

Daniela Gentner

**Langzeitstabile Oberflächenmodifikationen für einen verbesserten  
Wärmeübergang bei der Kondensation von Wärmeträgermedien**

**M A S T E R A R B E I T**

Zur Erlangung des akademischen Grades:

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium

Advanced Materials Science



**Technische Universität Graz**

Betreuer:

Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. rer. nat. Robert Schennach

Institut für Festkörperphysik

Graz, im September 2013

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand in Rahmen meines Studiums Advanced Materials Science an der technischen Universität Graz in Zusammenarbeit mit der zentralen Forschung und Vorausbentwicklung der Robert Bosch GmbH in der Abteilung für Beschichtungstechnologien und Oberflächentechnik.

Auf universitärer Seite möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. R. Schennach für die fachliche Betreuung bedanken, der mich während der Anfertigung dieser Arbeit begleitete und stets für mich ansprechbar war und mir die Freiheit gelassen hat, die Arbeit nach eigenen Vorstellungen zu entwickeln.

Des Weiteren danke ich insbesondere Herrn H. Bauer, unter dessen Betreuung die Untersuchungen für diese Arbeit durchgeführt wurden und der mir stets ein offenes Ohr für meine Fragen hatte und mir mit Rat und Tat zur Seite stand.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen weiteren Kollegen der CR/ART der Robert Bosch GmbH bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank natürlich auch meiner Familie, durch die mein Studium überhaupt erst möglich wurde.

# I Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Theoretischer Teil .....</b>	<b>9</b>
2.1	Wärmeübergang durch Tropfenkondensation .....	9
2.1.1	Kondensationsmechanismus .....	9
2.1.2	Bestimmung des Wärmeübergangs der Kondensation.....	14
2.2	Einflussfaktoren auf den Wärmübergang bei der Kondensation .....	18
2.2.1	Benetzungseigenschaften.....	18
2.2.2	Grenzflächenenergie, Adhäsion .....	19
2.2.3	Kontaktwinkel und Oberflächenenergie.....	19
2.2.4	Oberflächenstrukturen, Benetzungsmodelle nach Cassie-Baxter und Wenzel.....	20
2.2.5	Kontaktwinkelhysterese und Abrollwinkel .....	21
2.2.6	Wärmeleitfähigkeit .....	23
2.2.7	Äußere Bedingungen .....	23
2.2.8	Inertgas .....	24
2.2.9	Geometrische Einflussfaktoren .....	25
<b>3</b>	<b>Experimenteller Teil .....</b>	<b>26</b>
3.1	Allgemeine Vorgehensweise.....	26
3.2	Strukturierung der Rohsubstrate und Applikation der Schichtmaterialien.....	28
3.2.1	Set A: Kupferrohrsubstrate.....	29
3.2.2	Set B: Stahlsubstrate.....	30
3.3	Charakterisierung.....	32
3.3.1	Oberflächentopografie .....	32
3.3.2	Benetzungseigenschaften.....	36
3.3.3	Bestimmung der Kondensationsleistung.....	38

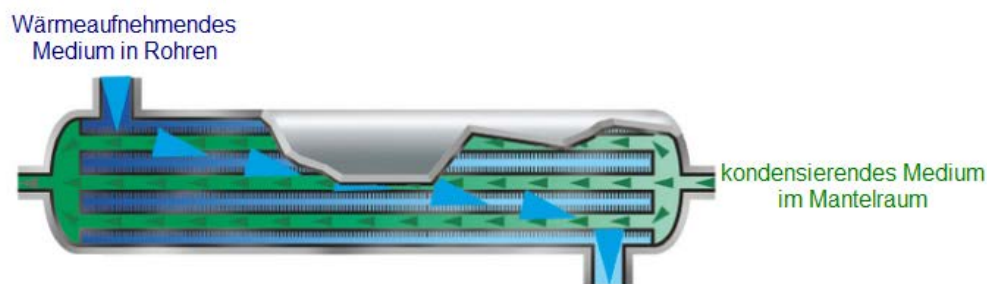
---

<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>45</b>
4.1	Topografie	45
4.1.1	Dreidimensionale Konfokalmikroskopie.....	45
4.1.2	REM-Aufnahmen .....	51
4.2	Benetzungseigenschaften .....	55
4.3	Wärmeübergang – Kondensationsleistung.....	59
4.3.1	Ermittlung der Kondensationsleistung .....	59
4.3.2	Variation der Dampfmenge sowie der Heizbandtemperatur.....	64
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>68</b>
<b>6</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>71</b>
6.1	Anhang A: Zeichnungen des Prüfkörpers .....	71
6.2	Anhang B: Ansichten der Oberflächentopografie .....	74
6.3	Anhang C: Messdaten der Benetzungseigenschaften.....	80
6.4	Anhang D: Messung der Kondensationsleistung bei Variation der Dampfmenge bzw. Heizbandtemperierung.....	92
<b>II</b>	<b>Abkürzungs- und Formelverzeichnis .....</b>	<b>93</b>
<b>III</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>96</b>
<b>IV</b>	<b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>101</b>

## 1 Einleitung

Wärmeübertragungsvorgänge spielen für viele industrielle Anwendungen in der Technik eine wichtige Rolle, wie typischerweise in der Energie- und Gebäudetechnik (Kraftwerke, Heizkörper) sowie in der chemischen Industrie und dem Anlagenbau und der Fahrzeugtechnik (Motorkühlung). Allerdings kommen Wärmetransportprozesse auch in der Elektrotechnik bei der Entwicklung von energiesparenden Kühl- und Gefrierschränken sowie in der Informationstechnologie, z.B. im Fall von Hochleistungs-CPUs eine immer größer werdende Bedeutung zu. [1]

Hierbei werden Wärmeübertrager zum Austausch zwischen den Wärmeträgermedien eingesetzt, die sich nicht in unmittelbarem Kontakt miteinander befinden. Wärmeübertrager existieren je nach Anwendungsfall in einer Vielzahl von Ausführungen und Bauformen. In vielen Fällen werden dabei als Arbeitsmedien verdampfende und kondensierende Fluide verwendet. [2] Rohrbündelkondensatoren stellen eine für diese Anwendungen gängige Bauform dar, die besonders zur Abfuhr hoher Wärmeströme geeignet sind. Sie bestehen aus einer Anordnung von Rohrbündeln, die zum einen von einem Arbeitsmedium durchströmt sowie andererseits von einem weiteren Arbeitsmedium umströmt werden (siehe Abbildung 1-1). In den meisten Fällen umströmt das zu kondensierende Medium die innenliegenden Rohre im sogenannten Mantelraum, während hingegen das wärmeaufnehmende Wärmeträgermedium durch die Rohre strömt. [3]



**Abbildung 1-1: Rohrbündelkondensator (nach [4])**

Die technische Realisierung von Problemstellungen hinsichtlich Wärmeübertragung ist jedoch an gewisse Randbedingungen gebunden. Zum einen ist für einen bestimmten zu übertragenden Wärmestrom nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik eine entsprechende Temperaturdifferenz als Triebkraft für die Wärmeleitung erforderlich, wobei der Wärmedurchgang proportional zu diesem Temperaturunterschied ist.

Des Weiteren handelt es sich bei den in der Industrie eingesetzten, kondensierenden Wärmeträgermedien in den seltensten Fällen um ideale Stoffsysteme, wie z.B. reinen Wasserdampf. Vielmehr werden dabei mehrkomponentige Stoffgemische, die u.a. Korrosionsinhibitoren beinhalten, angewandt. Dies wirkt sich jedoch wiederum auf den Wärmeübergang aus, da die

Sättigungstemperatur von den unterschiedlichen Partialdrücken der jeweiligen Komponenten abhängt oder beispielsweise die Benetzung der Wärmeträgermedien beeinflusst wird.

Ein weiterer bedeutender Punkt stellt der benötigte Bauraum dar, insbesondere in nicht-großindustriellen Anwendungen, die im Fall von der Bosch-Unternehmensgruppe hauptsächlich bei Heizungen in Wohnhäusern oder bei Anwendungen in Kraftfahrzeugen liegen. In diesen vergleichsweise kleinen Systemen ist der zur Verfügung stehende Platz begrenzt, zudem spielt die Gewichtsersparnis gerade im Fall von Kraftfahrzeugen eine wichtige Rolle. Bei der Auslegung von Wärmeübertragern muss für die Absicherung einer hohen Prozessstabilität ein Sicherheitsfaktor veranschlagt werden, was sowohl eine Erweiterung des Bauraums als auch zusätzliches Gewicht bedeutet.

Im Gegensatz dazu trägt ein geringerer Bauraum neben der Platzersparnis auch zu einer Senkung des Materialbedarfes und somit zur Kostenreduzierung bei. Aus diesen Gründen sind mit dem Ziel einer Realisierung von kompakteren und leichteren Wärmeübertragern vor allem Modifikationen der Kondenseroberfläche zur Steigerung des Wärmeübergangs für Bosch-Anwendungen von Interesse. In diesem Zusammenhang kommt insbesondere dem Wärmeübergangskoeffizient eine zentrale Rolle zu.

Der Wärmeübergangskoeffizient als Maß für die Intensität des Wärmestroms bezogen auf den treibenden Temperaturunterschied kann im Fall von reiner Tropfenkondensation mehr als 10-fach höhere Werte als für reine Filmkondensation annehmen. [5]

Ungeachtet der Vielzahl von Theorien und Experimenten, die sowohl den Kondensationsprozess an sich als auch seine Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren beschreiben, fehlt dennoch genaue Kenntnis über die komplexen Zusammenhänge der sich z.T. gegenseitig beeinflussenden Parameter. Beispielsweise sind die Keimdichte sowie die Größe der abrollenden Tropfen nur schwer bestimmbar, da die Keimdichte von der topografischen Beschaffenheit sowie Oberflächenenergie der Kondensationsfläche sowie der vorherrschenden lokalen Unterkühlung abhängt. [6]

Aus der gegenwärtigen Literatur ist in einer Vielzahl von Experimenten im Hinblick auf eine Modifikation der Oberfläche vor allem das Aufbringen einer Promotorschicht zur Erhöhung des Wärmeübergangs durch das gezielte Einstellen von Tropfenkondensation bekannt. In diesem Kontext kommen auch zunehmend Oberflächenstrukturen erhöhte Aufmerksamkeit zu, um die Kondensation von Wärmeträgermedien Richtung Tropfenkondensation zu beeinflussen. Allerdings ist es bislang in praktischen Anwendungen sowie unter industriellen Bedingungen nur sehr schwer möglich, Tropfenkondensation über einen längeren Zeitraum aufrechtzuerhalten. Die Ursache dafür liegt maßgeblich in der Degeneration der Materialien bzw. Strukturen.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Vorgehensweise zur Auswahl und anschließenden Charakterisierung und Bewertung von verschiedenen Strukturierungs- und Schichtsystemen zur Erhöhung der Kondensationsleistung zur Anwendung auf Bosch-Produkte. Dabei soll die Kondensationsleistung zunächst exemplarisch anhand von Testrohren mithilfe einer eigens konzipierten Versuchsanlage über die bei der Kondensation von Wasserdampf anfallende Menge an Kondensat ermittelt werden.

---

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf den Überlegungen hinsichtlich der Herangehensweise, um zukünftige Strukturierungen bzw. Beschichtungen zu charakterisieren. Durch die Apparatur soll zunächst ein vorläufiger Eindruck über die Veränderung des Wärmeübergangs infolge unterschiedlicher Oberflächenmodifikationen gewonnen werden. In diesem Zusammenhang sollen Beziehungen zwischen verschiedenen Oberflächentopografien sowie dem Benetzungsverhalten und dem Wärmeübergang ermittelt werden.



## 2 Theoretischer Teil

### 2.1 Wärmeübergang durch Tropfenkondensation

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, spielt in zahlreichen thermischen Prozessen in der Industrie der Wärmeübergang in Fluiden eine zentrale Rolle. Aus diesem Grund kommt dem Verdampfungs- sowie dem Kondensationsmechanismus eine wichtige Bedeutung zu. Im Fall der Kondensation kann diese prinzipiell als Filmkondensation oder als Tropfenkondensation in Erscheinung treten. Da insbesondere die Tropfenkondensation im Vergleich zur Filmkondensation höhere Wärmeübergangskoeffizienten aufweist und somit auch eine höhere Effizienz hinsichtlich der Wärmeübertragung, soll im Folgenden näher auf die Vorgänge der Tropfenkondensation, die Bestimmung des Wärmeübergangs und die Einflussfaktoren auf die Tropfenkondensation eingegangen werden. [6]

#### 2.1.1 Kondensationsmechanismus

Ein Dampf kondensiert dann an einer Wand eines Kühlkörpers aus, wenn die Wandtemperatur geringer als die Sättigungstemperatur des Dampfes ist. Durch die Unterkühlung, die das zuvor gebildete Kondensat infolge des Kontakts mit der kühlen Wandoberfläche erfährt, kann sich weiterer Dampf niederschlagen. [7] Dabei lassen sich grundsätzlich die beiden angesprochenen Arten von Kondensation unterscheiden (siehe Abbildung 2-1):

- Filmkondensation
- Tropfenkondensation

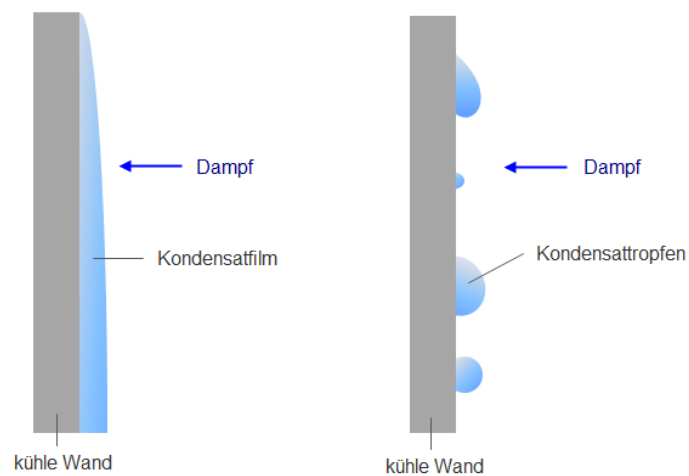


Abbildung 2-1: links: Filmkondensation; rechts: Tropfenkondensation (nach [6])

