	KUB	10	630	25,36	24,95	25,09	25,13	20,85	20,40	19,78	20,34	119,19	119,06	119,01	119,09	104,04	1082,7	9,37	0,15	1,29	4,06	16,67
324	KUB	10	630	24,88	24,86	24,92	24,89	21,56	20,81	20,57	20,98	119,85	119,49	119,55	119,63	104,12	890,6	7,32	0,15	1,28	3,97	14,80
325	KUB	10	630	25,61	25,79	24,66	25,35	20,21	19,92	20,15	20,09	119,15	119,09	118,90	119,05	104,25	1049,5	9,23	0,15	1,29	3,97	16,48
326	KUB	10	730	24,21	24,70	24,77	24,56	20,22	20,31	19,91	20,15	118,66	118,41	118,55	118,54	101,60	873,9	7,89	0,15	1,28	3,96	15,97
327	KUB	10	730	24,50	24,01	25,81	24,77	19,64	19,46	19,25	19,45	119,66	119,65	119,28	119,53	101,33	803,3	7,71	0,15	1,28	3,76	16,22
328	KUB	10	730	24,98	24,83	25,21	25,01	19,98	19,78	19,96	19,91	118,74	120,78	119,26	119,59	105,79	759,9	6,90	0,15	1,28	3,94	17,27
329	KUB	10	730	24,48	25,01	24,68	24,72	20,58	19,74	20,35	20,22	118,24	118,17	118,23	118,21	104,00	824,1	7,34	0,15	1,28	3,51	12,56
330	KUB	10	730	24,60	24,73	24,35	24,56	23,94	23,49	23,00	23,48	118,81	118,87	118,58	118,75	116,01	999,4	6,64	0,15	1,28	4,18	12,90
331	KUB	10	0	25,08	25,05	24,71	24,95	19,91	19,96	20,31	20,06	119,20	119,18	119,46	119,28	103,65	1286,5	11,53	0,15	1,28	4,30	19,59
332	KUB	10	0	24,24	24,51	24,70	24,48	20,97	21,41	21,43	21,27	118,97	119,07	119,06	119,03	107,82	1253,7	10,19	0,15	1,27	4,28	17,03
333	KUB	10	0	24,37	24,79	25,00	24,72	20,34	19,70	20,23	20,09	118,40	118,25	118,67	118,44	103,00	1224,4	11,04	0,15	1,28	4,23	18,51
334	KUB	10	0	25,21	25,12	25,06	25,13	20,88	21,07	21,10	21,02	119,58	119,88	119,83	119,76	111,67	1302,6	10,56	0,15	1,28	4,28	18,30
335	KUB	10	0	24,73	24,73	24,36	24,61	20,82	20,25	20,08	20,38	119,19	119,43	119,17	119,26	104,03	1295,4	11,40	0,15	1,27	4,24	18,36
336	KUB	15	330	24,99	25,19	24,96	25,05	20,65	20,60	20,44	20,56	118,81	119,05	118,34	118,73	102,55	1060,0	9,01	0,15	1,29	3,87	14,37
337	KUB	15	330	25,34	25,05	24,94	25,11	20,45	20,40	20,37	20,41	117,68	117,84	118,33	117,95	102,20	951,3	8,19	0,15	1,29	3,88	14,46
338	KUB	15	330	24,66	24,49	24,72	24,62	20,32	20,44	19,97	20,24	118,01	118,71	118,69	118,47	98,80	926,6	8,26	0,15	1,28	3,72	13,46
339	KUB	15	330	25,05	25,08	24,86	25,00	19,80	19,79	19,60	19,73	117,66	117,81	117,93	117,80	94,53	780,2	7,22	0,15	1,29	3,24	10,31

Nr.	PF	$\xi_{PM}$	$\Delta T$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_m$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_m$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_m$	$m$	$F$	$\sigma_{3P}$	$\mu$	$T [-]$	$f$	$E$
		[Vol.-%]	[K]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[kHz]	[GPa]
340	KUB	15	330	24,90	24,53	24,52	24,65	20,83	20,82	20,43	20,69	118,99	119,42	119,54	119,32	104,02	1097,8	9,36	0,15	1,28	3,67	13,15
341	KUB	15	430	24,86	24,85	24,67	24,79	20,25	20,37	20,44	20,35	118,79	119,20	118,90	118,96	98,85	993,0	8,70	0,15	1,28	3,60	12,50
342	KUB	15	430	25,18	24,56	24,60	24,78	20,58	20,75	20,68	20,67	118,92	118,73	118,75	118,80	102,29	1010,7	8,59	0,15	1,28	3,73	13,21
343	KUB	15	430	25,05	24,96	25,04	25,02	19,83	19,94	20,02	19,93	118,47	118,47	117,72	118,22	95,42	724,5	6,56	0,15	1,29	3,42	11,35
344	KUB	15	430	24,90	24,85	24,65	24,80	20,19	20,15	20,19	20,18	119,72	119,81	119,38	119,64	100,96	796,6	7,10	0,15	1,28	3,48	12,42
345	KUB	15	430	25,27	24,93	25,05	25,08	20,35	20,25	20,79	20,46	119,03	119,14	118,89	119,02	100,58	992,3	8,50	0,15	1,29	3,99	15,29
346	KUB	15	530	25,31	25,25	25,10	25,22	20,41	20,21	19,98	20,20	119,13	119,75	119,35	119,41	99,52	988,0	8,64	0,15	1,29	3,77	14,11
347	KUB	15	530	24,81	24,75	24,60	24,72	20,43	20,70	20,96	20,70	118,46	118,21	118,39	118,35	102,88	923,7	7,85	0,15	1,28	3,65	12,57
348	KUB	15	530	24,84	24,71	24,42	24,66	20,23	20,39	20,60	20,41	118,82	118,90	118,71	118,81	100,06	973,4	8,53	0,15	1,28	3,90	14,73
349	KUB	15	530	24,30	25,23	24,25	24,59	20,87	20,63	20,41	20,64	119,28	119,42	119,37	119,36	101,99	945,0	8,12	0,15	1,27	3,59	12,47
350	KUB	15	530	25,10	24,26	24,06	24,47	20,67	20,61	20,23	20,50	119,74	119,79	119,57	119,70	98,42	727,2	6,36	0,15	1,27	3,22	9,97
351	KUB	15	630	24,24	24,56	24,47	24,42	20,08	20,24	20,35	20,22	119,76	119,56	119,47	119,60	100,51	608,8	5,49	0,15	1,27	3,53	12,74
352	KUB	15	630	24,88	24,62	24,72	24,74	20,36	20,12	20,35	20,28	118,61	118,65	118,65	118,64	101,06	698,7	6,18	0,15	1,28	3,65	13,21
353	KUB	15	630	24,57	25,11	24,33	24,67	20,49	20,43	20,47	20,46	119,13	119,49	119,36	119,33	101,44	883,9	7,70	0,15	1,28	3,84	14,51
354	KUB	15	630	24,27	24,44	24,53	24,41	20,06	19,77	19,59	19,81	118,88	118,54	118,75	118,72	95,40	891,6	8,38	0,15	1,27	3,36	11,44
355	KUB	15	630	24,86	24,74	26,06	25,22	19,62	19,86	20,04	19,84	118,15	118,29	118,12	118,19	97,95	760,9	6,90	0,15	1,29	3,04	9,28
356	KUB	15	730	24,21	24,29	23,98	24,16	20,18	20,41	20,50	20,36	119,43	119,55	119,97	119,65	96,28	646,8	5,81	0,15	1,26	3,17	9,71
357	KUB	15	730	24,86	24,83	24,81	24,83	20,48	20,16	20,04	20,23	118,70	119,32	119,52	119,18	101,25	742,3	6,58	0,15	1,28	3,61	13,16
358	KUB	15	730	24,61	24,46	24,66	24,58	20,50	20,15	20,29	20,31	119,58	119,90	119,34	119,61	97,39	809,5	7,18	0,15	1,27	3,42	11,39
359	KUB	15	730	25,23	25,15	24,90	25,09	20,47	20,57	20,84	20,63	119,08	119,14	119,45	119,22	101,20	542,4	4,57	0,15	1,28	3,16	9,46
360	KUB	15	730	24,87	24,91	24,85	24,88	20,90	20,54	20,22	20,55	118,70	119,39	119,11	119,07	100,16	622,2	5,33	0,15	1,28	3,84	13,99
361	KUB	15	0	25,47	25,44	25,45	25,45	20,69	20,51	20,43	20,54	119,22	119,45	119,21	119,29	98,53	1044,2	8,75	0,15	1,29	4,22	16,51
362	KUB	15	0	25,68	25,74	25,78	25,73	20,28	20,17	20,17	20,21	119,11	119,55	119,27	119,31	98,99	1011,9	8,67	0,15	1,30	4,02	15,73
363	KUB	15	0	24,98	24,88	24,90	24,92	20,56	20,28	20,37	20,40	119,25	119,21	119,01	119,16	96,21	998,1	8,66	0,15	1,28	4,06	15,38
364	KUB	15	0	24,63	24,71	24,68	24,67	20,41	20,38	20,56	20,45	119,00	119,65	119,40	119,35	96,11	963,4	8,40	0,15	1,28	3,65	12,45
365	KUB	15	0	25,43	25,56	25,51	25,50	20,01	20,15	20,26	20,14	119,77	119,32	119,24	119,44	97,00	977,1	8,50	0,15	1,29	3,27	10,38
366	KUB	20	330	25,08	25,30	25,42	25,27	20,56	20,30	20,58	20,48	120,21	120,01	120,36	120,19	94,91	789,9	6,71	0,15	1,28	3,59	11,90
367	KUB	20	330	25,37	25,36	25,38	25,37	20,75	20,82	21,08	20,88	119,36	119,32	119,28	119,32	92,30	553,4	4,50	0,15	1,29	3,24	8,70
368	KUB	20	330	25,38	25,44	25,39	25,40	20,48	20,71	21,03	20,74	119,54	119,57	119,53	119,55	93,56	739,3	6,09	0,15	1,29	3,36	9,72
369	KUB	20	330	25,12	25,24	25,14	25,17	20,22	20,34	20,23	20,26	119,66	119,63	119,63	119,64	92,01	691,6	6,02	0,15	1,28	3,34	10,21
370	KUB	20	330	25,49	25,34	25,30	25,38	20,46	20,37	20,45	20,43	119,93	119,91	119,96	119,93	92,13	747,1	6,35	0,15	1,29	3,55	11,29
371	KUB	20	430	24,95	25,07	25,17	25,06	20,50	20,84	21,12	20,82	119,67	119,46	119,42	119,52	86,91	600,4	4,97	0,15	1,28	3,07	7,51
372	KUB	20	430	25,46	25,36	25,49	25,44	20,58	20,62	20,49	20,56	118,73	118,96	118,87	118,85	94,60	748,0	6,26	0,15	1,29	3,44	10,41
373	KUB	20	430	25,17	25,25	25,29	25,24	20,38	20,50	20,78	20,55	120,08	120,21	120,16	120,15	90,59	583,3	4,92	0,15	1,28	2,88	7,23
374	KUB	20	430	25,48	25,74	25,74	25,65	20,31	20,24	20,28	20,28	118,45	118,56	118,44	118,48	91,45	555,2	4,74	0,15	1,30	3,26	9,31
375	KUB	20	430	25,12	25,36	25,26	25,25	20,12	20,03	20,14	20,10	119,74	119,67	119,71	119,71	90,02	731,6	6,46	0,15	1,29	3,88	13,81
376	KUB	20	530	24,89	24,74	25,02	24,88	21,25	21,22	20,91	21,13	120,06	120,17	120,13	120,12	89,85	463,2	3,75	0,15	1,28	3,22	8,31
377	KUB	20	530	25,31	25,05	25,09	25,15	20,36	20,53	20,45	20,45	119,15	119,20	119,27	119,21	93,74	416,2	3,56	0,15	1,29	2,65	6,32
378	KUB	20	530	25,48	25,49	25,50	25,49	20,73	20,52	20,29	20,51	119,93	119,98	119,76	119,89	86,85	428,1	3,59	0,15	1,29	3,00	7,48

Nr.	PF	$\xi_{PM}$	$\Delta T$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_m$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_m$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_m$	$m$	$F$	$\sigma_{3P}$	$\mu$	$T [-]$	$f$	$E$
		[Vol.-%]	[K]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[kHz]	[GPa]
379	KUB	20	530	25,36	25,40	25,44	25,40	20,67	20,80	21,06	20,84	119,63	119,73	119,71	119,69	90,37	359,5	2,93	0,15	1,29	3,23	8,58
380	KUB	20	530	25,23	25,01	25,32	25,19	21,06	20,89	20,94	20,96	119,20	119,30	119,25	119,25	89,78	439,8	3,58	0,15	1,29	3,32	8,81
381	KUB	20	630	25,44	25,62	25,40	25,49	20,78	20,83	20,86	20,82	119,69	119,79	119,78	119,75	93,18	421,3	3,43	0,15	1,29	3,14	8,38
382	KUB	20	630	25,03	25,03	25,09	25,05	20,22	20,35	20,71	20,43	119,51	119,91	120,00	119,81	85,60	377,5	3,25	0,15	1,28	2,94	7,23
383	KUB	20	630	25,05	25,10	25,04	25,06	20,63	20,82	21,08	20,84	120,53	120,37	120,30	120,40	91,73	443,6	3,67	0,15	1,28	3,27	9,13
384	KUB	20	630	25,14	25,24	25,11	25,16	20,30	20,29	20,40	20,33	119,87	119,86	119,80	119,84	90,05	376,3	3,26	0,15	1,28	2,61	6,07
385	KUB	20	630	25,56	25,47	25,31	25,45	20,19	20,33	20,31	20,28	119,53	119,52	119,46	119,50	92,23	411,5	3,54	0,15	1,29	3,03	8,33
386	KUB	20	730	25,19	25,01	25,05	25,08	21,08	21,36	20,98	21,14	120,07	120,11	120,74	120,31	90,82	269,2	2,16	0,15	1,28	2,06	3,43
387	KUB	20	730	25,14	25,24	25,30	25,23	20,87	20,95	20,89	20,90	119,54	119,64	119,63	119,60	90,81	289,5	2,36	0,15	1,29	2,95	7,14
388	KUB	20	730	25,54	25,30	25,31	25,38	20,45	20,62	20,54	20,54	119,44	119,58	119,49	119,50	92,35	244,5	2,06	0,15	1,29	2,28	4,55
389	KUB	20	730	25,64	25,36	25,37	25,46	20,23	20,50	20,49	20,41	119,54	119,65	119,70	119,63	90,03	233,6	1,98	0,15	1,29	2,15	4,02
390	KUB	20	730	25,13	25,26	25,40	25,26	20,54	20,51	20,37	20,47	119,35	119,48	119,42	119,42	89,56	316,5	2,69	0,15	1,29	3,21	8,84
391	KUB	20	0	24,80	24,39	24,47	24,55	20,25	19,77	19,99	20,00	119,96	119,87	119,90	119,91	83,14	686,6	6,29	0,15	1,27	3,07	8,27
392	KUB	20	0	25,60	25,19	24,30	25,03	20,04	19,90	19,68	19,87	119,47	119,27	119,30	119,35	85,32	989,7	9,01	0,15	1,28	3,84	13,22
393	KUB	20	0	24,76	24,80	25,01	24,86	20,30	19,94	20,12	20,12	120,06	120,14	120,10	120,10	90,15	827,3	7,40	0,15	1,28	3,46	11,15
394	KUB	20	0	24,75	24,62	24,88	24,75	20,13	19,98	19,39	19,83	118,96	119,08	119,11	119,05	84,03	956,9	8,85	0,15	1,28	3,99	14,14
395	KUB	20	0	24,83	24,39	25,09	24,77	19,87	19,90	19,32	19,70	119,19	119,16	119,29	119,21	87,51	719,1	6,73	0,15	1,28	3,23	9,89

Tabelle 72: Die aus Tabelle 71 gemittelten 3-Punkt-Biegefestigkeiten und E-Moduln einfachen Thermoschockversuche für die nicht porosierten Referenzproben (N.P.) sowie die Proben mit 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Porosierungsmittelanteil (PA) für die sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen (ZYL) Porenformen (PF) sowie ihre Standardabweichungen s und die Gaußsche Fehlerfortpflanzung FFP nach Gleichung 18 Für die 3-Punkt-Biegefestigkeit mit den dazu nötigen Größen und Ableitungen.