### 2.1.1.1 Heterogene Keimbildung

Zunächst wird auf atomistischer Ebene die initiale Phase der Tropfenkondensation sowohl durch einzelne als auch durch Cluster von Wasser-Molekülen, die in einem gesättigten Dampf auf eine kalte Substratoberfläche auftreffen, beschrieben. [7] Um die Keimbildung voranzutreiben, ist für die neue Phase Unterkühlung nötig, sodass beim Phasenwechsel Arbeit zur Bildung der neuen Phase, die sogenannte Keimbildungsarbeit  $W_K$  aufgebracht werden muss [8]:

$$W_K = W_O + W_V = \frac{1}{3}\pi R^2 \sigma (2 - 2 \cos \theta - \cos \theta \cdot \sin^2 \theta) \quad (2.1)$$

Laut Gleichung ( 2.1 ) setzt sich die Keimbildungsarbeit aus der Oberflächenarbeit  $W_O$  und der Volumenarbeit  $W_V$  zusammen. Hierbei ist  $R$  der Radius,  $\sigma$  die Oberflächenspannung und  $\theta$  der Kontaktwinkel. Dies gilt nur unter der Gleichgewichtsbedingung laut Gleichung ( 2.2 ) [8]:

$$\gamma_L - \gamma_D = \sigma \cos \theta \quad (2.2)$$

Dabei ist  $\gamma_D$  die Grenzflächenspannung zwischen Wand und Dampf sowie  $\gamma_L$  die Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Wand sowie die vom Kontaktwinkel und Radius abhängigen Beziehungen für die geometrischen Größen der Tropfenoberfläche  $O$  und des Tropfenvolumens  $V$  [8] gemäß den Gleichungen ( 2.3 ) sowie ( 2.4 ) :

$$O = 2\pi R^2(1 - \cos \theta) \quad (2.3)$$

$$V = \frac{1}{3}\pi R^3(1 - \cos \theta) \cdot (2 + \cos \theta) \quad (2.4)$$

Da beim Phasenwechsel die Oberfläche neu gebildet werden muss (siehe Abbildung 2-2), auf die die Oberflächenspannung wirkt, beträgt die Oberflächenarbeit laut Gleichung ( 2.5 ) [8]:

$$W_O = \sigma 2\pi R^2(1 - \cos \theta) + (\gamma_L - \gamma_D)\pi R^2 \sin^2 \theta \quad (2.5)$$

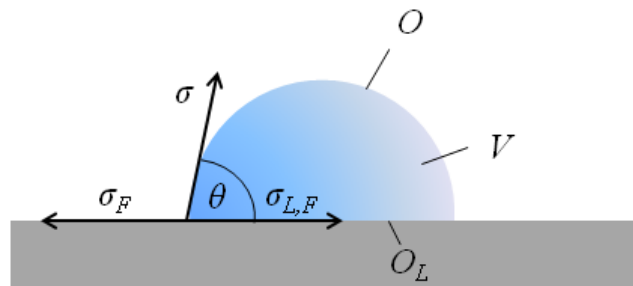


Abbildung 2-2: Zur Ableitung der Keimbildungsarbeit (nach [8])

Bedingt durch den kapillaren Überdruck  $2\sigma/r$  wird nach Gleichung ( 2.6 ) Volumenarbeit gewonnen [8]:

$$W_V = -\frac{2\sigma}{R}V \quad (2.6)$$

Dazu muss einerseits die Unterkühlung so groß sein, dass eine vollständige Kondensation auf der Substratoberfläche möglich ist. Andererseits muss sie noch klein genug sein, um Kondensationsraten zu verhindern, die zu einem für den Wärmeübergang unvorteilhaften Flüssigkeitsfilm führen. [7]

Zur Berechnung der für die Existenz der neuen Phase benötigten Unterkühlung  $\Delta T$  wird der Dampfdruck näherungsweise durch die vereinfachte Gleichung ( 2.7 ) von Clausius-Clapeyron ausgedrückt [8]:

$$\Delta T = \frac{2\sigma V_L}{R V_D} \frac{dT}{dp} \quad (2.7)$$

Dabei sind  $V_L$  und  $V_D$  die Volumina des Dampfes bzw. der Flüssigkeit und  $T$  die absolute Temperatur und  $p$  der Druck. Wie bereits erwähnt, erscheinen die Tropfen plötzlich mit einem bestimmten Radius bei einer entsprechenden Unterkühlung und bilden sich somit nicht kontinuierlich vom Radius Null aus. Dies wird aus Abbildung 2-3 ersichtlich, wo auf der Abszisse der Keimradius  $R$  und der Ordinate die Unterkühlung  $\Delta T$  aufgetragen sind. Der Graph stellt den Zusammenhang zwischen der benötigten Unterkühlung für existenzfähige Tropfen mit einem entsprechenden Keimradius dar. Für kleine Tropfenradien nimmt demnach die Unterkühlung sehr große Werte an. Würden sich Tropfen vom Radius Null an wachsen, so müsste die Unterkühlung gegen Unendlich gehen, welche allerdings durch den Nullpunkt limitiert ist. Aus diesem Grund treten die Tropfen mit einem gewissen thermodynamisch stabilen Radius bei einer korrespondierenden Unterkühlung in Erscheinung. Hierfür muss eine ausreichende Anzahl von Molekülen zufällig zusammenkommen. [8]

### 2.1.1.2 Zusammenhang zwischen Unterkühlung und Keimradius

Laut Gleichung ( 2.1 ) hängt die Keimbildungsarbeit vom Radius sowie dem resultierenden Kontaktwinkel ab. Daher entspricht jedem Kontaktwinkel einem entsprechenden Tropfenradius sowie einer bestimmten Unterkühlung, mit der ein Keim entsteht, wie in Abbildung 2-3 ersichtlich wird. Daraus geht hervor, dass mit abnehmender Unterkühlung der zugehörige Keimradius ansteigt und somit auch die Tropfengröße. Im Fall einer senkrechten gekühlten Wand, an der das Wärmeträgermedium kondensiert, wird ein großer Tropfen bedingt durch seine höhere Masse im Gegensatz zu einem kleinen Tropfen schneller abrollen, was wiederum vorteilhaft für den Kondensationsprozess wäre, da so eine neue Oberfläche verfügbar wäre, auf der neue Keime und als Folge davon Tropfen entstünden (siehe Abschnitt 2.1.1.4). In der Realität sind jedoch diese thermodynamisch vorteilhaften Bedingungen technisch nur schwierig stabil zu halten, es wird mit größerer Unterkühlung gearbeitet, welche kleinere Tropfen zur Folge hat.

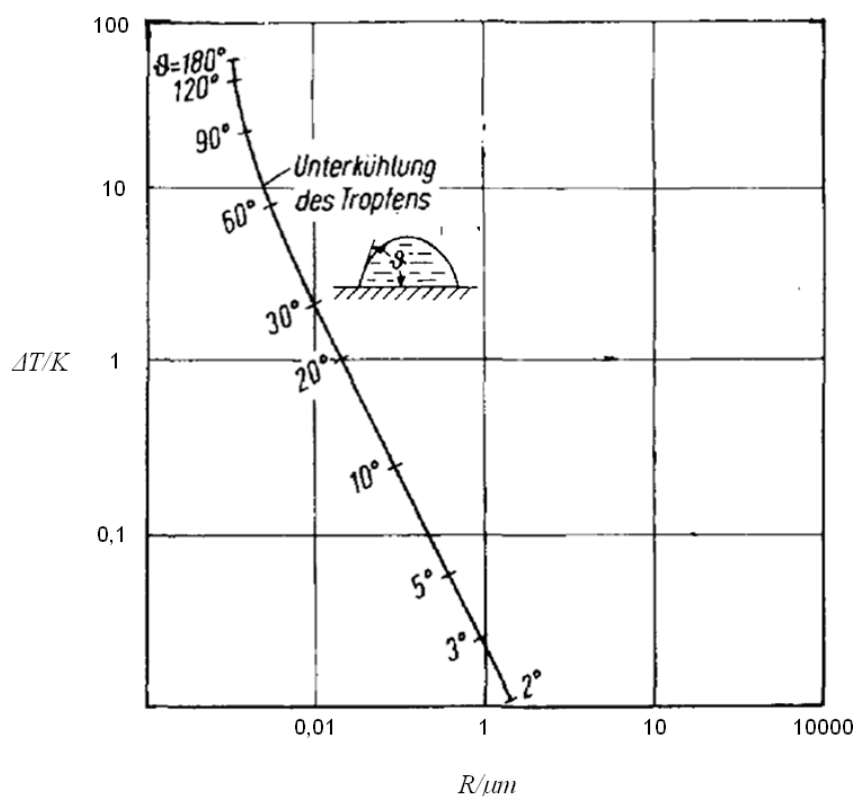


Abbildung 2-3: Zusammenhang zwischen Unterkühlung, Keimradius und Kontaktwinkel (nach [8])

Sobald durch eine Temperaturdifferenz an der Kühlfläche die Unterkühlung erreicht ist, setzt die Keimbildung bevorzugt an jenen bereits vorhandenen Oberflächenrauheiten ein, an denen der Kontaktwinkel genau dieser Temperaturdifferenz entspricht. [8] Somit hängt die Keimdichte hauptsächlich von der Unterkühlung ab, da mit zunehmender Unterkühlung auch die Anzahl der Keimbildungsstellen ansteigt. Dies birgt die Gefahr der Filmbildung auf der Oberfläche infolge des fehlenden Abtransportes der sich nun zusammenschließenden Tropfen, was wiederum den Wärmeübergangskoeffizienten erniedrigt. [8]

### 2.1.1.3 Tropfenwachstum und Ablaufen

In den Anfangsstadien wachsen die einzelnen Tropfen hauptsächlich infolge direkter Kondensation auf der Oberfläche bis sie schließlich anfangen zu koaleszieren. Je nach Keimstellendichte ist ab einer gewissen Tropfengröße die Koaleszenz der dominierende Wachstumsmechanismus. Auf der makroskopischen Ebene kommt der Koaleszenz eine wichtige Bedeutung zur Bestimmung der Tropfengrößenverteilung zu; sie beeinflusst zudem das Abrollverhalten. [7]

Diese Kombination von Wachstum und Abrollen des Kondensattropfens und die damit induzierte Schubbeanspruchung der Wand wirken sich negativ auf die Langzeitstabilität der Promoter-Schicht bzw. Oberflächenstruktur aus, sodass die Beständigkeit der Tropfenkondensation reduziert wird. [7]

### 2.1.1.4 Tropfenkondensation als zyklischer Prozess

In einer rein makroskopischen Modellvorstellung treten erste einzelne Tropfen mit einem gewissen thermodynamisch stabilen Minimalradius an bevorzugten Keimstellen an der Oberfläche auf. [7] Diese wachsen, bis sie die Größenordnung der Abstände zwischen benachbarten Keimstellen erreichen. Ab diesem Punkt kommt es zur Koaleszenz und weiteres Wachstum findet als Kombination von direkter Kombination und Koaleszenz statt. Ab einer bestimmten Neigung der Oberfläche übersteigt die Volumenkraft des Tropfens die Haftkraft aufgrund der Oberflächenspannung, welche den Tropfen auf der Oberfläche hält. Als Folge davon läuft der Tropfen ab und hinterlässt eine blanke Oberfläche, da er durch seinen Impuls beim Ablaufen auf seinem Weg nach unten andere Tropfen in sich aufnimmt und somit Platz für erneute Keimbildung schafft. [7] Aus diesem Grund sollte bei der Auslegung von Wärmeübertragern der Einfluss einer horizontalen bzw. vertikalen Einbaulage auf den Wärmeübergang berücksichtigt werden.

Somit kann die Tropfenkondensation als zyklischer Prozess aufgefasst werden und die aufeinander folgenden Schritte auf unterschiedlichen Größenebenen betrachten, wie in Abbildung 2-4 verdeutlicht ist.



Abbildung 2-4: Tropfenkondensation als zyklischer Prozess

## 2.1.2 Bestimmung des Wärmeübergangs der Kondensation

Der Wärmeübergang bzw. der Transport thermischer Energie als Konsequenz eines Temperaturunterschiedes lässt sich quantitativ über den Wärmestrom sowie den Wärmeübergangskoeffizienten beschreiben. Zunächst sollen die Grundlagen zur Berechnung des Wärmestroms bzw. der Wärmestromdichte sowie des Wärmeübergangskoeffizienten der Tropfenkondensation näher erläutert werden. Im Fall der Tropfenkondensation wird der Wärmeübergang und somit die Kondensationsleistung von zahlreichen variablen Einflussfaktoren beeinflusst, auf die im Abschnitt 2.2 gesondert eingegangen werden soll.

### 2.1.2.1 Wärmeübertragung – Grundlagen

#### 2.1.2.1.1 Arten der Wärmeübertragung

Laut Literatur wird zwischen drei Mechanismen der Wärmeübertragung unterschieden [6]:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Wärmestrahlung

Für den Wärmeübergang hinsichtlich der Kondensation ist von diesen Mechanismen nur die Wärmeleitung als auch die Konvektion von Bedeutung.

Unter Wärmeleitung wird der Transport von Wärmeenergie zwischen benachbarten Atomen bzw. Molekülen als Konsequenz eines vorhandenen Temperaturgradienten verstanden. Im Fall von Metallen tragen auch die freien Elektronen des Elektronengases zur Energieübertragung bei. Phononen als Quasiteilchen übertragen sowohl in Metallen als auch in Nichtmetallen thermische Energie [9].

Während in strahlungsundurchlässigen Festkörpern die Energie ausschließlich über Wärmeleitung transportiert wird, dominiert in Gasen und Flüssigkeiten der Energietransport durch Konvektion (strömende Bewegung) sowie Wärmestrahlung [6]. Der Wärmestrom  $\dot{Q}$  als die in einem Zeitintervall  $\Delta t$  übertragene Wärmemenge  $\Delta Q$  [9] laut Gleichung ( 2.8 ) wird infolge von Stößen, bedingt durch die verstärkten Schwingungen der Teilchen an wärmeren im Vergleich zu kälteren Stellen, von Teilchen zu Teilchen weitergeleitet. Da es sich beim Wärmestrom um eine Wärmeleistung handelt, ist seine Einheit W. [9]

$$\dot{Q} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (2.8)$$

Die Wärmestromdichte ist als die Änderung des Wärmestroms pro Fläche  $A$  definiert (siehe Gleichung ( 2.9 )) und wird in  $W/m^2$  angegeben [10]:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2.9)$$

### 2.1.2.1.2 Wärmeleitung durch Rohrwand mit Beschichtung

Abbildung 2-5 veranschaulicht die Wärmeleitung durch eine Rohrwand, die sich aus dem eigentlichen Grundmaterial des Rohres und einer zusätzlichen Beschichtung auf der Rohroberfläche zusammensetzt. Dabei verfügt sowohl das Grundmaterial über eine gewisse Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{GM}$  wie auch das Schichtmaterial  $\lambda_S$ . Je nach Schichtmaterial und -dicke stellt diese Oberflächenschicht einen zusätzlichen Wärmewiderstand für die Wärmeleitung dar, wobei der Wärmewiderstand des Grundmaterials  $R_{th,GM}$  bzw. der Schicht  $R_{th,S}$  den reziproken Wert der Wärmeleitfähigkeit darstellt. [11]

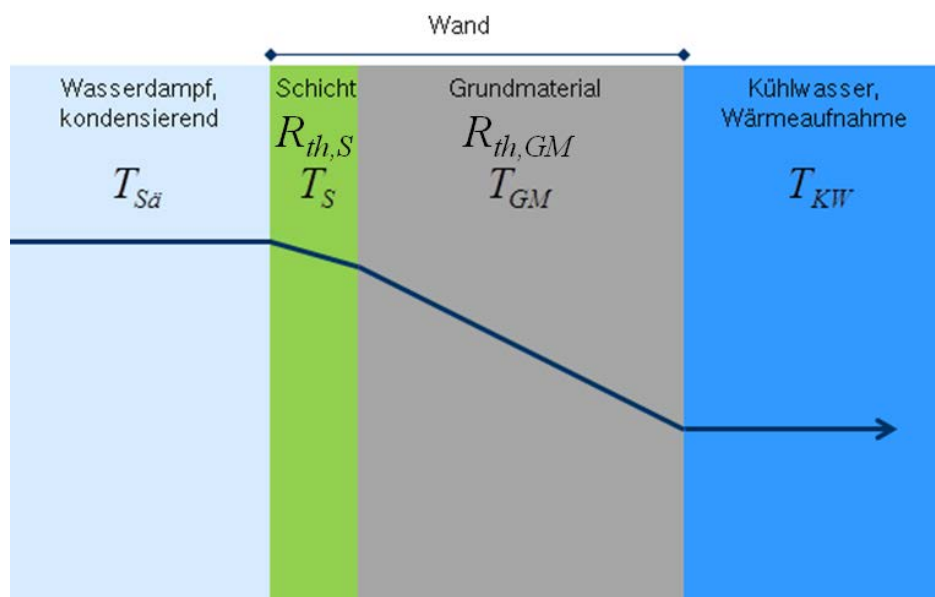


Abbildung 2-5: Wärmeleitung durch Rohrwand mit Beschichtung

Der durch eine Rohrwand übertragene Wärmestrom  $\dot{Q}_{WL}$  aufgrund von Wärmeleitung wird laut dem Fourierschen Gesetz wie folgt gemäß Gleichung ( 2.10 ) berechnet [10] :

$$\dot{Q}_{WL} = \lambda_{GM} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{T_{S\bar{a}} - T_{GM}}{\ln \frac{R_{a,GM}}{R_{i,GM}}} \quad (2.10)$$

Hierbei ist  $\lambda_{GM}$  die Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials,  $L$  die Länge des Rohres,  $T_{Sä}$  die Sättigungstemperatur des Dampfes,  $T_{GM}$  die Temperatur des Grundmaterials des Rohres sowie  $R_{a,GM}$  bzw.  $R_{i,GM}$  der Außen- und Innenradius des Rohres. Aus Gleichung ( 2.10 ) ist ersichtlich, dass die Temperatur innerhalb des Rohres senkrecht zur Oberfläche logarithmisch abnimmt.

Im Fall eines Rohres mit zusätzlicher Beschichtung und somit einer dem Schichtmaterial entsprechenden Wärmeleitfähigkeit addieren sich die Wärmeleitwiderstände, sodass sich obige Gleichung sich in folgenden Ausdruck ( 2.11 ) verändert [12]:

$$\dot{Q}_{WL} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_{Sä} - T_{GM})}{\frac{1}{\lambda_{GM}} \ln \left( \frac{r_{a,GM}}{r_{i,GM}} \right) + \frac{1}{\lambda_S} \ln \left( \frac{R_{a,S}}{R_{i,S}} \right)} \quad (2.11)$$

$R_{a,S}$  ist der äußere Radius der Schicht, was dem gesamten Radius des Grundmaterials zuzüglich der Schicht entspricht. Analog dazu ist  $R_{i,S}$  der innere Radius der Schicht, welcher gleichzeitig den äußeren Radius des Grundmaterials darstellt, was in Abbildung 2-6 veranschaulicht wird.

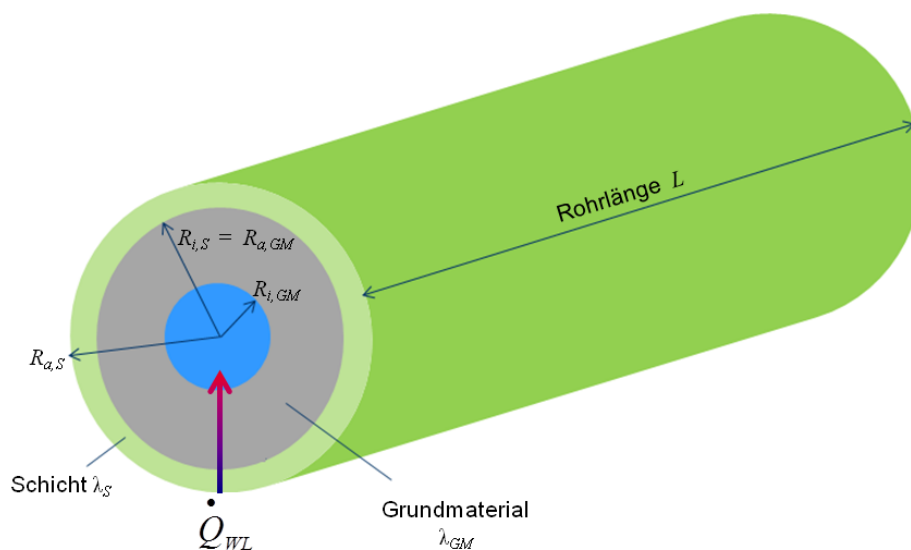


Abbildung 2-6: zur Berechnung der Wärmeleitung durch eine Rohrwand mit Beschichtung

### 2.1.2.1.3 Nußeltsche Wasserhauttheorie

Die im vorherigen Abschnitt 2.1.2.1.2 angestellten Überlegungen berücksichtigen allerdings nicht den auf der Oberflächenschicht aufgrund des kondensierenden Dampfes entstehenden Wasserfilm, welcher wiederum als zusätzlicher Wärmewiderstand wirkt. Die Nußeltsche Wasserhauttheorie zur Berechnung des Wärmeübergangs geht von einem geschlossenen Wasserfilm aus, der die Wandoberfläche bedeckt und schließlich aufgrund der Schwerkraft nach unten linear abläuft. [6] Eine laminare Strömung im Kondensat liegt bei geringer Dampfgeschwindigkeit und einem dünnen Kondensatfilm vor, sodass die Wärmeübertragung vorwiegend über Leitung von der



Kondensatoberfläche zur Wand stattfindet. Die durch Konvektion im Flüssigkeitsfilm übertragene Wärme ist vernachlässigbar gering [6].

Im Gegensatz zum vorherigen Abschnitt 2.1.2.1.2, wo der Wärmeübergang durch eine Rohrwand vereinfacht betrachtet wird, handelt es sich in dieser Theorie um den Wärmeübergang einer Flüssigkeit und einer Wand. Um den Wärmeübergangskoeffizienten zu berechnen, müssen eine Vielzahl von Variablen wie beispielsweise die Strömungsgeschwindigkeit sowie die Strömungsart, die dynamische Viskosität des umgebenden Fluids  $\eta_L$ , die geometrischen Verhältnisse wie die Länge  $L$  sowie die Oberflächenbeschaffenheit berücksichtigt werden. In dieser Betrachtung berechnet sich der Wärmeübergangskoeffizient laut Gleichung ( 2.12 ) [6], in welche  $\rho_L$  bzw.  $\rho_G$  als Dichte der jeweiligen Fluids bzw. des Gases eingehen als auch die Erdschwerebeschleunigung  $g$  und die Verdampfungsenthalpie  $\Delta h_V$ , sowie die Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit  $\lambda_L$ . Des Weiteren stellen  $T_D$  und  $T_W$  die Temperaturen des Dampfes sowie der Wand dar, sodass sich für  $\alpha$  ergibt:

$$\alpha = \left[ \frac{\rho_L (\rho_L - \rho_G) g \Delta h_V \lambda_L^3}{4 \eta_L (T_D - T_W)} \frac{1}{L} \right]^{1/4} = \frac{\lambda_L}{\delta} \quad (2.12)$$

mit der Filmdicke  $\delta$ :

$$\delta = \left[ \frac{4 \lambda_L \eta_L (T_D - T_W)}{\rho_L (\rho_L - \rho_G) g \Delta h_V} L \right]^{1/4} \quad (2.13)$$

Dies bedeutet im Hinblick auf den Wärmeübergang, dass eine stetige Erhöhung der Wasserfilmdicke mit einem zwangsläufigen Anstieg des Wärmewiderstands einher geht und daher mit steigender Rohrlänge eines Wärmeübertragers auch der Wärmewiderstand höher wird. Aus diesem Grund liefert beispielsweise eine senkrechte gekühlte Wand einen schlechteren Wärmeübergang als ein waagrechtes Einzelrohr.

## 2.2 Einflussfaktoren auf den Wärmübergang bei der Kondensation

Der Kondensationsprozess unterliegt zahlreichen Einflussfaktoren, auf die in diesem Abschnitt näher eingegangen werden soll. Abbildung 2-7 gibt eine Übersicht über die Haupteinflüsse und soll damit verdeutlichen, dass insbesondere das langfristige Einstellen von Tropfenkondensation einer umfassenden Betrachtung bedarf.

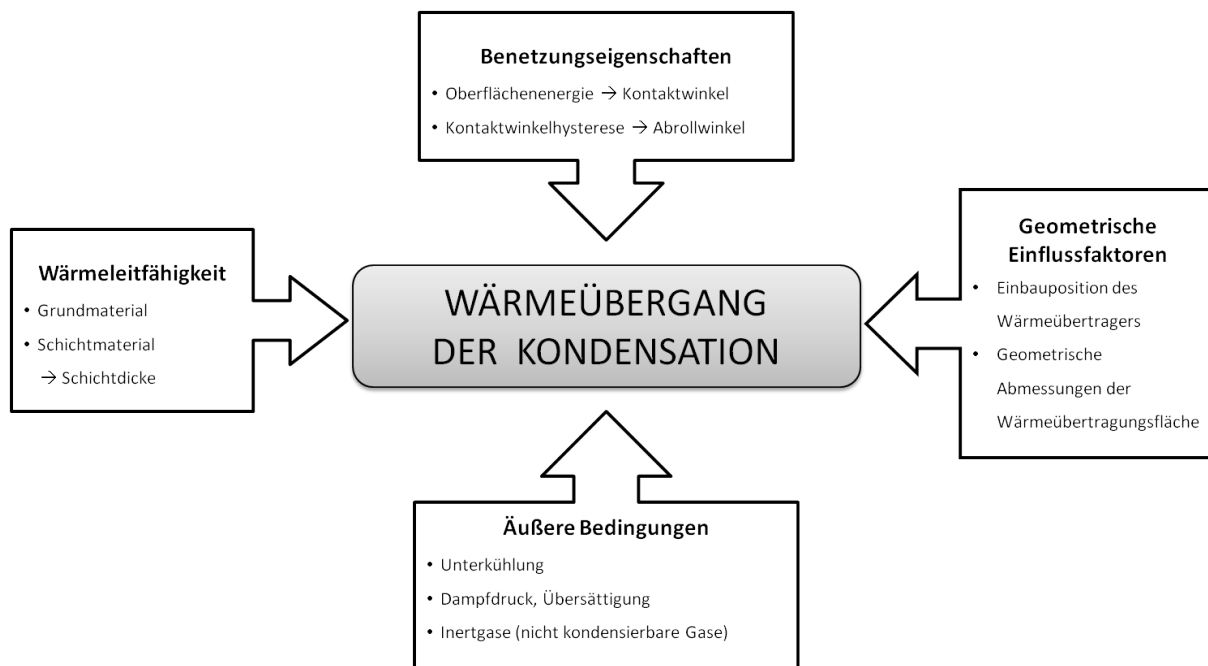


Abbildung 2-7: Einflussfaktoren auf den Wärmübergang bei der Kondensation

### 2.2.1 Benetzungseigenschaften

Sowohl bei der Einstellung der Tropfenkondensation als bevorzugte Kondensationsart gegenüber der Filmkondensation als auch zu ihrer Aufrechterhaltung, kommt den Benetzungseigenschaften der Kondenseroberfläche eine zentrale Rolle zu. Im Abschnitt 2.1.1.3 wurde bereits gezeigt, dass für den hohen Wärmeübergangskoeffizienten der Tropfenkondensation ein schneller Abtransport, d.h. eine niedrige Adhäsion und damit eine unvollständige Benetzung der entstandenen Tropfen auf der Oberfläche von Nöten ist. [13, 14] Dies kann durch entsprechende hydrophobe bzw. superhydrophobe Benetzungseigenschaften der Kondenseroberfläche erreicht werden. Der Benetzung einer Oberfläche durch eine Flüssigkeit stellt eine Kombination von komplexen Prozessen dar, wobei ihre Ursachen in Eigenschaften der Oberflächenchemie sowie in langreichweitigen van-der-Waals-Wechselwirkungen liegen. [7] Im Weiteren soll der Zusammenhang der hydrophoben bzw. superhydrophoben Eigenschaften mit der Oberflächen- bzw. Grenzflächenenergie und dem statischen bzw. dynamischen Kontaktwinkel sowie dem Abrollwinkel eines Tropfens auf einer geeigneten Oberfläche dargestellt werden. Zudem soll auf den Einfluss von strukturierten Oberflächen auf die Benetzung eingegangen werden.