PF	PA $\xi_{PM}$ [Vol.-%]	T-Diff. $\Delta T$ [K]	3-Punkt-Biegefestigkeit		E-Modul (Impulserregung)		Breite		Höhe		Biegebruchkraft		Gaußsche FFP 3-Punkt-Biegefestigkeit			
			$\sigma_{3P}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	s( $\sigma_{3P}$ ) [N/mm <sup>2</sup> ]	E [GPa]	s(E) [GPa]	b <sub>M</sub> [mm]	s(b <sub>M</sub> ) [mm]	h <sub>M</sub> [mm]	s(h <sub>M</sub> ) [mm]	F <sub>M</sub> [N]	s(F <sub>M</sub> ) [N]	$\partial\sigma_{3P}/\partial F \cdot s_F$	$\partial\sigma_{3P}/\partial b \cdot s_b$	$\partial\sigma_{3P}/\partial h \cdot s_h$	FFP $_{\sigma_{3P}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
N.P.	0	0	16,89	1,18	26,25	0,56	25,25	0,17	20,66	0,12	2023,4	157,86	1,32	-0,12	-0,19	1,34
N.P.	0	330	16,68	1,00	25,61	0,32	25,17	0,10	20,95	0,18	2048,5	132,23	1,08	-0,07	-0,29	1,12
N.P.	0	430	16,12	0,68	24,89	0,33	25,03	0,04	20,96	0,22	1968,6	96,58	0,79	-0,03	-0,34	0,86
N.P.	0	530	14,84	1,13	24,22	0,61	25,08	0,09	21,04	0,13	1830,9	157,15	1,27	-0,05	-0,18	1,29
N.P.	0	630	12,63	0,91	23,32	0,91	24,89	0,09	20,80	0,08	1510,9	105,92	0,89	-0,04	-0,10	0,89
N.P.	0	730	10,67	1,67	20,45	2,62	25,13	0,31	20,77	0,13	1286,7	209,07	1,73	-0,13	-0,13	1,74
SPH	5	0	13,57	0,69	23,67	1,45	25,02	0,10	20,02	0,67	1509,9	36,02	0,32	-0,05	-0,91	0,96
SPH	5	330	13,26	0,80	23,49	0,70	25,13	0,13	19,87	0,61	1461,9	116,50	1,06	-0,07	-0,81	1,34
SPH	5	430	13,29	0,69	23,44	0,43	25,24	0,05	19,29	0,23	1387,5	96,62	0,93	-0,03	-0,31	0,98
SPH	5	530	12,77	0,30	22,42	0,72	25,05	0,13	19,45	0,25	1343,9	35,21	0,33	-0,07	-0,33	0,47
SPH	5	630	11,41	0,92	20,63	1,11	25,12	0,12	20,29	0,32	1309,0	81,68	0,71	-0,05	-0,36	0,80
SPH	5	730	9,72	0,66	19,92	1,04	24,94	0,10	20,23	0,06	1102,3	76,48	0,67	-0,04	-0,06	0,68
SPH	10	0	11,87	0,50	20,84	0,50	25,24	0,26	20,30	0,11	1370,6	49,80	0,43	-0,12	-0,12	0,46
SPH	10	330	11,90	0,74	20,39	0,73	24,94	0,17	20,12	0,14	1335,3	86,73	0,77	-0,08	-0,17	0,79
SPH	10	430	11,35	0,91	19,76	1,44	25,08	0,26	20,25	0,21	1296,1	92,36	0,81	-0,12	-0,23	0,85
SPH	10	530	10,81	0,89	19,81	0,62	24,87	0,13	20,24	0,08	1223,8	97,73	0,86	-0,06	-0,09	0,87
SPH	10	630	10,26	0,58	18,67	0,35	24,97	0,12	20,24	0,18	1166,8	78,43	0,69	-0,05	-0,19	0,72
SPH	10	730	9,49	0,42	17,95	0,30	24,93	0,15	20,36	0,18	1089,5	48,78	0,42	-0,06	-0,17	0,46
SPH	15	0	9,58	0,40	17,63	2,40	24,61	0,20	20,12	0,09	1059,1	31,51	0,28	-0,08	-0,08	0,31
SPH	15	330	9,56	0,61	17,52	0,62	25,40	0,14	19,70	0,23	1047,0	76,63	0,70	-0,05	-0,22	0,74
SPH	15	430	9,51	0,54	17,12	1,09	25,08	0,31	19,98	0,40	1060,2	104,23	0,94	-0,12	-0,38	1,02
SPH	15	530	9,35	0,46	16,53	1,20	24,99	0,54	20,06	0,28	1045,6	71,99	0,64	-0,20	-0,26	0,72
SPH	15	630	8,72	0,42	15,53	1,10	24,85	0,43	20,27	0,25	990,3	75,08	0,66	-0,15	-0,21	0,71
SPH	15	730	8,09	0,16	15,42	0,76	24,97	0,54	20,15	0,14	910,9	22,75	0,20	-0,17	-0,11	0,29
SPH	20	0	9,57	0,32	16,64	0,78	24,98	0,16	20,34	0,11	1098,4	44,48	0,39	-0,06	-0,10	0,40
SPH	20	330	9,51	0,65	16,47	1,36	24,92	0,14	20,19	0,14	1072,7	73,25	0,65	-0,05	-0,13	0,66
SPH	20	430	9,20	1,43	16,15	0,65	24,95	0,22	20,24	0,17	1046,1	174,37	1,54	-0,08	-0,16	1,55
SPH	20	530	8,92	0,66	15,64	0,60	24,80	0,24	20,36	0,39	1018,5	77,19	0,68	-0,09	-0,34	0,76
SPH	20	630	8,82	0,28	15,30	1,26	25,17	0,16	20,20	0,20	1006,7	37,50	0,33	-0,06	-0,17	0,38
SPH	20	730	8,36	0,93	14,66	1,49	25,15	0,26	20,33	0,12	964,9	101,02	0,87	-0,09	-0,10	0,88
KUB	5	0	14,90	0,54	26,96	1,81	24,55	0,32	19,69	0,13	1575,9	69,88	0,66	-0,19	-0,19	0,71
KUB	5	330	14,67	0,72	25,82	1,82	23,87	0,75	19,92	0,26	1543,0	83,05	0,79	-0,46	-0,38	0,99
KUB	5	430	14,83	0,66	25,75	0,79	24,33	0,19	19,80	0,37	1572,5	91,31	0,86	-0,12	-0,55	1,03
KUB	5	530	14,02	1,38	25,72	1,04	24,57	0,13	19,73	0,25	1492,6	177,61	1,67	-0,08	-0,36	1,71
KUB	5	630	11,29	1,01	24,02	0,81	24,42	0,15	19,51	0,26	1167,1	125,71	1,22	-0,07	-0,31	1,26
KUB	5	730	10,04	1,47	22,11	1,19	24,20	0,69	20,05	0,46	1090,1	193,11	1,79	-0,29	-0,46	1,87
KUB	10	0	10,95	0,57	18,36	0,91	24,78	0,26	20,56	0,55	1272,5	32,75	0,28	-0,12	-0,59	0,66
KUB	10	330	10,23	0,14	17,94	0,86	24,77	0,17	20,27	0,39	1157,8	66,92	0,59	-0,07	-0,40	0,72
KUB	10	430	9,10	1,06	17,05	2,05	24,76	0,34	20,17	0,56	1019,9	140,76	1,26	-0,13	-0,50	1,36

# Anlage / Anhang

PF	$\xi_{PM}$ [Vol.-%]	$\Delta T$ [K]	$\sigma_{3P}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$s(\sigma_{3P})$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E [GPa]	$s(E)$ [GPa]	$b_M$ [mm]	$s(b_M)$ [mm]	$h_M$ [mm]	$s(h_M)$ [mm]	$F_M$ [N]	$s(F_M)$ [N]	$\partial\sigma_{3P}/\partial F \cdot s_F$	$\partial\sigma_{3P}/\partial b \cdot s_b$	$\partial\sigma_{3P}/\partial h \cdot s_h$	FFP <sub>03P</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
KUB	10	530	8,82	1,02	16,04	1,07	24,46	0,49	20,23	0,42	981,0	117,73	1,06	-0,18	-0,37	1,13
KUB	10	630	8,55	0,84	15,93	1,36	24,93	0,31	20,38	0,41	981,8	80,74	0,70	-0,11	-0,35	0,79
KUB	10	730	7,30	0,53	14,98	2,12	24,72	0,18	20,64	1,61	852,1	91,98	0,79	-0,05	-1,14	1,38
KUB	15	0	8,60	0,14	14,09	2,58	25,26	0,44	20,35	0,17	999,0	31,46	0,27	-0,15	-0,14	0,34
KUB	15	330	8,41	0,83	13,15	1,69	24,89	0,23	20,33	0,37	963,2	124,97	1,09	-0,08	-0,31	1,14
KUB	15	430	7,89	0,99	12,95	1,46	24,89	0,14	20,32	0,28	903,4	133,12	1,17	-0,05	-0,22	1,19
KUB	15	530	7,90	0,92	12,77	1,84	24,73	0,29	20,49	0,20	911,5	105,95	0,92	-0,09	-0,15	0,94
KUB	15	630	6,93	1,16	12,24	1,98	24,69	0,33	20,12	0,29	768,8	121,36	1,09	-0,09	-0,20	1,11
KUB	15	730	5,89	1,03	11,54	2,02	24,71	0,36	20,42	0,17	672,7	104,59	0,91	-0,08	-0,10	0,92
KUB	20	0	7,66	1,23	11,33	2,40	24,79	0,17	19,91	0,16	835,9	136,29	1,25	-0,05	-0,12	1,26
KUB	20	330	5,93	0,85	10,36	1,26	25,32	0,10	20,56	0,25	704,3	91,27	0,77	-0,02	-0,14	0,78
KUB	20	430	5,47	0,82	9,65	2,67	25,33	0,23	20,46	0,28	643,7	89,40	0,76	-0,05	-0,15	0,77
KUB	20	530	3,48	0,32	7,90	1,02	25,22	0,24	20,78	0,29	421,4	38,70	0,32	-0,03	-0,10	0,34
KUB	20	630	3,43	0,18	7,83	1,19	25,24	0,21	20,54	0,27	406,1	29,03	0,25	-0,03	-0,09	0,26
KUB	20	730	2,25	0,28	5,60	2,30	25,28	0,14	20,69	0,32	270,6	33,60	0,28	-0,01	-0,07	0,29
ZYL	5	0	11,77	0,57	21,33	0,45	24,94	0,12	19,30	0,17	1215,1	77,68	0,75	-0,05	-0,21	0,78
ZYL	5	330	11,65	1,22	21,03	0,79	25,07	0,07	19,32	0,33	1212,6	142,09	1,37	-0,03	-0,39	1,42
ZYL	5	430	11,37	0,60	21,02	0,87	25,16	0,15	19,41	0,21	1198,0	66,68	0,63	-0,07	-0,25	0,68
ZYL	5	530	11,42	1,07	20,55	1,03	24,99	0,08	19,35	0,16	1188,4	119,97	1,15	-0,04	-0,18	1,17
ZYL	5	630	9,84	0,44	19,97	1,19	25,08	0,14	19,24	0,14	1015,0	48,05	0,47	-0,06	-0,14	0,49
ZYL	5	730	9,02	0,36	18,63	1,43	25,11	0,19	19,41	0,07	948,2	33,24	0,32	-0,07	-0,06	0,33
ZYL	10	0	7,19	0,97	13,22	1,52	25,30	0,29	20,69	0,15	866,4	127,10	1,06	-0,08	-0,11	1,06
ZYL	10	330	6,81	1,15	13,13	1,02	25,22	0,38	20,18	0,19	775,3	121,74	1,07	-0,10	-0,13	1,08
ZYL	10	430	6,93	0,43	13,04	1,02	25,25	0,24	20,35	0,43	805,0	50,69	0,44	-0,07	-0,29	0,53
ZYL	10	530	6,29	0,76	12,21	0,94	24,96	0,79	20,18	0,33	712,2	109,77	0,97	-0,20	-0,21	1,01
ZYL	10	630	5,89	0,19	11,19	0,36	25,12	0,29	20,61	0,24	698,7	29,31	0,25	-0,07	-0,14	0,29
ZYL	10	730	5,60	1,02	11,39	0,96	25,15	0,10	20,17	0,18	637,3	119,40	1,05	-0,02	-0,10	1,06
ZYL	15	0	4,33	0,62	8,35	0,82	24,91	0,27	20,51	0,47	505,5	86,20	0,74	-0,05	-0,20	0,77
ZYL	15	330	4,32	0,37	8,27	0,65	24,85	0,52	19,60	0,21	458,7	49,79	0,47	-0,09	-0,09	0,49
ZYL	15	430	4,28	0,66	8,21	1,24	25,11	0,26	19,73	0,24	465,7	75,80	0,70	-0,05	-0,10	0,71
ZYL	15	530	3,92	0,25	7,41	0,95	25,36	0,36	19,73	0,15	430,8	29,88	0,27	-0,06	-0,06	0,28
ZYL	15	630	3,56	0,46	6,55	1,68	24,08	1,35	19,76	0,24	373,5	64,72	0,62	-0,20	-0,09	0,66
ZYL	15	730	3,14	0,47	6,52	1,41	25,09	0,40	19,51	0,32	333,2	53,31	0,50	-0,05	-0,10	0,51
ZYL	20	0	2,52	0,80	4,49	1,63	25,29	0,46	19,72	0,30	273,9	81,80	0,75	-0,05	-0,08	0,75
ZYL	20	330	2,45	0,46	4,38	1,10	25,13	0,20	20,11	0,47	275,8	45,59	0,40	-0,02	-0,11	0,42
ZYL	20	430	2,37	0,59	4,28	1,70	25,18	0,19	20,64	0,54	280,4	63,29	0,53	-0,02	-0,12	0,55
ZYL	20	530	1,91	0,41	3,45	1,40	26,28	0,57	20,97	0,75	243,4	39,14	0,30	-0,04	-0,14	0,34
ZYL	20	630	1,88	0,13	3,30	0,87	25,08	0,16	19,91	0,22	207,4	14,30	0,13	-0,01	-0,04	0,14
ZYL	20	730	1,80	0,24	3,06	0,82	25,50	0,79	19,75	0,38	198,6	27,35	0,25	-0,06	-0,07	0,26