### 2.2.2 Grenzflächenenergie, Adhäsion

Da bei der Kondensation von Wärmeträgermedien bedingt durch deren direkten Kontakt mit der Festkörperoberfläche immer Adhäsion auftritt, bestimmen verschiedene Wechselwirkungen an der Grenzfläche die Qualität der Benetzung. Dabei bildet sich durch Adhäsionskräfte (Wechselwirkungen an der Festkörper-Flüssigkeit-Grenzfläche) sowie Kohäsionskräfte (Wechselwirkungen innerhalb des kondensierten Flüssigkeitstropfen bzw. der Festkörpers) eine Grenzflächenenergie aus. Eine entscheidende Rolle spielen hierbei das Ausmaß der beschriebenen Wechselwirkungen (ionisch, Wasserstoffbrückenbindungen, van-der-Waals-Kräfte) sowie die chemischen Bestandteile der beteiligten Stoffe. Im Allgemeinen beeinflusst der Festkörper mit einer höheren Dichte im Vergleich zur Flüssigkeit die Benetzung stärker als die Flüssigkeit. [13, 15, 16]

### 2.2.3 Kontaktwinkel und Oberflächenenergie

Alle Flüssigkeiten tendieren zur Tropfenform als der kleinstmöglichen Oberfläche aufgrund ihres inneren Zusammenhalts (Kohäsionskräfte). Dadurch ist sichergestellt, dass sich eine maximale Anzahl an Atomen bzw. Molekülen im Volumen befindet, wo sie auf allen Seiten vom Nachbarn mit isotropen Kräften umgeben sind. [16] Allerdings üben an der flüssig-gasförmigen Grenzfläche die anziehenden Kräfte auf ein Teilchen einen asymmetrischen Einfluss aus. Aus diesem Grund kann die Ursache der Oberflächenspannung als Symmetriebruch an der Oberfläche im Vergleich zum Inneren der Flüssigkeit gesehen werden. Durch die fehlenden attraktiven Kräfte von benachbarten Molekülen erfahren die Teilchen in der Nähe der Oberfläche so eine resultierende, senkrecht in die Flüssigkeit stehende Kraft. [16]

Der Kontaktwinkel stellt hierbei den Winkel dar, den ein auf einer Festkörperoberfläche liegender Tropfen mit jener Oberfläche ausbildet. Er gibt Auskunft über die Oberflächenenergie und enthält darüber hinaus Informationen über Wechselwirkungen an den beteiligten Grenzflächen (fest-flüssig, flüssig-gasförmig, etc.). Der Kontaktwinkel nimmt umso größere Werte an, je geringer die Wechselwirkungen sind. [7, 17]

Mithilfe der Young-Gleichung ( 2.14 ) wird der Zusammenhang zwischen der Oberflächenenergie der Kondenseroberfläche  $\sigma_d$ , der Grenzflächenenergie zwischen dieser Oberfläche und dem sich darauf befindenden Kondensattropfens  $\sigma_{L,F}$ , sowie der Oberflächenspannung des Kondensats  $\sigma$  mit dem Kontaktwinkel beschrieben [17]:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_F - \sigma_{L,F}}{\sigma} \quad (2.14)$$

Tropfenkondensation wird durch unvollständige Benetzbarkeit verursacht, die sich wiederum durch hohe Kontaktwinkel von etwa 90° auszeichnet. Das Auftreten der Tropfenkondensation kann bereits

auch bei kleineren Kontaktwinkeln ab etwa  $60^\circ$  geschehen, allerdings übt die Unterkühlung einen Einfluss auf die Beibehaltung der Tropfenkondensation aus. Als Folge davon kann so eine anfängliche Tropfenkondensation in eine Mischung aus Film- und Tropfenkondensation übergehen. [5]

#### 2.2.4 Oberflächenstrukturen, Benetzungsmodelle nach Cassie-Baxter und Wenzel

Hierbei muss beachtet werden, dass obige Gleichung ( 2.14 ) nur für ideal glatte, von chemischen Inhomogenitäten freie Oberflächen gilt. Reale Oberflächen weisen allerdings eine gewisse Rauheit auf und verfügen über lokal unterschiedliche Zusammensetzungen. Des Weiteren können Atome, Ionen bzw. weitere chemische Spezies auf der Oberfläche adsorbiert sein, was sich wiederum auf den im Experiment gemessenen Kontaktwinkel auswirkt. [7]

Zahlreiche Publikationen zeigen, dass die Benetzung insbesondere von Unregelmäßigkeiten der Festkörperoberfläche beeinflusst wird. [7] Je nach vorherrschender Oberflächenrauheit bzw. – topografie und Oberflächenchemie können somit unterschiedliche Benetzungszustände vorliegen: Im sogenannten heterogenen Cassie-Baxter-Zustand befinden sich die Tropfen oberhalb der Mikrostrukturelemente, wie in Abbildung 2-8 zu sehen ist. Hierbei ist noch Luft unter den Tropfen eingeschlossen, die als „Polster“ wirkt. [18]



Abbildung 2-8: Benetzungsmodelle; links: Cassie-Baxter; rechts: Wenzel (nach [18])

Mithilfe des Benetzungsmodells nach Cassie-Baxter lassen sich superhydrophobe Eigenschaften wie geringe Kontaktwinkelhysterese und die damit verbundene erhöhte Mobilität der Kondensattropfen bzw. niedrige Abrollwinkel beschreiben. [16] Der statische Kontaktwinkel  $\theta_{CB}$  eines solchen Tropfens wird laut Cassie [18] mit folgender Gleichung ( 2.17 ) ausgedrückt:

$$\cos \theta_{CB} = \phi \cos \theta_{GG} + \phi - 1 \quad (2.15)$$

In diesem Zusammenhang stellt  $\phi$  den Anteil der vom Tropfen benetzte Festkörperoberfläche dar sowie  $\theta_{GG}$  den im Gleichgewicht vorherrschenden Kontaktwinkel.

Im Gegensatz dazu stehen im homogenen Wenzel-Zustand die Tropfen im direkten Kontakt mit der unteren Bodenfläche, wodurch der Tropfen in seiner Bewegung eingeschränkt wird. Wenzel untersuchte den Einfluss der Oberflächenstruktur auf den Kontaktwinkel bzw. die Benetzung. Da die Oberflächenrauheit um einiges geringer sein muss, dass überhaupt eine Messung des Kontaktwinkels möglich ist, wurde von ihm der Oberflächenbeschaffenheitsfaktor  $r$  eingeführt, der das Verhältnis der wirklichen Oberfläche  $A_{L,F}$  zur zugehörigen geometrischen projizierten Oberfläche  $A$  angibt [16, 19]:

$$r = \frac{A_{L,F}}{A} \quad (2.16)$$

In diesem Fall wird der statische Kontaktwinkel durch Gleichung ( 2.17 ) beschrieben [18]:

$$\cos \theta_{WE} = r \cdot \cos \theta_{GG} \quad (2.17)$$

Aus Gleichung ( 2.17 ) kann abgeleitet werden, dass durch den Rauheitsfaktor nicht nur die hydrophoben sondern ebenso die hydrophilen Oberflächeneigenschaften gesteigert werden können. [19]

### 2.2.5 Kontaktwinkelhysterese und Abrollwinkel

Wenn ein Flüssigkeitstropfen auf eine geneigte Oberfläche aufgetragen wird, treten zwei charakteristische Winkel auf, aus deren Differenz sich die Kontaktwinkelhysterese  $\Delta\theta$  (siehe Abbildung 2-9) ergibt. In diesem Zusammenhang stellt der Fortschreitewinkel  $\theta_f$  den größeren der beiden Winkel an jenem Punkt, an dem die Kontaktlinie zu wandern der Tropfen beginnt, dar. Analog dazu wird der kleinere Winkel, ab dem sich die Flüssigkeitsfront zurückzieht, als Rückzugswinkel  $\theta_r$  bezeichnet. Sie lassen sich experimentell durch oszillierende Messungen bestimmen, indem das Tropfenvolumen sukzessiv vergrößert und verringert wird. [19] Nach Gleichung ( 2.18 ) wird die Kontaktwinkelhysterese als Differenz zwischen Fortschreite- und Rückzugswinkel definiert [20]:

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_r \quad (2.18)$$

Sie kann laut Öner und McCarthy [7] als qualitativer Indikator für die Mobilität der Kondensattropfen gesehen werden, die ihrerseits wieder den Wärmeübergang und somit die Kondensationsleistung beeinflusst (siehe Abschnitt 2.1.1.3). So hat eine hohe Hysterese zur Folge, dass sich Kräfte entlang

und senkrecht zur Wandoberfläche ausbilden und den Tropfen stabilisieren. Umgekehrt bedeutet eine niedrige Hysterese ein leichteres Abrollen des Tropfens und daher einen verbesserten Wärmeübergang. [7]

Die Existenz einer Kontaktwinkelhysterese verfügt über eine Vielzahl von Ursachen, wobei die Oberflächenrauheit zu einem großen Teil zum Auftreten der Hysterese beiträgt. Beim Ausbreiten des Tropfens auf einer rauen Oberfläche bewegt der Tropfen sich stets auf eine Stelle, in welcher die Grenzfläche annähernd der gleiche Kontaktwinkel zur Oberfläche wie zuvor einnimmt. Daraus resultiert, dass der Tropfen an der weiteren Ausbreitung gehindert wird. Dies dauert allerdings nur so lange an, bis der Tropfen eine gewisse Größe erreicht hat, sodass die Unebenheit überwunden werden kann und so eine weitere Ausbreitung möglich ist. Wird das Tropfenvolumen verringert, tritt derselbe Effekt auf, was die Kontaktwinkelhysterese zur Folge hat. Chemische Heterogenitäten der Oberfläche tragen ebenfalls zum Auftreten der Hysterese bei. Die Kontaktlinie des Tropfens wird bei seiner Ausbreitung durch verhältnismäßig lyophobe (flüssigkeitsabweisende) Bereiche festgehalten (Pinning), während hingegen bei der Verringerung des Tropfens die Kontaktlinie von lyophilen Regionen gepinnt wird. Zudem können an der Kontaktlinie akkumulierte Verunreinigungen des Wassers das Benetzungsverhalten beeinflussen, was sich wiederum je nach Behinderung bzw. Erleichterung des Benetzungsverhaltens in der Hysterese niederschlägt. Eine weitere Quelle für das Auftreten einer Kontaktwinkelhysterese stellt die Energiedissipation infolge von Adsorption und Desorption von Molekülen im Zusammenhang der Ausbreitung bzw. Zurückziehen des Tropfens dar. In der Realität liegt häufig eine Kombination etlicher Effekte vor. [21]

Des Weiteren kann die Hysterese Aufschluss über die Beschaffenheit der Oberfläche wie beispielsweise die Größenordnung und Topografie der Oberflächenrauheit, Inhomogenitäten sowie Verunreinigungen bzw. stoffliche Zusammensetzungen geben. [22, 7]

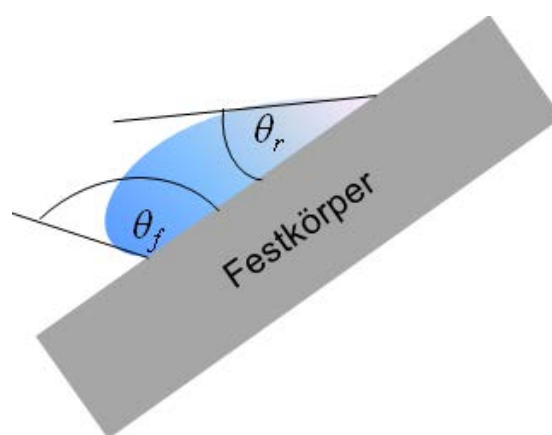


Abbildung 2-9: Kontaktwinkelhysterese auf geneigten Oberflächen (nach [23])

Im Fall von homogener Benetzung nach Wenzel, nimmt mit zunehmender Rauheit auch die Kontaktwinkelhysterese zu, während hingegen sie bei heterogener Benetzung nach Cassie mit zunehmender Rauheit niedrige Werte sowie hohe Kontaktwinkel aufweist. [22] Dies hat ebenfalls zur

Folge, dass sich bereits bei niedrigen Neigungswinkeln Cassie-Tropfen in Bewegung setzen, jedoch aufgrund der hohen Kontaktwinkelhysterese Wenzel-Tropfen ungeachtet hoher Kontaktwinkel an der Oberfläche haften bleiben und nicht bzw. nur schwer abrollen und demnach über höhere Adhäsionskräfte und erhöhte Reibeigenschaften verfügen. Dieser Zustand kann sich insbesondere über Kondensation eines Dampfes erreicht werden, aber auch durch äußeren Druck hervorgerufen werden. [24] Eine vorhandene Oberflächentextur wirkt sich aus diesem Grund ambivalent auf das Abrollverhalten bzw. die Kontaktwinkelhysterese aus, je nachdem in welchem Ausmaß die Flüssigkeit in die Unregelmäßigkeiten der Oberfläche des Festkörpers eindringt. [24]

### **2.2.6 Wärmeleitfähigkeit**

Wie bereits in Abschnitt 2.1.2.1.2 erwähnt, sind für den Wärmeübergang die jeweiligen Wärmeleitfähigkeiten aller beteiligten Materialien besonders von Bedeutung. Um einen effizienten Wärmeübergang zu ermöglichen, sollte die Wärmeleitfähigkeit einen möglichst hohen Wert aufweisen. Aus diesem Grund sind vor allem Metalle wie Kupfer, Aluminium und Eisen (Stahl) für die Anwendung in beispielsweise Rohrbündelkondensatoren geeignet.