$$\sigma_{3P} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

$\sigma_{3P}$ : Biegefestigkeit [MPa bzw. N/mm<sup>2</sup>]

F: Biegebruchkraft [N]

l: Auflager [mm] (Höchstens systematischer Fehler → nicht ableiten in Gauß FFP)

b: Breite des Probekörpers [mm]

h: Höhe bzw. Dicke des Probekörpers [mm]

#### Gaußsche Fehlerfortpflanzung

$$\frac{\partial \sigma_{3P}}{\partial F} = \frac{3 \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

$$\frac{\partial \sigma_{3P}}{\partial b} = -\frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b^2 \cdot h^2}$$

$$\frac{\partial \sigma_{3P}}{\partial h} = -\frac{3 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^3}$$

$$FFP_{\sigma_{3P}} = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \cdot s_F\right)^2 + \left(-\frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b^2 \cdot h^2} \cdot s_b\right)^2 + \left(-\frac{3 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^3} \cdot s_h\right)^2}$$

Tabelle 73: Die bei den Zyklenversuchen gemessenen Frequenzen  $f_{\text{Flexural}}$  und daraus bestimmten E-Moduln sowie die aus den E-Moduln nach der Korrelation aus Abbildung 55 berechneten 3-Punkt-Biegefestigkeiten  $\sigma_{3P,calc}$  für die nicht porierten Referenzproben (N.P.) sowie Proben mit 5 und 20 Vol.-% Porosierungsmittelanteil (PA) für die sphärischen (SPH), kubischen (KUB) und zylindrischen (ZYL) Porenformen (PF).

PA [Vol.-%]	PF	Probe	Zyklus N = 0				Zyklus N = 1				Zyklus N = 3		
			$f_{\text{Flexural}}$ [kHz]	$E_{\text{dyn,IE}}$ [GPa]	$\sigma_{3P,calc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		$f_{\text{Flexural}}$ [kHz]	$E_{\text{dyn,IE}}$ [GPa]	$\sigma_{3P,calc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		$f_{\text{Flexural}}$ [kHz]	$E_{\text{dyn,IE}}$ [GPa]	$\sigma_{3P,calc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0	N.P.	N.P. 1	4,86	23,25	12,96		4,60	20,83	11,58		4,60	20,83	11,58
0	N.P.	N.P. 2	4,92	24,41	13,62		4,80	23,23	12,95		4,72	22,47	12,52
0	N.P.	N.P. 3	4,90	24,46	13,65		4,64	21,93	12,21		4,63	21,84	12,16
0	N.P.	N.P. 4	4,86	25,07	14,00		4,54	21,88	12,18		4,58	22,27	12,40
0	N.P.	N.P. 5	4,86	25,04	13,98		4,51	21,56	12,00		4,55	21,94	12,22
0	N.P.	N.P. 6	5,00	25,06	13,99		4,73	22,42	12,49		4,44	19,76	10,97
0	N.P.	N.P. 7	5,05	25,20	14,08		4,80	22,77	12,69		4,76	22,39	12,47
0	N.P.	N.P. 8	5,06	23,84	13,30		4,81	21,54	11,99		4,80	21,45	11,94
5	SPH	5S1	4,85	21,77	12,12		4,52	18,91	10,49		4,46	18,41	10,20
5	SPH	5S2	4,82	22,30	12,42		4,54	19,78	10,99		4,48	19,26	10,69
5	SPH	5S3	4,81	21,96	12,23		4,50	19,22	10,67		4,41	18,46	10,23
5	SPH	5S4	4,74	22,20	12,36		4,44	19,48	10,81		4,29	18,18	10,08
5	SPH	5S5	4,90	21,96	12,23		4,63	19,61	10,89		4,59	19,27	10,69
5	SPH	5S6	4,86	22,77	12,69		4,55	19,96	11,09		4,52	19,70	10,94
5	SPH	5S7	4,84	23,33	13,01		4,52	20,34	11,31		4,41	19,37	10,75
5	SPH	5S8	4,68	21,37	11,89		4,38	18,72	10,38		4,36	18,55	10,28
5	ZYL	5F1	4,70	21,49	11,96		4,38	18,66	10,35		4,33	18,24	10,10
5	ZYL	5F2	4,83	22,38	12,47		4,50	19,42	10,78		4,50	19,42	10,78
5	ZYL	5F3	4,85	22,28	12,41		4,54	19,53	10,84		4,52	19,35	10,74
5	ZYL	5F4	4,80	21,48	11,95		4,47	18,63	10,33		4,46	18,55	10,28
5	ZYL	5F5	4,72	20,76	11,54		4,41	18,12	10,04		4,38	17,88	9,90
5	ZYL	5F6	4,72	22,41	12,48		4,42	19,65	10,91		4,40	19,47	10,81
5	ZYL	5F7	4,84	22,58	12,58		4,53	19,78	10,98		4,49	19,43	10,79
5	ZYL	5F8	4,78	21,74	12,10		4,48	19,10	10,60		4,45	18,84	10,45
5	KUB	5Q1	4,70	21,73	12,10		4,34	18,53	10,27		4,31	18,27	10,13
5	KUB	5Q2	4,41	19,93	11,07		4,13	17,48	9,67		4,05	16,81	9,29
5	KUB	5Q3	5,04	24,11	13,45		4,69	20,88	11,61		4,66	20,61	11,46
5	KUB	5Q4	3,98	15,31	8,43		3,73	13,44	7,37		3,82	14,10	7,75
5	KUB	5Q5	4,89	23,24	12,96		4,53	19,94	11,08		4,50	19,68	10,93
5	KUB	5Q6	3,84	14,16	7,78		3,58	12,30	6,72		3,43	11,30	6,15
5	KUB	5Q7	5,10	23,48	13,09		4,75	20,37	11,32		4,73	20,20	11,22