Im Hinblick auf eine Oberflächenbeschichtung kann ab einer bestimmten Schichtdicke der Wärmeübergang negativ beeinflusst werden, da diese Schicht einen zusätzlichen Wärmewiderstand darstellt, insbesondere wenn es sich um eine organische oder keramische Schicht auf Metall mit geringem Wärmeleitvermögen handelt. Auf diese Thematik wird in Kapitel 3, Abschnitt 3.2 näher eingegangen.

### **2.2.7 Äußere Bedingungen**

Die Kondensationsleistung hängt neben den bereits erwähnten materialspezifischen Eigenschaften wie Oberflächenenergie oder Wärmeleitfähigkeit auch maßgeblich von den äußeren Bedingungen, unter denen die Kondensation stattfindet, ab.

Diese Parameter sind zum einen die Unterkühlung, also die Differenz zwischen der Temperatur der Kondenseroberfläche und der Temperatur des Kühlwassers, und zum anderen die Übersättigung des Dampfes, der wiederum vom Druck, dem sog. Sättigungsdruck abhängt. Da diesem Sättigungsdruck im Fall von Flüssigkeiten eine gewisse Siedetemperatur entspricht, sind daher Temperatur und Druck nicht mehr voneinander unabhängig und beeinflussen sich gegenseitig. [25] Eine Sättigung liegt dann vor, wenn der Dampfdruck dem Sättigungsdruck entspricht. Somit ist eine weitere Erhöhung der Konzentration in der Luft durch den Dampf nicht mehr möglich, weil die Luft bereits den höchstmöglichen Feuchtigkeitsgrad (maximale Luftfeuchte bei Wasserdampf) enthält.

Beim Kondensationsprozess wird durch das Ausmaß der Übersättigung maßgeblich bestimmt, welche Art der Kondensation (Film- oder Tropfenkondensation) sich einstellt. So wird bei geringer

Übersättigung die Tropfenkondensation begünstigt, während hingegen bei hoher Übersättigung die Filmkondensation dominiert, da hierbei die Oberfläche von den sich zusammenschließenden Tropfen regelrecht „geflutet“ wird. Des Weiteren wird durch eine hohe Übersättigung die Bildung von immobilen Wenzel-Tropfen verursacht. [26]

### 2.2.8 Inertgas

Anteile an Inertgas (wie z.B. Stickstoff in der Umgebungsluft) führen zu einer Absenkung des Partialdrucks des kondensierenden Dampfes, was ebenfalls ein Absinken der Sättigungstemperatur zur Folge hat. Wie in Abbildung 2-10 veranschaulicht ist, bildet sich an der Oberfläche des Kondensatfilms  $\delta$  eine Gasschicht mit einem hohen Anteil an Inertgas  $\delta_{Diff}$ . Diese wirkt als Barriere für den Dampf, da die Wasserdampf-Moleküle zunächst durch diese Grenzschicht diffundieren müssen um an die kühlere Oberfläche zu gelangen um dort zu kondensieren. Bedingt durch die Anreicherung der nicht kondensierbaren Gase steigt ihr Partialdruck  $p_{nG}$ , wohingegen der Partialdruck des Dampfes  $p_D$  sinkt. Damit einhergehend nimmt in Nähe der Phasengrenze ebenfalls die Sättigungstemperatur des Dampfes ( $T_D$  –Kurve in Abbildung 2-10) ab. Je höher der Anteil der Inertgase vor der Phasengrenze, desto mehr nimmt auch die Kondensattemperatur an der Phasengrenzfläche  $T_I$  ab, wodurch Massenstrom  $\dot{M}_D$  und Wärmestrom  $\dot{Q}$  ebenfalls sinken. [27] Diese Mechanismen wirken sich negativ auf die Kondensationsleistung aus. Laut Christen wird der Wärmeübergang im Fall von Wasserdampf bei bereits 1% Luftanteil auf die Hälfte reduziert. [28] Somit muss verstärkt gekühlt oder die Kondensationsfläche erhöht werden, um die Kondensationsleistung aufrechtzuerhalten. Daher muss besonders auf eine ausreichende Entlüftung der Versuchsanlage geachtet werden. [28]

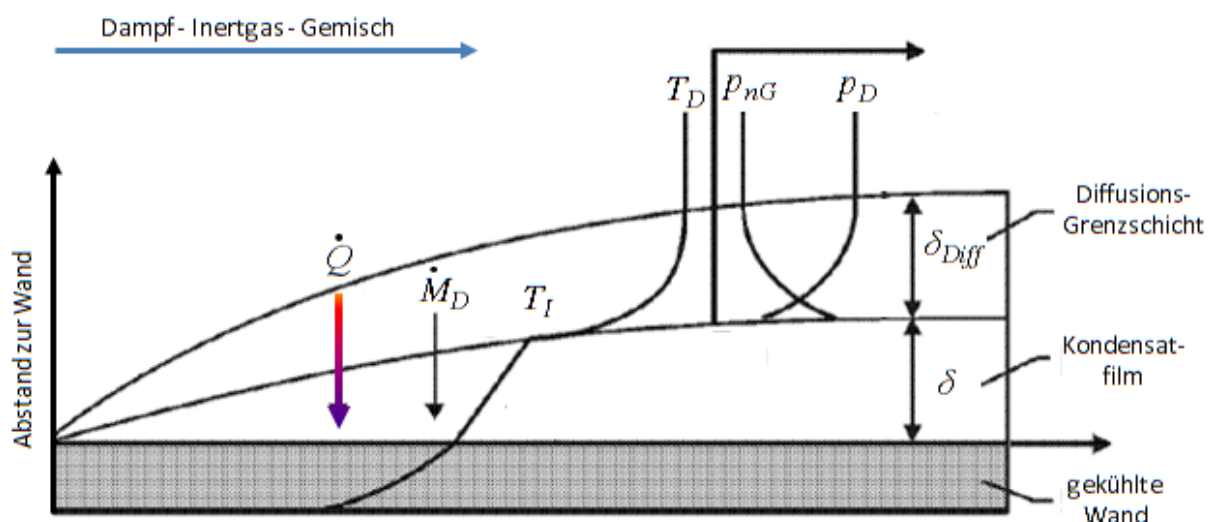


Abbildung 2-10: Einfluss von nicht kondensierbaren Gasen auf die Kondensation (nach [27])



### 2.2.9 Geometrische Einflussfaktoren

Der Wärmeübergang wird neben den Abmessungen der für die Kondensation zur Verfügung stehenden Fläche auch von der Neigung der Kondenseroberfläche beeinflusst, wie Leipertz und Fröba [14] in folgender symmetrischer Funktion ( 2.19 ) bzw. ( 2.20 ) ausdrücken:

$$\frac{\alpha(\beta)}{\alpha(90^\circ)} = [\sin \beta]^n \quad (2.19)$$

bzw.

$$\alpha(\beta) = \alpha(90^\circ) \cdot [\sin \beta]^n \quad (2.20)$$

Die Funktionen ( 2.19 ) und ( 2.20 ) beschreiben physikalisch, dass auf geneigten Oberflächen die effektive Beschleunigung aufgrund der Gewichtskraft durch ihre zur Oberfläche parallelen Anteile ( $g \sin \beta$ ) ersetzt werden kann. Je nachdem, ob die Tropfen auf der Substratoberfläche ruhend oder daran hängen, sowie unter welchem Neigungswinkel  $\beta$  nimmt der Exponent  $n$  unterschiedliche Werte an.

Hierbei zeigte sich, dass bei einer Neigung von  $90^\circ$  der Substratoberfläche der Wärmeübergangskoeffizient am höchsten ist; ebenfalls nimmt er für am Substrat hängende Tropfen höhere Werte an als für ruhende Tropfen. Dieses Verhalten erklärt sich dadurch, dass mit zunehmender Neigung der Oberfläche die Tropfen leichter abrollen können und somit ein neuer Kondensationszyklus starten kann (siehe Abschnitt 2.1.1.4).

Im Gegensatz dazu vereinigen und spreiten sich auf einer horizontal orientierten Kondenseroberfläche insbesondere die ruhenden Tropfen, sodass es zur Ausbildung eines immobilen Films kommt. Im Fall der an der Oberfläche hängenden Tropfen kommt es zwar zum Abfallen der sich ebenso zusammengeschlossenen Tropfen infolge der Schwerkraft, jedoch kann auch hier das Kondensat nicht regelmäßig von der Kondenseroberfläche abgeführt werden. Dies äußert sich dann in niedrigeren Werten des Wärmeübergangskoeffizienten. [7, 14]

### 3 Experimenteller Teil

Um den Einfluss von hydrophob wirkenden Oberflächenstrukturierungen in Kombination mit ebenfalls hydrophoben Schichten auf den Wärmeübergang zu untersuchen, soll im folgenden Kapitel zunächst die allgemeine Vorgehensweise zur Erzeugung der hydrophoben Schichten bzw. Oberflächenstrukturen auf Testsubstraten zur Einstellung von Tropfenkondensation beschrieben werden. Dazu gehören mechanische Bearbeitungsverfahren wie beispielsweise Sandstrahlen oder Schleifen sowie je nach Schichtmaterial Ätzprozesse und galvanische Verfahren oder Sol-Gel-Prozesse. Ferner werden zum einen die zur Anwendung kommenden Methoden zur Charakterisierung der Oberflächentopografie und der hydrophoben Eigenschaften erläutert, sowie zum anderen ein speziell zur Erfassung der Kondensationsleistung konzipierter Versuchsstand vorgestellt.

#### 3.1 Allgemeine Vorgehensweise

Zur Visualisierung der allgemeinen Vorgehensweise im Rahmen dieser Arbeit soll der Workflow in Abbildung 3-1 dienen.

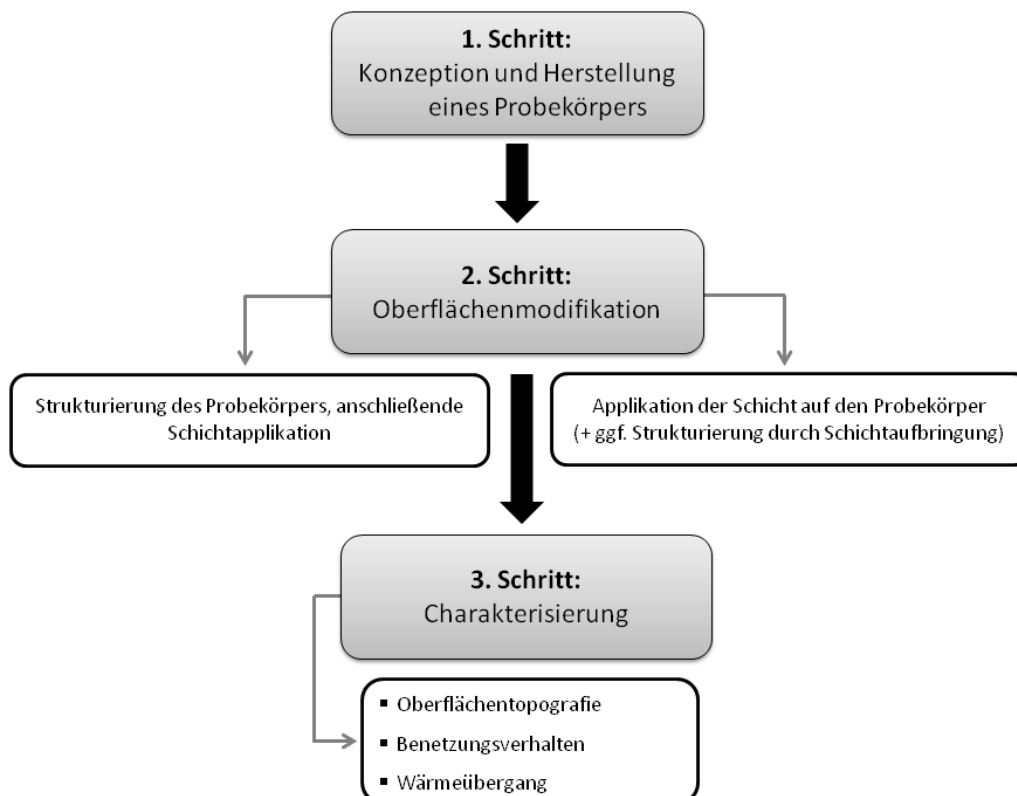


Abbildung 3-1: Detaillierte Übersicht der durchgeführten Oberflächenmodifikationen sowie Charakterisierungsmethoden

Zu Beginn stand die Entwicklung einschließlich Fertigung eines für die Aufgabe geeigneten Probekörpers. Als Testkörper wurden Rohre mit einer Länge von 145 mm, einem Außendurchmesser von 22 mm und einer Wandstärke von 2 mm verwendet, wobei zusätzlich auf zwei gegenüberliegenden Seiten Planflächen mit einer Breite von 10 mm gefräst wurden. Abbildung 3-2 zeigt ein Testrohr aus Kupfer, auf der oberen Seite ist dabei die gefräste Planfläche zu erkennen.



**Abbildung 3-2: Testrohr**

Der Einsatz von Rohren bietet zum einen den Vorteil der leichten Austauschbarkeit im Versuchsaufbau; zum anderen werden industrielle Wärmeübertrager oft in Rohrform gebaut.

Da Metalle durch ihre hohe Wärmeleitfähigkeit als gängige Grundmaterialien für Wärmeübertrager eingesetzt werden, wurden zum Vergleich folgende Grundmaterialien für die Rohsubstrate ausgewählt:

- Kupfer
- Baustahl (S235JR+AR)

Die Planflächen dienten als Referenzfläche zur Messung von Kontakt- und Abrollwinkel und Oberflächentopografie, sowie zur verbesserten Beobachtung der Kondensation.

Da aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit der beiden Metalle sich die Kondensationsleistungen nicht direkt vergleichen lassen, konnte lediglich ein Vergleich aller Kupfersubstrate untereinander sowie aller Stahlsubstrate erfolgen. Daher werden im Folgenden jeweils die Kupfersubstrate mit Set A und Stahlsubstrate mit Set B bezeichnet.

Im zweiten Schritt erfolgte anschließend die Modifikation der Oberfläche. Prinzipiell existieren zwei grundlegende Mechanismen, um die Oberfläche eines Substrates zu modifizieren: zum einen kann die Festkörperoberfläche direkt strukturiert werden, wie dies beispielsweise durch mechanische, spanabhebende Bearbeitungsverfahren der Fall sein kann oder auch durch chemische bzw. physikalische Ätzprozesse. Durch diese Bearbeitung erhält die Oberfläche eine charakteristische Struktur, die die Oberflächeneigenschaften im Hinblick auf das Benetzungsverhalten beeinflussen. Nach der Strukturierung kann eine funktionelle Beschichtung auf die Oberfläche aufgebracht werden. Andererseits besteht die Möglichkeit, zunächst die gewünschte Schicht zu applizieren um im

Anschluss die Schicht zu strukturieren bzw. bereits durch die Schicht je nach Material eine intrinsische Strukturierung erfolgt. Dies ist z. B. bei Chromschichten der Fall, deren Oberflächen durch geeignete Prozesse halbkugelförmige Oberflächenstrukturen aufweisen können.

Nach der Oberflächenmodifikation folgt im dritten Schritt die Charakterisierung der Probekörper hinsichtlich Topografie, Benetzungsverhalten sowie Wärmeübergang über die Kondensationsleistung.

### **3.2 Strukturierung der Rohsubstrate und Applikation der Schichtmaterialien**

Im Hinblick auf sowohl die Strukturierung als auch die Auswahl und Applikation der Schichtmaterialien im industriellen Maßstab spielt neben den Material- und Prozesskosten auch eine schnelle und einfache Durchführung des Strukturierungs- und Beschichtungsprozesses eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund bieten sich Verfahren an, die ohnehin Teil des Bearbeitungsprozesses eines Wärmeübertragers sind bzw. in der Industrie gängige Oberflächenbearbeitungsverfahren, wie beispielsweise spanabhebende Verfahren oder chemische Ätzprozesse. Diese bieten den Vorteil, dass die Prozessparameter weitgehend bekannt sind oder sich leicht anpassen lassen. Des Weiteren lassen sie sich die Verfahren beliebig von Kleinserien zu Großserienfertigung skalieren. Durch diese Bearbeitung entstehen charakteristische Oberflächenstrukturen, die im Anschluss auf ihre Wirkung auf das Kondensationsverhalten untersucht werden.

Nach der Strukturierung der Rohsubstrate erfolgte die Applikation der jeweiligen Schichtmaterialien. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwiefern das Schichtmaterial bzw. die Schichtdicke den Wärmeübergang beeinflussen, da nach Gleichung ( 2.11 ) durch jede zusätzliche Schicht je nach Material und Dicke der Wärmewiderstand erhöht wird. Aus diesem Grund wurden vor der Aufbringung der Beschichtungen Überlegungen angestellt, ab welchen Schichtdicken der Wärmeübergang signifikant verschlechtert wird. Dazu wurde mithilfe Gleichung ( 2.11 ) die Wärmestromdichte bei konstanter Unterkühlung über die Schichtdicke im Fall des in Abschnitt 3.1 vorgestellten Rohsubstrats ermittelt, was in Abbildung 3-3 dargestellt wird. Für diese Berechnungen wurde exemplarisch Kupfer als Grundmaterial des Rohsubstrates mit einer Wandstärke von 2 mm und Gold als Schichtmaterial angenommen. Es zeigt sich, dass die Wärmestromdichten bis zu einer Schichtdicke von 10  $\mu\text{m}$  nahezu konstant bleibt, dann allerdings abfällt. Dies gilt sowohl für geringe als auch für größere Unterkühlungen von 2,5 K bzw. 20 K.

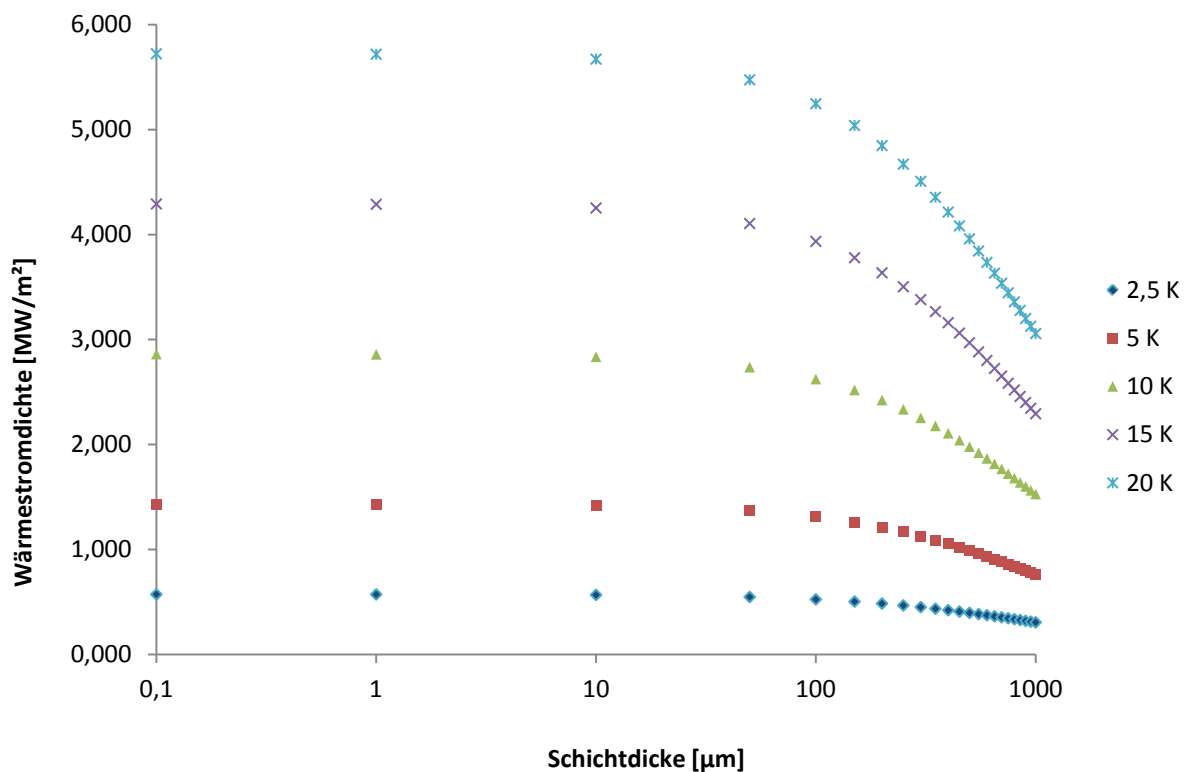


Abbildung 3-3: Wärmestromdichte in Abhängigkeit der Schichtdicke

### 3.2.1 Set A: Kupferrohrsubstrate

Tabelle 3-1 sowie Abbildung 3-4 geben einen Überblick über die eingesetzten Oberflächenstrukturierungen sowie Schichten im Fall von Set A. Kupferrohre werden üblicherweise mittels Ziehen gefertigt, wodurch sich eine charakteristische Oberflächentextur einstellt. Als Referenztestrohr diente in diesem Zusammenhang ein blankes Kupferrohr mit besagter Textur mit der Bezeichnung Cu\_1.

Zur Untersuchung eines etwaigen Einflusses einer Oberflächenstruktur wurde zusätzlich eine Kupferoxid-Struktur durch Oxidation der Kupferrohroberfläche erzeugt, welche im Folgenden mit Cu\_2 bezeichnet wird. Dazu wurde das Rohrsubstrat für 1 min in eine Ätzlösung bestehend aus einem Teil 15%-iger Fe(III)-Lösung sowie einem Teil 37%-ige konzentrierte Salzsäure im Verhältnis 1:1 bei Raumtemperatur getaucht.

Darüber hinaus wurden Kupferrohrsubstrate galvanisch mit Gold überzogen, da aus der Literatur bekannt ist, dass Gold als Promotorschicht zum Einstellen von Tropfenkondensation wirkt. [5, 6] Um den möglichen Einfluss einer Oberflächenstruktur zu untersuchen, wurden einerseits eine glatte sowie andererseits eine „raue“ Goldoberfläche erzeugt. Um die raue Goldoberfläche (Cu\_3) zu erzeugen, wurde Gold auf ein vorweg nach obiger Prozedur oxidiertes Kupferrohr abgeschieden. Im Fall der glatten Goldoberfläche (Cu\_4) wurde dies zunächst durch Vernickeln des Kupferrohrs im hocheinebnenden Nickel-Bad bei 3 V Badspannung und 14,2 A für 15 min bei 60°C als Unterschicht

und anschließendem Vergolden im galvanischen Goldbad bei 2,7 V Badspannung und 1,5 A für 5 min bei 45°C mit 0,3% zugesetztem Kobalt bewerkstelligt. In Abbildung 3-4 c) und d) ist der Unterschied zwischen Cu\_3 und Cu\_4 deutlich am Glanz der Oberfläche zu sehen, wobei Cu\_3 ein mattes Erscheinungsbild aufweist, die glatte Goldoberfläche von Cu\_4 glänzt.

**Tabelle 3-1: Übersicht Set A: Kupferrohsubstrate**

Bezeichnung	Strukturierung	Schicht
Cu_1	Anlieferzustand	-
Cu_2	Anlieferzustand	Kupferoxid
Cu_3	Anlieferzustand	Gold
Cu_4	hocheingebnet	Gold



**Abbildung 3-4: Übersicht Set A**

### 3.2.2 Set B: Stahlsubstrate

Im Set B wurden glatte, blanke sowie geschliffene und sandgestrahlte Stahlrohre, die teilweise verchromt und hydrophob silanisiert wurden, untersucht. In Tabelle 3-2 und Abbildung 3-5 sind alle Kombinationen aufgeführt.

Wie bereits bei Set A, diente auch hier ein blankes Stahlrohr im Anlieferzustand mit noch sichtbarer Längsschweißnaht als Bezugstestsubstrat, was im Folgenden als St\_1 bezeichnet wird. Des Weiteren wurde ein weiteres Stahlrohr sandgestrahlt. Als Strahlgut wurde Normal-Korund mit einer Körnung von 0,4 mm verwendet, dabei betrug der Strahldruck 2800 bar. Das Resultat dieser spanabhebenden

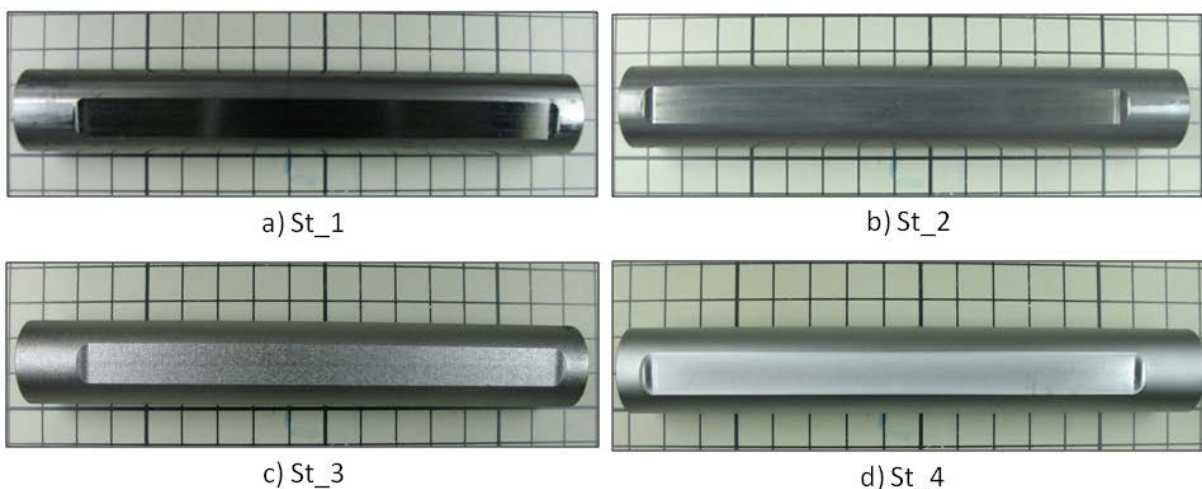
Oberflächenbearbeitungsverfahren sind unterschiedliche, charakteristische Oberflächentopografien, die im anschließenden Abschnitt 3.3.1 näher untersucht werden.

Um die Oberfläche noch zusätzlich zu hydrophobisieren, wurde sowohl auf das sandgestrahlte Testrohr (St\_3) als auch auf ein weiteres blankes Stahlrohr (St\_2) eine Silanschicht mittels Sol-Gel-Tauchbeschichtung als antiadhäsiver, durchsichtiger Topcoat aufgebracht. Zu diesem Zweck wurde das modifizierte Siliciumoxidsol H 5055 von FEW Chemicals verwendet.