			Zyklus N = 0			Zyklus N = 1			Zyklus N = 3		
PA [Vol.-%]	PF	Probe	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	σ <sub>3P,calc</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	PA [Vol.-%]	PF	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	σ <sub>3P,calc</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
5	KUB	5Q8	4,51	19,46	10,80	4,25	17,28	9,56	4,24	17,20	9,52
20	SPH	20S1	4,35	15,79	8,71	4,08	13,89	7,63	4,08	13,89	7,63
20	SPH	20S2	4,36	15,92	8,78	4,10	14,08	7,73	4,09	14,01	7,70
20	SPH	20S3	4,51	16,44	9,08	4,21	14,33	7,88	4,22	14,40	7,92
20	SPH	20S4	4,39	16,52	9,12	4,13	14,62	8,04	3,98	13,58	7,45
20	SPH	20S5	4,11	15,25	8,40	3,86	13,45	7,37	3,83	13,24	7,26
20	SPH	20S6	4,27	15,82	8,73	4,00	13,89	7,62	4,02	14,02	7,70
20	SPH	20S7	4,11	14,97	8,24	3,85	13,13	7,20	3,85	13,13	7,20
20	SPH	20S8	4,30	16,12	8,90	4,05	14,30	7,86	4,04	14,23	7,82
20	ZYL	20F1	2,85	7,04	3,72	2,42	5,08	2,60	2,25	4,39	2,21
20	ZYL	20F2	2,99	7,09	3,75	2,38	4,49	2,27	2,36	4,42	2,23
20	ZYL	20F3	2,75	6,03	3,15	2,11	3,55	1,73	2,08	3,45	1,68
20	ZYL	20F4	3,33	8,98	4,83	2,44	4,82	2,46	2,34	4,44	2,24
20	ZYL	20F5	2,83	6,65	3,50	2,25	4,20	2,11	2,18	3,94	1,96
20	ZYL	20F6	3,26	8,42	4,51	2,12	3,56	1,74	1,86	2,74	1,27
20	ZYL	20F7	3,06	7,23	3,83	2,67	5,51	2,85	2,48	4,75	2,42
20	ZYL	20F8	2,80	6,08	3,18	2,33	4,21	2,11	2,22	3,82	1,89
20	KUB	20Q1	3,55	10,50	5,70	1,32	1,45	0,54	1,44	1,73	0,70
20	KUB	20Q2	4,47	16,27	8,98	1,28	1,33	0,47	1,28	1,33	0,47
20	KUB	20Q3	4,06	14,15	7,77	2,85	6,97	3,68	2,77	6,59	3,46
20	KUB	20Q4	3,81	12,30	6,72	0,96	0,78	0,16	0,87	0,64	0,08
20	KUB	20Q5	4,09	13,12	7,19	1,52	1,81	0,74	1,59	1,98	0,84
20	KUB	20Q6	3,56	10,07	5,45	1,69	2,27	1,00	1,68	2,24	0,99
20	KUB	20Q7	3,23	8,18	4,37	1,71	2,29	1,02	1,68	2,21	0,97
20	KUB	20Q8	4,30	14,57	8,01	1,81	2,58	1,18	1,83	2,64	1,21
			Zyklus N = 7			Zyklus N = 15			Zyklus N = 25		
PA [Vol.-%]	PF	Probe	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	σ <sub>3P,calc</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	σ <sub>3P,calc</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	σ <sub>3P,calc</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
0	N.P.	N.P. 1	4,61	20,92	11,63	4,61	20,92	11,63	4,36	18,71	10,38
0	N.P.	N.P. 2	4,67	21,99	12,25	4,63	21,62	12,03	4,41	19,61	10,89
0	N.P.	N.P. 3	4,63	21,84	12,16	4,51	20,72	11,52	4,42	19,90	11,05
0	N.P.	N.P. 4	4,54	21,88	12,18	4,19	18,64	10,33	3,72	14,69	8,08
0	N.P.	N.P. 5	4,55	21,94	12,22	4,44	20,89	11,62	4,16	18,34	10,17
0	N.P.	N.P. 6	4,44	19,76	10,97	4,44	19,76	10,97	4,26	18,19	10,08
0	N.P.	N.P. 7	4,79	22,68	12,64	4,01	15,89	8,77	3,87	14,80	8,15
0	N.P.	N.P. 8	4,81	21,54	11,99	4,67	20,31	11,28	4,47	18,60	10,31
5	SPH	5S1	4,47	18,49	10,25	2,78	7,15	3,79	0,00	0,00	0,00

			Zyklus N = 7			Zyklus N = 15			Zyklus N = 25		
PA [Vol.-%]	PF	Probe	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	σ <sub>3P,calc</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	σ <sub>3P,calc</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	σ <sub>3P,calc</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
5	SPH	5S2	4,46	19,09	10,59	4,48	19,26	10,69	4,42	18,75	10,40
5	SPH	5S3	4,48	19,05	10,57	4,44	18,71	10,38	4,42	18,55	10,28
5	SPH	5S4	4,39	19,04	10,56	4,41	19,22	10,66	4,36	18,78	10,42
5	SPH	5S5	4,58	19,19	10,65	4,50	18,52	10,27	4,47	18,28	10,13
5	SPH	5S6	4,51	19,61	10,89	4,50	19,52	10,84	4,52	19,70	10,94
5	SPH	5S7	4,49	20,07	11,15	4,27	18,16	10,06	4,19	17,48	9,67
5	SPH	5S8	4,35	18,46	10,23	4,32	18,21	10,09	4,30	18,04	9,99
5	ZYL	5F1	4,36	18,49	10,25	4,37	18,58	10,30	4,37	18,58	10,30
5	ZYL	5F2	4,52	19,60	10,88	4,44	18,91	10,49	4,43	18,82	10,44
5	ZYL	5F3	4,48	19,01	10,55	4,53	19,44	10,79	4,47	18,93	10,50
5	ZYL	5F4	4,45	18,46	10,23	4,50	18,88	10,47	4,49	18,80	10,42
5	ZYL	5F5	4,37	17,79	9,85	4,39	17,96	9,95	4,39	17,96	9,95
5	ZYL	5F6	4,39	19,38	10,76	4,37	19,21	10,66	4,36	19,12	10,61
5	ZYL	5F7	4,48	19,34	10,74	4,52	19,69	10,93	4,50	19,52	10,83
5	ZYL	5F8	4,48	19,10	10,60	4,45	18,84	10,45	4,48	19,10	10,60
5	KUB	5Q1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	KUB	5Q2	4,04	16,72	9,24	3,96	16,07	8,87	4,02	16,56	9,15
5	KUB	5Q3	4,65	20,52	11,41	4,62	20,26	11,26	4,59	20,00	11,11
5	KUB	5Q4	3,56	12,25	6,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	KUB	5Q5	4,54	20,03	11,13	4,49	19,59	10,88	4,45	19,24	10,68
5	KUB	5Q6	3,31	10,52	5,71	3,29	10,39	5,63	3,69	13,07	7,16
5	KUB	5Q7	4,73	20,20	11,22	4,73	20,20	11,22	4,63	19,35	10,74
5	KUB	5Q8	4,21	16,96	9,38	4,20	16,88	9,33	2,38	5,42	2,80
20	SPH	20S1	4,08	13,89	7,63	4,07	13,83	7,59	4,06	13,76	7,55
20	SPH	20S2	4,09	14,01	7,70	4,02	13,53	7,42	4,15	14,42	7,93
20	SPH	20S3	4,22	14,40	7,92	4,19	14,19	7,80	4,25	14,60	8,03
20	SPH	20S4	4,00	13,71	7,53	4,03	13,92	7,64	3,74	11,99	6,54
20	SPH	20S5	3,89	13,66	7,49	3,88	13,59	7,45	3,87	13,52	7,41
20	SPH	20S6	3,97	13,68	7,51	3,96	13,61	7,47	4,01	13,95	7,66
20	SPH	20S7	3,88	13,34	7,31	3,91	13,55	7,43	3,86	13,20	7,23
20	SPH	20S8	4,02	14,09	7,74	4,00	13,95	7,66	4,04	14,23	7,82
20	ZYL	20F1	2,08	3,75	1,85	1,92	3,20	1,53	1,26	1,38	0,49
20	ZYL	20F2	2,34	4,34	2,19	2,08	3,43	1,67	1,88	2,80	1,31
20	ZYL	20F3	1,98	3,13	1,49	1,79	2,56	1,17	1,10	0,97	0,26
20	ZYL	20F4	2,35	4,47	2,26	2,18	3,85	1,90	2,04	3,37	1,63
20	ZYL	20F5	2,07	3,56	1,74	1,99	3,29	1,58	1,89	2,96	1,40

			Zyklus N = 7			Zyklus N = 15			Zyklus N = 25		
PA [Vol.-%]	PF	Probe	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	$\sigma_{3P,calc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	$\sigma_{3P,calc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	$\sigma_{3P,calc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
20	ZYL	20F6	1,50	1,78	0,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	ZYL	20F7	2,31	4,12	2,06	2,30	4,09	2,04	2,14	3,54	1,73
20	ZYL	20F8	2,07	3,32	1,60	2,05	3,26	1,57	0,00	0,00	0,00
20	KUB	20Q1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	KUB	20Q2	0,84	0,57	0,04	1,05	0,90	0,22	0,81	0,53	0,01
20	KUB	20Q3	0,86	0,63	0,07	0,84	0,61	0,06	0,79	0,54	0,02
20	KUB	20Q4	0,85	0,61	0,06	0,64	0,35	-0,09	0,00	0,00	0,00
20	KUB	20Q5	1,47	1,69	0,68	1,36	1,45	0,54	1,26	1,24	0,42
20	KUB	20Q6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	KUB	20Q7	1,27	1,26	0,43	1,16	1,05	0,31	1,04	0,85	0,19
20	KUB	20Q8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			Zyklus N = 37			Zyklus N = 60			Zyklus N = 100		
PA [Vol.-%]	PF	Probe	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	$\sigma_{3P,calc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	$\sigma_{3P,calc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	$\sigma_{3P,calc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0	N.P.	N.P. 1	3,65	13,11	7,19	3,59	12,69	6,94	3,61	12,83	7,02
0	N.P.	N.P. 2	3,10	9,69	5,23	2,69	7,30	3,87	2,68	7,24	3,84
0	N.P.	N.P. 3	3,46	12,20	6,66	2,97	8,99	4,83	2,97	8,99	4,83
0	N.P.	N.P. 4	3,21	10,94	5,94	2,65	7,45	3,96	2,68	7,62	4,06
0	N.P.	N.P. 5	3,05	9,86	5,33	3,20	10,85	5,90	3,19	10,79	5,86
0	N.P.	N.P. 6	4,33	18,79	10,42	1,33	1,77	0,72	1,33	1,77	0,72
0	N.P.	N.P. 7	2,27	5,09	2,61	2,62	6,78	3,58	2,61	6,73	3,55
0	N.P.	N.P. 8	3,35	10,45	5,67	1,38	1,77	0,72	1,38	1,77	0,72
5	SPH	5S1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	SPH	5S2	4,39	18,50	10,25	4,28	17,58	9,73	4,17	16,69	9,22
5	SPH	5S3	4,37	18,13	10,04	4,22	16,91	9,35	4,12	16,11	8,89
5	SPH	5S4	4,28	18,10	10,03	4,18	17,26	9,55	4,41	19,22	10,66
5	SPH	5S5	4,37	17,47	9,67	4,17	15,90	8,78	3,86	13,63	7,48
5	SPH	5S6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	SPH	5S7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	SPH	5S8	4,21	17,29	9,57	4,11	16,48	9,10	4,01	15,69	8,65
5	ZYL	5F1	4,24	17,49	9,68	4,17	16,91	9,35	4,13	16,59	9,17
5	ZYL	5F2	4,37	18,32	10,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	ZYL	5F3	4,41	18,42	10,21	4,29	17,43	9,65	4,14	16,24	8,96
5	ZYL	5F4	4,38	17,89	9,90	4,29	17,16	9,49	4,15	16,06	8,86
5	ZYL	5F5	4,27	16,99	9,39	4,16	16,12	8,90	4,05	15,28	8,42
5	ZYL	5F6	4,31	18,68	10,36	4,16	17,41	9,63	4,07	16,66	9,21
5	ZYL	5F7	4,41	18,74	10,39	4,28	17,66	9,77	4,17	16,76	9,26

			Zyklus N = 37			Zyklus N = 60			Zyklus N = 100		
PA [Vol.-%]	PF	Probe	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	σ <sub>3P,calc</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	σ <sub>3P,calc</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>Flexural</sub> [kHz]	E <sub>dyn,IE</sub> [GPa]	σ <sub>3P,calc</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
5	ZYL	5F8	4,35	18,00	9,97	4,20	16,78	9,28	4,05	15,61	8,61
5	KUB	5Q1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	KUB	5Q2	3,86	15,27	8,41	3,85	15,19	8,37	3,71	14,10	7,75
5	KUB	5Q3	4,51	19,31	10,71	4,41	18,46	10,23	0,00	0,00	0,00
5	KUB	5Q4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	KUB	5Q5	4,39	18,73	10,39	4,31	18,05	10,00	4,19	17,06	9,43
5	KUB	5Q6	2,75	7,26	3,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	KUB	5Q7	4,65	19,52	10,84	4,53	18,52	10,27	4,43	17,72	9,81
5	KUB	5Q8	4,05	15,70	8,66	4,02	15,46	8,52	3,89	14,48	7,96
20	SPH	20S1	4,03	13,56	7,44	3,95	13,02	7,13	3,90	12,70	6,95
20	SPH	20S2	4,11	14,15	7,77	3,99	13,33	7,31	3,94	13,00	7,12
20	SPH	20S3	4,19	14,19	7,80	4,07	13,39	7,34	4,04	13,19	7,23
20	SPH	20S4	3,84	12,64	6,91	3,96	13,44	7,37	3,96	13,44	7,37
20	SPH	20S5	3,89	13,66	7,49	3,72	12,49	6,83	3,68	12,22	6,68
20	SPH	20S6	4,02	14,02	7,70	3,88	13,06	7,16	3,83	12,73	6,97
20	SPH	20S7	3,82	12,93	7,08	3,76	12,53	6,85	3,66	11,87	6,48
20	SPH	20S8	4,01	14,02	7,70	3,96	13,67	7,50	3,88	13,12	7,19
20	ZYL	20F1	1,27	1,40	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	ZYL	20F2	1,93	2,95	1,39	1,54	1,88	0,78	1,43	1,62	0,63
20	ZYL	20F3	1,05	0,88	0,21	0,87	0,60	0,05	1,84	2,70	1,25
20	ZYL	20F4	2,05	3,40	1,65	2,08	3,51	1,71	1,87	2,83	1,32
20	ZYL	20F5	1,90	3,00	1,42	1,97	3,22	1,55	0,00	0,00	0,00
20	ZYL	20F6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	ZYL	20F7	2,16	3,60	1,76	2,14	3,54	1,73	2,14	3,54	1,73
20	ZYL	20F8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	KUB	20Q1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	KUB	20Q2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	KUB	20Q3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	KUB	20Q4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	KUB	20Q5	1,80	2,54	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	KUB	20Q6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	KUB	20Q7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	KUB	20Q8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle 74: STA-Ergebnisse der zyklischen Thermoschockversuche für geschockte Proben mit der Temperaturdifferenz  $\Delta T = 650 \text{ K}$  und mit der ohne Porosierungsmittel hergestellt wurden. Dargestellt die Einzelwerte aus Messung 1 und 2 sowie die daraus resultierenden Mittelwerte der ein- und ausgespeicherten Wärmemengen  $Q_{m,\text{ein}}$  und  $Q_{m,\text{aus}}$  und den daraus resultierenden Effizienzen  $\eta$  für die Temperaturbereiche  $200 \text{ °C}/400 \text{ °C}$ ,  $400 \text{ °C}/600 \text{ °C}$  und  $600 \text{ °C}/800 \text{ °C}$ .

Temperaturbereich [°C]	Zyklenzahl N	Messung 1			Messung 2			Mittelwert		
		Einspeichern $Q_{m,\text{ein}}$ [J/g]	Auspeichern $Q_{m,\text{aus}}$ [J/g]	Effizienz $\eta$ [-]	Einspeichern $Q_{m,\text{ein}}$ [J/g]	Auspeichern $Q_{m,\text{aus}}$ [J/g]	Effizienz $\eta$ [-]	Einspeichern $Q_{m,\text{ein}}$ [J/g]	Auspeichern $Q_{m,\text{aus}}$ [J/g]	Effizienz $\eta$ [-]
200 °C / 400 °C	0	187,50	96,35	0,51	192,00	95,45	0,50	189,75	95,90	0,51
	1	257,50	132,10	0,51	251,40	128,80	0,51	254,45	130,45	0,51
	3	211,30	109,20	0,52	213,20	110,00	0,52	212,25	109,60	0,52
	7	225,90	117,40	0,52	227,40	119,00	0,52	226,65	118,20	0,52
	15	212,60	109,80	0,52	211,60	113,10	0,53	212,10	111,45	0,53
	25	202,30	104,20	0,52	208,50	107,00	0,51	205,40	105,60	0,51
	37	238,40	123,50	0,52	236,30	125,90	0,53	237,35	124,70	0,53
	60	235,20	120,90	0,51	237,90	122,40	0,51	236,55	121,65	0,51
	100	209,20	107,40	0,51	211,00	110,00	0,52	210,10	108,70	0,52
400 °C / 600 °C	0	156,20	148,80	0,95	161,30	161,90	1,00	158,75	155,35	0,98
	1	193,00	181,80	0,94	194,40	193,60	1,00	193,70	187,70	0,97
	3	174,00	166,70	0,96	176,10	170,40	0,97	175,05	168,55	0,96
	7	185,80	181,90	0,98	189,00	186,40	0,99	187,40	184,15	0,98
	15	175,40	169,70	0,97	179,50	174,30	0,97	177,45	172,00	0,97
	25	164,10	157,30	0,96	167,30	166,20	0,99	165,70	161,75	0,98
	37	184,00	181,90	0,99	188,20	184,60	0,98	186,10	183,25	0,98
	60	188,10	184,70	0,98	189,80	190,10	1,00	188,95	187,40	0,99
	100	166,50	163,50	0,98	169,60	167,70	0,99	168,05	165,60	0,99
600 °C / 800 °C	0	184,80	177,60	0,96	183,60	177,60	0,97	184,20	177,60	0,96
	1	194,30	191,50	0,99	193,20	192,70	1,00	193,75	192,10	0,99
	3	188,70	189,10	1,00	193,90	190,90	0,98	191,30	190,00	0,99
	7	198,90	197,20	0,99	203,40	198,50	0,98	201,15	197,85	0,98
	15	181,60	181,00	1,00	183,60	179,20	0,98	182,60	180,10	0,99
	25	171,00	174,80	1,02	176,30	173,50	0,98	173,65	174,15	1,00
	37	182,20	181,70	1,00	185,40	184,70	1,00	183,80	183,20	1,00
	60	188,40	188,10	1,00	192,70	190,80	0,99	190,55	189,45	0,99
	100	181,30	181,00	1,00	188,60	185,50	0,98	184,95	183,25	0,99