Nach Finnicum und Westwater zeigte eine galvanisch abgeschiedene Hartchromschicht Tropfenkondensation, dabei ist allerdings unklar, ob dies durch Inhomogenitäten bedingt ist. [29] Eine übliche Hartchromschicht weist stets eine gewisse Mikrorissigkeit auf, wobei sich ein Netzwerk von feinen Rissen auf der Oberfläche ausbildet. [30] Es ist anzunehmen, dass diese Rissigkeit auf die sich bei der Kondensation bildende Tropfen einen Pinning-Effekt ausübt. Allerdings ist es darüber hinaus durch geschickte Prozessführung möglich, eine kalottenartige Struktur auf der Oberfläche zu erzeugen. Zu diesem Zweck wurden Stahltestrohre (St\_4) durch die Firma Topocrom GmbH im geschlossenen Reaktor hartverchromt, um die Wirkung einer Chromschicht mit einer statistischen Verteilung der Kalotten auf das Kondensationsverhalten zu untersuchen.

**Tabelle 3-2: Übersicht Set B: Stahlrohrsubstrate**

Bezeichnung	Strukturierung	Schicht
St_1	Anlieferungszustand	-
St_2	Anlieferungszustand	Silan
St_3	sandgestrahlt	Silan
St_4	-	Chrom



**Abbildung 3-5: Übersicht Set B**

## 3.3 Charakterisierung

### 3.3.1 Oberflächentopografie

#### 3.3.1.1 Dreidimensionale Konfokalmikroskopie

Die Oberflächenrauheit der strukturierten und beschichteten Rohsubstrate wurde optisch mithilfe dreidimensionaler Konfokalmikroskopie charakterisiert. Hierzu wurde ein 3D-Konfokalmikroskop  $\mu$ Surf explorer des Herstellers NanoFocus sowie die zugehörige Analysesoftware  $\mu$ Soft analysis verwendet.

Ein Grundproblem aller Oberflächencharakterisierungsmethoden stellt die Wahl von Parametern dar, die idealerweise in Korrelation mit der jeweiligen Oberflächenfunktionalität stehen. Aus diesem Grund existieren zahlreiche Charakterisierungsparameter von Oberflächentopografien. Mit dem bereits erwähnten Messsystem lassen sich sowohl typische zweidimensionale Rauheitskennwerte für Oberflächenprofile wie beispielsweise die mittlere Rauheit  $R_a$  oder die gemittelte Rautiefe  $R_z$  (etc.) an bestimmten, auswählbaren Profilstrecken erfassen als auch ihre in drei Dimensionen entsprechenden, extrapolierten Kennwerte der Oberflächentopografie. Viele der zweidimensionalen Parameter stellen in diesem Fall keine angemessene bzw. ausreichende Charakterisierungsmethode dar aufgrund ihrer unzureichenden Beschreibung der realen, dreidimensionalen Ausdehnung der Probenoberfläche. Kondensierende Wassertropfen sind allerdings dreidimensionale Objekte, die sich auf einer Fläche befinden, und dementsprechend von ihren Topografieelementen beeinflusst werden.

In diesem Zusammenhang wurde daher besonderes Augenmerk auf die dreidimensionalen Oberflächenparameter der Testrohoberflächen gerichtet mit der Absicht, diese Parameter in Beziehung zu den hydrophoben Eigenschaften der Oberflächen und somit auch zur Kondensationsleistung zu setzen. Dazu wurde zunächst in einem definierten, belichteten Messfeld von  $1600 \times 1544 \mu\text{m}$  in x- und y-Richtung die jeweilige Probenoberfläche vertikal in z-Richtung über einen Messbereich von  $349 \mu\text{m}$  mithilfe einer Piezoverstelleinheit gescannt und dabei alle  $0,59 \mu\text{m}$  die Probenoberfläche fokussiert. Dies entsprach einer Anzahl von 597 Einzelbildern, die in die Berechnung des gesamten, gescannten Ausschnitts der Oberflächentopografie eingingen. Alle Messungen wurden mit einem Objektiv 10-facher Vergrößerung durchgeführt um in Erfahrung zu bringen, welche Oberflächencharakteristika einen makroskopischen Tropfen hinsichtlich seiner Mobilität und hydrophoben Eigenschaften beeinflussen. Dabei wurde beispielhaft für alle Oberflächen der Probekörper jeweils ein Ausschnitt gescannt, sodass anhand von dieser Basis die relevanten Oberflächenparameter exemplarisch berechnet wurden.



## 3.3.1.1.1 Ausgewählte 3D-Parameter

Tabelle 3-3 gibt eine Übersicht über adäquat erscheinende 3D-Parameter zur Charakterisierung der Testrohoberflächen.

Die in Tabelle 3-3 aufgeführten Parameter stellen lediglich einen kleinen Ausschnitt aller prinzipiell in der Norm DIN EN ISO 25178 beschriebenen Oberflächenkenngrößen dar. Sie wurden im Rahmen dieser Arbeit anhand der wesentlichen strukturell sowie morphologisch unterschiedlichen Merkmale der verschiedenen Oberflächen, die Einfluss auf das Benetzungsverhalten ausüben, ausgewählt. Dies können beispielsweise die Anzahl der Spitzen sein, auf denen ein Tropfen als dreidimensionales Gebilde aufliegt sowie deren Krümmungsradius.

**Tabelle 3-3: Ausgewählte 3D-Parameter nach DIN EN ISO 25178 [31]**

Parameter	Parameterfamilie	Definition nach DIN EN ISO 25178
Str	Raumparameter	<i>Seitenverhältnis der Oberflächentextur</i> : Verhältnis des horizontalen Abstandes der Autokorrelationsfunktion mit dem schnellsten Abklingen auf einen vorgegebenen Wert zum horizontalen Abstand der Autokorrelationsfunktion mit dem langsamsten Abklingen
Sdr	Hybridparameter	<i>Entwickeltes Übergangsflächenverhältnis</i> : Verhältnis des Zuwachses der Übergangsfläche einer skalenbegrenzten Oberfläche innerhalb des Definitionsbereichs über dem Definitionsbereich
Spd	Feature-Parameter	<i>Spitzendichte</i> : Anzahl der Spitzen je Flächeneinheit
Spc	Feature-Parameter	<i>Arithmetischer Spitzenkrümmungsmittelwert</i> : Arithmetisches Mittel der Hauptkrümmungen der Spitzen in einem Definitionsbereich
Sz	Höhenparameter	<i>Maximale Höhe</i> : Höhe zwischen der höchsten Spitze und dem niedrigsten Tal
S10z	Feature-Parameter	<i>Zehn-Punkte-Höhe</i> : Summe aus dem Durchschnittswert der Höhen der fünf Spitzen mit der größten globalen Spitzenhöhe und dem Durchschnittswert der Höhen der fünf Senken mit der größten globalen Senkenhöhe innerhalb des Definitionsbereichs
Sp	Höhenparameter	<i>Maximale Spitzenhöhe</i> : Höhe zwischen der höchsten Spitze und der Mittelebene
S5p	Feature-Parameter	<i>Fünf-Punkte-Spitzenhöhe</i> : Durchschnittswert der Höhen der fünf Spitzen mit der größten globalen Spitzenhöhe im Definitionsbereich
Sv	Höhenparameter	<i>Maximale Senkenhöhe</i> : Tiefe zwischen der Mittelebene und dem niedrigsten Tal
S5v	Feature-Parameter	<i>Fünf-Punkte-Senkenhöhe</i> : Durchschnittswert der Tiefen der fünf Senken mit der größten globalen Senkenhöhe im Definitionsbereich

Die Vorgehensweise bei der Auswahl der für die Fragestellung relevanten 3D-Parameter soll hierbei anhand von Abbildung 3-6 verdeutlicht werden. In diesen Parameter-Werten zeigten sich bei der Charakterisierung durch die 3D-Konfokalmikroskopie die deutlichsten Unterschiede zwischen den einzelnen Oberflächen, daher wurden sie zur Charakterisierung für aussagekräftig befunden.

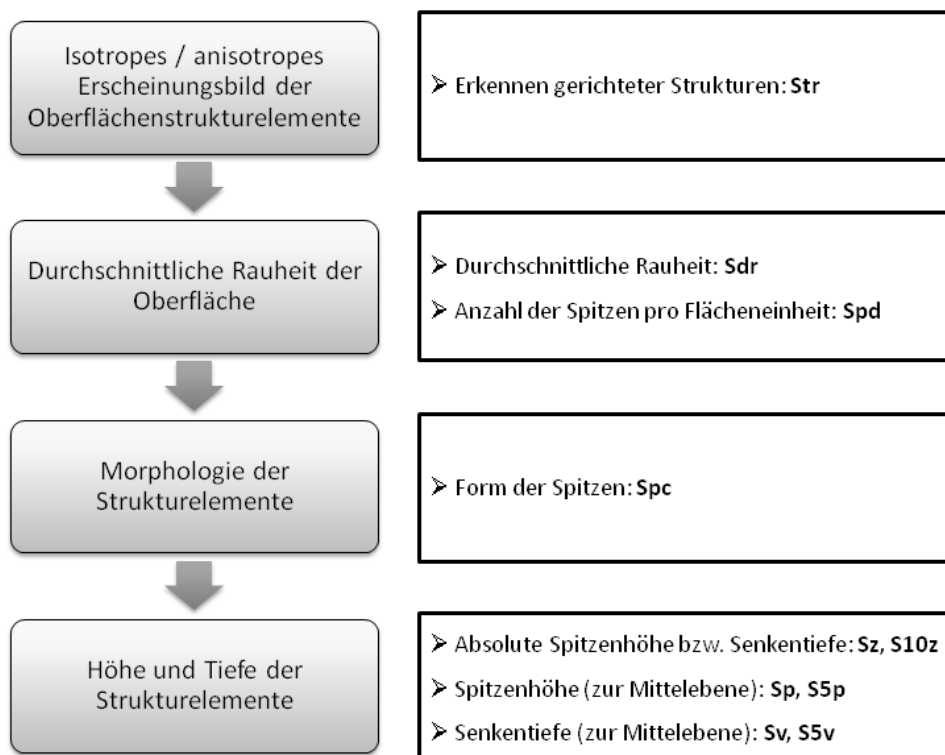


Abbildung 3-6: Vorgehensweise zur Auswahl geeigneter 3D-Parameter

Zur generellen Erkennung von isotropen bzw. anisotropen Strukturen sowie deren Einordnung eignet sich der Str-Raumparameter, welcher anhand von Abbildung 3-7 verdeutlicht wird. Isotrope Strukturen wie im Bild b) weisen in alle Richtungen die gleichen Oberflächeneigenschaften auf, während bei anisotropen Oberflächen beispielsweise in Querrichtung eine hohe Rauheit vorherrschen kann und in Längsrichtung die Rauheit weniger stark ausgeprägt ist, wie dies der Fall für eine Längsrillen aufweisende Oberfläche sein kann (siehe Bild a)).

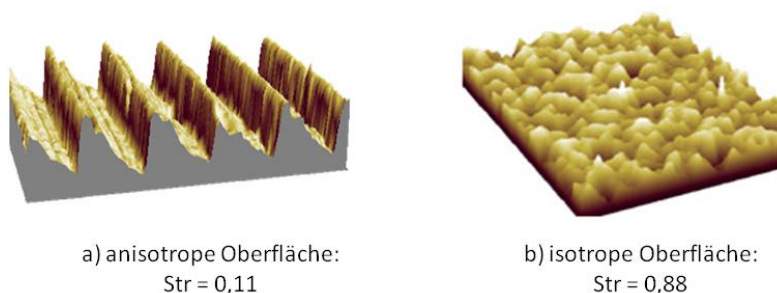


Abbildung 3-7: Verdeutlichung des Str-Parameters anhand unterschiedlich bearbeiteter Oberflächen: a) gerichtete Oberfläche mit Längsrillen sowie geringem Str-Wert; b) ungerichtete Oberfläche mit hohem Str-Wert (nach [32])

Isotrope Oberflächen entstehen beispielsweise durch Sandstrahlen, während hingegen anisotrope Oberflächen häufig durch mechanisch spanabhebende Verfahren erzeugt werden. Zur Beschreibung des Benetzungsverhaltens eines Tropfens, welcher als dreidimensionales Objekt mit der Oberfläche in Wechselwirkung tritt, sind zweidimensionale Kenngrößen nicht ausreichend.

Die Benetzung wird nach Cassie-Baxter (vgl. Kapitel 2.2.4) u. A. von der Oberflächenrauheit beeinflusst, sodass durch die Richtungsabhängigkeit der Oberflächencharakteristika das Benetzungsverhalten und damit die Mobilität in unterschiedlichen Richtungen variieren. Liegt der Str-Wert nahe bei 1, ist dies ein Hinweis auf eine isotrope Oberfläche. Je näher sich der Wert bei 0 befindet, desto anisotroper die Oberfläche.

Um einen allgemeinen Eindruck der durchschnittlichen Rauheit zu erhalten, dienen die Parameter  $S_{dr}$  sowie  $S_{pd}$ . In diesem Zusammenhang stellt  $S_{dr}$  das Verhältnis der wahren Oberflächengrenzfläche zur projizierten Messgrundfläche dar und ist aus diesem Grund ein Indikator für die gesamte Rauheit der Oberfläche. Beispielsweise ist im Fall von rauen Oberflächen die wahre Fläche erheblich größer als die Messfläche. Der  $S_{dr}$ -Parameter wird in Prozent angegeben. So bedeutet ein Wert nahe 0%, dass es sich um eine flache Oberfläche handelt.

Der  $S_{pd}$ -Parameter gibt die Anzahl der Spitzen je Flächeneinheit an. Dabei werden nur die signifikanten Spitzen berücksichtigt, die nach einer Unterscheidung durch Segmentierung, die sogenannte Wolf-Beschneidung, verbleiben. Dadurch wird die Zahl der Extrempunkte mit dem kleinsten Höhenunterschied zum nächsten Sattelpunkt reduziert. Der Algorithmus wiederholt sich so lange, bis sich eine minimal erforderliche Anzahl von Punkten oder ein minimal erforderlicher Abstand zwischen allen Punkten einstellt.

Zur Identifizierung der Morphologie der Strukturelemente kann der arithmetische Spitzenkrümmungsmittelwert  $S_{pc}$  Hinweise liefern. Er ermöglicht das Erkennen der durchschnittlichen Spitzenform: spitz oder rund nach Mittelwert der Krümmung der Oberfläche an diesen Punkten. Wie bereits bei  $S_{pd}$  gehen lediglich die ausgeprägten, nach einer Wolf-Beschneidung von 5% von  $S_z$  zurückbleibenden Spitzen in die Berechnung des Parameterwerts ein.