Tabelle 75: Zusammengefasste Maße, geometrische Größen und Ergebnisse der FEM-Simulation zur Untersuchung des Einflusses der Bauteilgeometrie auf die Thermoschockeeigenschaften. Betrag der 3. Hauptspannung, Oberfläche S, volumenspezifische Oberfläche  $S_v$ , Maßstab M, Höhe-zu-Dicke-Verhältnis h/d, Maße in x, y und z-Richtung, Volumen V und Querschnittsfläche der Extrusion A für die zylindrischen und quaderförmigen Körper.

	[3.HS] [MPa]	x [mm]	y [mm]	z [mm]	V [mm <sup>3</sup> ]	V [cm <sup>3</sup> ]	A [mm <sup>2</sup> ]	A [cm <sup>2</sup> ]	S [mm <sup>2</sup> ]	S [cm <sup>2</sup> ]	$S_v$ [1/m]	h/d [-]	M [x:1]
1qua1,0	1,41	10	10	10	1000	1	100	1,00	600	6	600	1,00	1
2qua1,0	1,74	20	10	10	2000	2	100	1,00	1000	10	500	2,00	1
8qua1,0	2,19	80	10	10	8000	8	100	1,00	3400	34	425	8,00	1
1qua2,5	4,65	25	25	25	15625	16	625	6,25	3750	38	240	1,00	2,5
2qua2,5	4,82	50	25	25	31250	31	625	6,25	6250	63	200	2,00	2,5
8qua2,5	5,26	200	25	25	125000	125	625	6,25	21250	213	170	8,00	2,5
1qua25	7,09	250	250	250	15625000	15625	62500	625	375000	3750	24	1,00	25
2qua25	5,77	500	250	250	31250000	31250	62500	625	625000	6250	20	2,00	25
8qua25	4,82	2000	250	250	125000000	125000	62500	625	2125000	21250	17	8,00	25
1zyl1,0	1,55	10	11	11	1000	1	100	1,00	554	6	554	0,89	1
2zyl1,0	1,34	20	11	11	2000	2	100	1,00	909	9	454	1,77	1
8zyl1,0	1,70	80	11	11	8000	8	100	1,00	3036	30	379	7,09	1
1zyl2,5	4,82	25	28	28	15625	16	625	6,25	3466	35	222	0,89	2,5
2zyl2,5	4,28	50	28	28	31250	31	625	6,25	5681	57	182	1,77	2,5
8zyl2,5	4,64	200	28	28	125000	125	625	6,25	18975	190	152	7,09	2,5
1zyl25	7,07	250	282	282	15625000	15625	62500	625	346557	3466	22	0,89	25
2zyl25	6,75	500	282	282	31250000	31250	62500	625	568113	5681	18	1,77	25
8zyl25	4,58	2000	282	282	125000000	125000	62500	625	1897454	18975	15	7,09	25

Die vollständigen Simulationsdaten liegen ihres Umfangs halber digital bei.



Tabelle 76: Maße, berechnete Größen und Messwerte der Versuche zum Einfluss der Bauteilgeometrie für die quadratischen (q) geschockten (TS) und nicht geschockten (NG) Proben. Extrusionsquerschnittsfläche A, Kantenlänge a, Höhe bzw. Extrusionslänge h, Volumen V, Höhe-zu-Dicke-Verhältnis h/d, Bruchkraft F, Druckfestigkeit  $\sigma_{DF}$  mit den zugehörigen Mittelwerten und Standardabweichungen s sowie den berechneten relativen prozentualen Verlusten der Druckfestigkeit L.

Einzelwerte										Mittelwerte								Standardabweichungen							
Probe	Nr	A [µm²]	A [mm²]	a [mm]	h [mm]	V [mm³]	h/d [-]	F [N]	σ <sub>DF</sub> [N/mm²]	L [%]	A [mm²]	a [mm]	h [mm]	V [mm³]	h/d [-]	F [N]	σ <sub>DF</sub> [N/mm²]	s(A) [mm²]	s(a) [mm]	(h) [mm]	s(V) [mm³]	s(h/d) [-]	s(F) [N]	s(σ <sub>DF</sub> ) [N/mm²]	
q1NG	q1	29912144	29,9	5,5	12,4	370	2,26	1155,5	38,6	16,92	29,28	5,41	11,78	345	2,18	1005,5	34,31	0,90	0,08	0,56	15	0,12	173,1	5,63	
q1NG	q2	28287598	28,3	5,3	12,3	347	2,31	1052,3	37,2																
q1NG	q3	29534066	29,5	5,4	11,3	334	2,08	1144,2	38,7																
q1NG	q4	28380647	28,4	5,3	11,8	335	2,22	738,5	26,0																
q1NG	q5	30271528	30,3	5,5	11,1	337	2,02	936,9	30,9																
q1TS	q6	30447291	30,4	5,5	10,6	322	1,92	823	27,0		29,51	5,43	11,27	332	2,08	839,5	28,50	1,37	0,13	0,85	30	0,16	131,3	4,68	
q1TS	q7	29733326	29,7	5,5	10,3	305	1,88	650	21,9																
q1TS	q8	28516803	28,5	5,3	11,8	336	2,21	797,9	28,0																
q1TS	q9	31076842	31,1	5,6	12,3	383	2,21	977,7	31,5																
q1TS	q10	27752333	27,8	5,3	11,4	317	2,17	948,9	34,2																
q2NG	q11	29969475	30,0	5,5	45,5	1362	8,30	667,7	22,3	24,22	29,30	5,41	45,12	1322	8,34	772,8	26,45	0,65	0,06	0,82	45	0,14	128,6	4,85	
q2NG	q12	29907173	29,9	5,5	45,5	1360	8,32	609,8	20,4																
q2NG	q13	28441280	28,4	5,3	44,9	1277	8,42	860,9	30,3																
q2NG	q14	29200097	29,2	5,4	45,9	1341	8,50	910,8	31,2																
q2NG	q15	28982772	29,0	5,4	43,8	1270	8,14	815	28,1																
q2TS	q16	28183486	28,2	5,3	46,0	1297	8,67	439,4	15,6		29,87	5,46	44,66	1333	8,18	599,9	20,05	1,50	0,14	1,32	63	0,37	164,6	5,27	
q2TS	q17	32047726	32,0	5,7	43,8	1402	7,73	703,5	22,0																
q2TS	q18	28764146	28,8	5,4	43,9	1262	8,18	696,7	24,2																
q2TS	q19	30105733	30,1	5,5	43,5	1308	7,92	755,7	25,1																
q2TS	q20	30252861	30,3	5,5	46,2	1397	8,39	404,2	13,4																
q3NG	q21	30171086	30,2	5,5	9,8	297	1,79	1282	42,5	17,28	30,04	5,48	9,59	288	1,75	1132,3	37,61	1,06	0,10	0,66	29	0,10	261,0	8,07	
q3NG	q22	30221931	30,2	5,5	9,5	286	1,72	1213,1	40,1																
q3NG	q23	28539983	28,5	5,3	9,2	261	1,71	1082,8	37,9																
q3NG	q24	29774672	29,8	5,5	8,9	265	1,63	706,6	23,7																
q3NG	q25	31493948	31,5	5,6	10,6	333	1,89	1377,2	43,7																
q3TS	q26	31006561	31,0	5,6	10,0	309	1,79	1063,8	34,3		29,34	5,42	9,99	293	1,84	916,4	31,11	1,45	0,13	0,63	25	0,12	136,9	3,18	
q3TS	q27	27360866	27,4	5,2	9,2	251	1,76	758,4	27,7																
q3TS	q28	29365817	29,4	5,4	10,5	309	1,94	903,9	30,8																
q3TS	q29	28583082	28,6	5,3	10,7	305	2,00	809,8	28,3																
q3TS	q30	30407569	30,4	5,5	9,6	292	1,74	1046	34,4																
q4NG	q31	28973228	29,0	5,4	42,8	1239	7,94	538,3	18,6	23,75	29,62	5,44	39,48	1169	7,26	774,1	26,02	1,42	0,13	2,22	82	0,46	169,6	4,73	
q4NG	q32	31928860	31,9	5,7	39,6	1265	7,01	1003,8	31,4																
q4NG	q33	28103475	28,1	5,3	39,2	1101	7,39	711	25,3																
q4NG	q34	29533111	29,5	5,4	36,5	1078	6,72	795,3	26,9																
q4NG	q35	29546717	29,5	5,4	39,4	1163	7,24	822,3	27,8																
q4TS	q36	29443356	29,4	5,4	36,0	1058	6,63	653,4	22,2		29,40	5,42	37,84	1113	6,98	583,7	19,84	1,02	0,09	2,76	104	0,47	160,2	5,24	
q4TS	q37	30149509	30,1	5,5	42,5	1280	7,73	489,3	16,2																
q4TS	q38	27632961	27,6	5,3	36,8	1018	7,01	494,4	17,9																
q4TS	q39	29925985	29,9	5,5	38,2	1142	6,98	833,7	27,9																
q4TS	q40	29841002	29,8	5,5	35,8	1067	6,55	447,9	15,0																

Tabelle 77: Maße, berechnete Größen und Messwerte der Versuche zum Einfluss der Bauteilgeometrie für die quadratischen (z) geschockten (TS) und nicht geschockten (NG) Proben. Extrusionsquerschnittsfläche A, Durchmesser d, Höhe bzw. Extrusionslänge h, Volumen V, Höhe-zu-Dicke-Verhältnis h/d, Bruchkraft F, Druckfestigkeit  $\sigma_{DF}$  mit den zugehörigen Mittelwerten und Standardabweichungen s sowie den berechneten relativen prozentualen Verlusten der Druckfestigkeit L.

Einzelwerte										Mittelwerte								Standardabweichungen							
Probe	Nr	A [µm²]	A [mm²]	d [mm]	h [mm]	V [mm³]	h/d [-]	F [N]	DF [N/mm²]	L [%]	A [mm²]	a [mm]	h [mm]	V [mm³]	h/d [-]	F [N]	DF [N/mm²]	A [mm²]	a [mm]	h [mm]	V [mm³]	h/d [-]	F [N]	DF [N/mm²]	
z1NG	z1	28651246	28,7	6,0	11,4	327	1,89	675,3	23,6	17,85	28,30	6,00	11,31	320	1,88	818,0	28,92	0,79	0,08	0,26	11	0,05	108,3	3,94	
z1NG	z2	27548700	27,5	5,9	11,7	322	1,97	797,8	29,0																
z1NG	z3	29510291	29,5	6,1	11,3	333	1,84	876,5	29,7																
z1NG	z4	27909280	27,9	6,0	11,2	311	1,87	777	27,8																
z1NG	z5	27885531	27,9	6,0	11,0	307	1,85	963,2	34,5																
z1TS	z6	28558468	28,6	6,0	11,5	329	1,91	796,5	27,9		28,40	6,01	11,52	327	1,92	674,4	23,76	0,40	0,04	0,51	15	0,09	95,1	3,44	
z1TS	z7	28174968	28,2	6,0	11,9	336	1,99	719,3	25,5																
z1TS	z8	28951901	29,0	6,1	11,1	322	1,83	537,6	18,6																
z1TS	z9	27890194	27,9	6,0	10,9	305	1,83	652,1	23,4																
z1TS	z10	28439881	28,4	6,0	12,1	345	2,02	666,3	23,4																
z2NG	z11	27472321	27,5	5,9	45,9	1262	7,77	740,7	27,0	23,61	27,87	5,96	46,10	1285	7,74	703,2	25,24	0,37	0,04	1,19	28	0,23	73,8	2,67	
z2NG	z12	28097625	28,1	6,0	45,1	1266	7,53	585,8	20,8																
z2NG	z13	27475415	27,5	5,9	47,8	1314	8,08	682,2	24,8																
z2NG	z14	28125485	28,1	6,0	45,0	1265	7,51	776,8	27,6																
z2NG	z15	28190895	28,2	6,0	46,7	1317	7,80	730,7	25,9																
z2TS	z16	27644213	27,6	5,9	45,1	1248	7,61	686,4	24,8		28,28	6,00	45,85	1297	7,64	544,0	19,28	0,63	0,07	1,42	64	0,19	82,1	3,24	
z2TS	z17	28523293	28,5	6,0	45,9	1310	7,62	510	17,9																
z2TS	z18	28457150	28,5	6,0	47,7	1358	7,93	533	18,7																
z2TS	z19	27647309	27,6	5,9	44,0	1216	7,41	513,4	18,6																
z2TS	z20	29118196	29,1	6,1	46,5	1354	7,64	477	16,4																
z3NG	z21	27575754	27,6	5,9	10,3	285	1,74	819	29,7	14,59	28,17	5,99	8,57	240	1,44	866,5	30,72	0,60	0,06	4,11	115	0,69	115,3	3,62	
z3NG	z22	27629781	27,6	5,9	10,5	290	1,77	686,3	24,8																
z3NG	z23	28150049	28,2	6,0	9,9	279	1,65	916	32,5																
z3NG	z24	28479787	28,5	6,0	10,9	310	1,81	963,5	33,8																
z3NG	z25	29011306	29,0	6,1	1,2	36	0,20	947,8	32,7																
z3TS	z26	28155873	28,2	6,0	9,3	262	1,55	761,1	27,0		27,96	5,97	9,93	278	1,66	733,6	26,24	0,48	0,05	0,71	23	0,11	118,1	4,17	
z3TS	z27	27210308	27,2	5,9	9,1	247	1,54	594,8	21,9																
z3TS	z28	27925756	27,9	6,0	10,7	297	1,79	845	30,3																
z3TS	z29	27947898	27,9	6,0	10,2	284	1,70	841,5	30,1																
z3TS	z30	28536467	28,5	6,0	10,5	299	1,74	625,5	21,9																
z4NG	z31	28871049	28,9	6,1	40,7	1175	6,71	778,4	27,0	22,30	27,69	5,94	38,70	1072	6,52	676,4	24,40	0,68	0,07	1,60	64	0,23	77,2	2,38	
z4NG	z32	27297310	27,3	5,9	37,2	1014	6,30	569,1	20,8																
z4NG	z33	27611441	27,6	5,9	37,2	1028	6,28	685,6	24,8																
z4NG	z34	27505433	27,5	5,9	38,4	1056	6,49	644,5	23,4																
z4NG	z35	27183469	27,2	5,9	40,0	1087	6,80	704,6	25,9																
z4TS	z36	27643386	27,6	5,9	40,1	1110	6,77	397	14,4		28,60	6,03	39,89	1141	6,61	543,7	18,96	0,58	0,06	0,85	31	0,16	111,9	3,60	
z4TS	z37	28956223	29,0	6,1	38,5	1114	6,34	683,9	23,6																
z4TS	z38	28550465	28,6	6,0	39,9	1139	6,62	501,1	17,6																
z4TS	z39	28734047	28,7	6,0	40,2	1156	6,65	513,8	17,9																
z4TS	z40	29120702	29,1	6,1	40,7	1186	6,69	622,6	21,4																

**Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Nürnberg, 21. 03. 2025

Jan Sebastian Hildebrand

### **Danksagung**

Ich danke Herrn Prof. Dr. Dr. Herbert Pöllmann, der zu meinem großen Bedauern im Laufe dieser Arbeit verstorben ist, für die Chance zur Promotion und für die fachlich und menschlich hervorragende Betreuung.

Ebenfalls gilt mein großer Dank Herrn Dr. Stefan Stöber, der die Betreuung dieser Arbeit übernommen hat, mir stets inhaltlich ausgezeichnete Impulse gab und mich sehr in meiner Tätigkeit motiviert hat.

Des Weiteren danke ich den zahlreichen Personen, die mich im Laufe der Arbeit unterstützt und begleitet haben. Namentlich und in alphabetischer Reihenfolge nenne ich die hartnäckigen Besucher des zweiten Stocks:

Hertlein Kevin, Hesse Nicolai, Hornik Dustin, Kröger Jan, Kugler Felix, Sappa Daniela, Seibold Joshua, Thieme Luca, Ulici-Gocs Dan und Zeyer Kevin.

Meine Erstkontakte zur THN sind ebenfalls unvergessen: Allar Christian und Wedel Nelli.

### **Lebenslauf**

Jan Sebastian Hildebrand

#### **Berufliche Tätigkeit**

Seit 2025 OTH Regensburg – Fakultätsreferent mit Schwerpunkt Forschung

2017 – 2024 Technische Hochschule Nürnberg – Georg Simon Ohm - Wissenschaftlicher Mitarbeiter

#### **Studium**

2019 - 2025 Doktorand an der Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg

2016 – 2017 Neue Materialien, Nano- und Produktionstechnik - Abschluss M.Eng.

2012 – 2016 Angewandte Chemie TH Nürnberg- Abschluss B.Sc.

2004 – 2012 Chemie- und Bioingenieurwesen, Uni Erlangen

2002 – 2004 Biologie, Uni Erlangen

#### **Wehrdienst**

2001 – 2002 Luftwaffe Roth und Erding

#### **Schule**

1992 – 2001 Adam-Kraft-Gymnasium Schwabach

1988 – 1992 Grundschule Katzwang Nürnberg

Regensburg, 15. 11. 2025

Jan Sebastian Hildebrand