Informationen über die Höhe bzw. Tiefe von Strukturelementen wie Spitzen und Senken geben sowohl die Höhenparameter  $S_z$ ,  $S_p$  und  $S_v$  als auch die Feature-Parameter  $S_{10z}$ ,  $S_{5p}$  und  $S_{5v}$ . Hierbei repräsentiert  $S_z$  die maximale Höhe der Oberfläche, d.h. die Höhe zwischen der höchsten Spitze und der niedrigsten Senke.  $S_p$  gibt die Höhe zwischen der höchsten Spitze und der Mittelebene an, wohingegen  $S_v$  die Tiefe zwischen Mittelebene und der niedrigsten Senke angibt.  $S_{5p}$  und  $S_{5v}$  stellen den Durchschnittswert der Höhen bzw. Senken der fünf Spitzen bzw. Mulden mit der größten globalen Spitzenhöhe bzw. Muldenhöhe im Definitionsbereich dar. [33, 34]

### 3.3.1.2 Bildaufnahme mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Um weitere Informationen über die Oberflächentopografie sowie einen visuellen Eindruck der Oberfläche zu erhalten, wurden zusätzlich zur 3D-Konfokalmikroskopie Bildaufnahmen mithilfe eines Rasterelektronenmikroskop EVO 50 des Herstellers Zeiss durchgeführt. Die Bilder wurden mit einer im Mittel 1000-fachen Vergrößerung, die je nach Beschaffenheit der Oberfläche angepasst wurde sowie einer Beschleunigungsspannung von 50 keV mithilfe eines Everhart-Thornley-Detektors aufgenommen. Sie sollen zum erweiterten Verständnis und genaueren Bewertung der Oberflächenelemente beitragen.

## 3.3.2 Benetzungseigenschaften

### 3.3.2.1 Messung des statischen Kontaktwinkels

Der statische Kontaktwinkel von Wasser auf den verschiedenen Rohsubstraten wurde mithilfe eines Kontaktwinkelmessgeräts Contact Angle Measuring System G2 sowie der Auswertesoftware Drop Shape Analysis II des Herstellers Krüss bestimmt (siehe Abbildung 3-8). Dazu wurden Wassertropfen mit einem Tropfenvolumen von 3  $\mu\text{l}$  durch eine Mikroliterspritze auf die Rohsubstratoberflächen dosiert. Nach dem Absetzen der Tropfen wurden diese von einer Halogenlampe auf der rechten Geräteseite beleuchtet und so ein Schattenbild des liegenden Tropfens erzeugt, das mit einer Kamera auf der gegenüberliegenden Seite aufgezeichnet wurde. Die Auswertung der Tropfenkontur und somit des Kontaktwinkels erfolgte mit der gerätespezifischen Höhe-Breite-Methode. Um einen möglichst repräsentativen Mittelwert des statischen Kontaktwinkels der jeweiligen Rohsubstrate zu erhalten, wurde an 15 Stellen über die gesamte Ausdehnung der Planfläche als auch der runden Fläche ein Tropfen abgesetzt und der Kontaktwinkel bestimmt.



Abbildung 3-8: Kontaktwinkelmessung; links: XY-Tisch mit Dosiereinheit, rechts: Aufbringung eines Tropfens mit der Mikroliterspritze

### 3.3.2.2 Bestimmung der Kontaktwinkelhysterese

Wie bereits in Kapitel 2.2.5 beschrieben, ist die Kontaktwinkelhysterese als Differenz zwischen dem Fortschreite- und Rückzugswinkel definiert. Die Messung der Kontaktwinkelhysterese erfolgte mit einem Kontaktwinkelmessgerät DSA 10 der Firma Krüss. Im Gegensatz zur statischen Kontaktwinkelmessung wurde in diesem Fall ein Wassertropfen mit einem Startvolumen von 5  $\mu\text{l}$  auf die jeweilige Oberfläche platziert und anschließend schrittweise bis auf ein Endvolumen von 15  $\mu\text{l}$  vergrößert. Nach dem Erreichen des Endvolumens wurde der Tropfen erneut stufenweise auf das Ausgangsvolumen von 5  $\mu\text{l}$  verringert. Bei dieser oszillierenden Messung wurde alle 0,25 s der jeweilige Kontaktwinkel automatisch mithilfe der Software Drop Shape Analysis erfasst.

### 3.3.2.3 Abrollwinkelmessungen

Zur Bestimmung des Abrollwinkels wurde eine spezielle, in Abbildung 3-9 dargestellte Messeinrichtung zur Einspannung der Rohrsubstrate konstruiert, die auswechselbar auf den verstellbaren Probenstisch des Kontaktwinkelmessgeräts G2 aus dem vorherigen Abschnitt 3.3.2.1 befestigt wurde. Mithilfe eines Hebels konnte das in der Halterung fixierte Rohrsubstrat geneigt werden und über ein Goniometer der Abrollwinkel abgelesen werden. Der abzurollende Tropfen wurde über die Mikroliterspritze des Kontaktwinkelmessgeräts auf die Rohroberfläche aufgebracht. Da bei der Bestimmung des Abrollwinkels die Hysterese (vgl. Kapitel 2.2.5) überwunden werden muss, wird i.A. mit wesentlich größeren Tropfenvolumina als bei Messungen des statischen Kontaktwinkels gearbeitet. Daher wurde ein Tropfenvolumen von 40  $\mu\text{l}$  gewählt und 8 Messungen pro Rohrsubstrat durchgeführt. Die Neigung der Probenaufnahme erfolgte manuell, dabei betrug die Neigegeschwindigkeit ca. 1 Grad pro Sekunde.

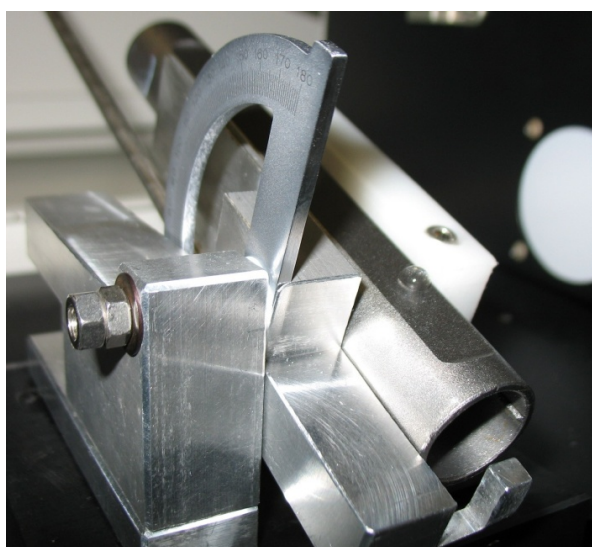


Abbildung 3-9: Abrollwinkelmessung

### 3.3.3 Bestimmung der Kondensationsleistung

Um einerseits die Kondensationsleistung zu messen und andererseits den Kondensationsprozess zu beobachten, wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, in dem beides möglich war. Die Messung der Kondensationsleistung basiert auf der Theorie des Wärmeübergangs. Das wärmeaufnehmende Kühlwasser erwärmt sich je nach Ausmaß der übertragenen Wärmemenge und so besteht ein Temperaturunterschied zwischen dem einströmenden Kühlwasser sowie dem wärmeaufnehmenden, ausströmenden Kühlwasser. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Kondensationsleistung ist die Messung der in einem bestimmten Zeitintervall anfallenden Menge an kondensiertem Wasser.

Bei der Konzeption des Versuchsaufbaues wurde möglichst standardisierte Laborglasware verwendet, um die Anfertigung teurer Sonderelemente zu vermeiden und die Möglichkeit zur Modifikation bzw. Erweiterung vorzuhalten.

#### 3.3.3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau zur Messung der Kondensationsleistung wird schematisch in Abbildung 3-10 dargestellt.

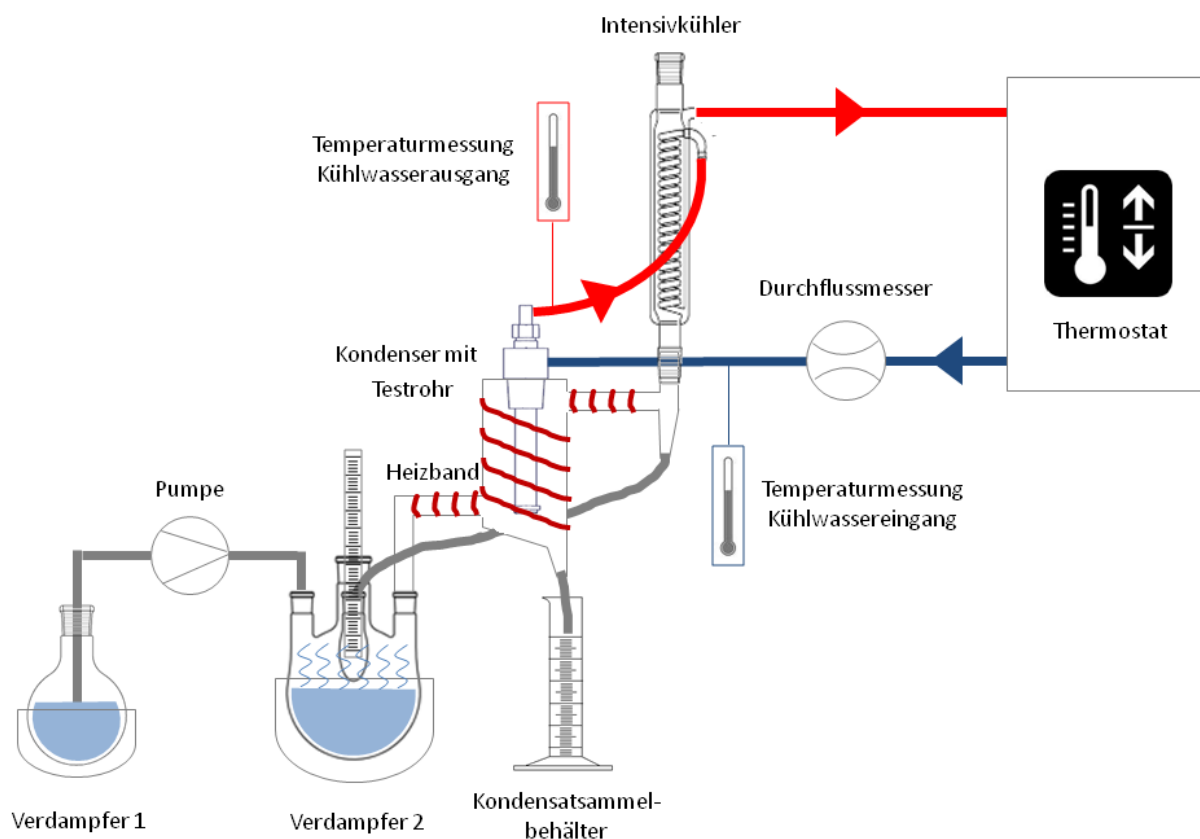


Abbildung 3-10: Versuchsaufbau

Zur Erzeugung des Wasserdampfes wurde vollentsalztes, destilliertes Wasser in einem handelsüblichen Vierhals-Rundkolben mithilfe einer Heizhaube (Verdampfer 1 in Abbildung 3-10) EM1000/CE von Electrothermal erhitzt und verdampft. Zur Sicherstellung einer ständig von Wasserdampf gesättigten Atmosphäre wurde das Wasser laufend am Sieden gehalten durch Einstellung der maximalen Heizleistung der Heizhaube. Die Temperatur des aufsteigenden Dampfes im Inneren des Kolbens wurde mit einem Laborthermometer überwacht, das sich zentral im Inneren des Kolbens ca. 5 cm oberhalb des siedenden Wassers befand. Ausgehend vom Kolben wurde der entstandene Dampf über ein gebogenes Glas-Übergangsstück in einen eigens angefertigten Glaskondensator mit Normschliff-Verbindung geleitet, in dem sich das vom Kühlwasser durchströmten Testrohr befand, woran der Dampf auskondensierte. Das während der Kondensation anfallende Kondensat wurde durch einen Silikonschlauch aus dem abgeschrägten Boden des Kondensators abgeführt und sammelte sich anschließend in einem Messzylinder. Zum Ausgleich des durch die stetige Verdampfung und Kondensation entstehenden Wasserverlusts wurde nach Bedarf mithilfe einer externen Niveaupumpe der ALLDOS Eichler GmbH heißes Wasser von einem zusätzlichen Verdampfer 2 (siehe Abbildung 3-10) dem Hauptverdampfer zugeführt.

Um Kondensation an der Innenwand des Glaskondensators während der eigentlichen Messung der Kondensationsleistung zu vermeiden, wurde ein Heizband KM-HAT-CN der Firma SAF Wärmetechnik um den Glaskondensator gewickelt, dessen Temperatur durch die zugehörige Reglereinheit ISO HEAT KM-EC 210 mithilfe eines Pt 100 Temperatursensors von SAF Wärmetechnik bei allen Versuchen auf 150 °C geregelt wurde. Ab jener Heizbandtemperatur trat an der Wand des leeren Glaskondensators ohne Proberohr keine Kondensation von Dampf mehr auf.

Nicht am Testrohr kondensierter Dampf wurde mithilfe eines ebenfalls am Kühlkreislauf integrierten doppelwandigen Intensivkühlers hinter der Kondensereinheit kondensiert, wobei das anfallende Kondensat durch einen Silikonschlauch wieder zum Kolben zurückgeführt wurde. Die Regelung der Temperatur des Kühlwassers erfolgte durch einen Badthermostat Modell ecoline RE 007 in Verbindung mit einer Reglereinheit des Typs E 300 des Herstellers Lauda. Die Durchflussrate des Kühlwassers wurde über einen sich vor dem Testrohr befindenden Durchflussmesser HOSCO PN6 der Firma Honsberg Instruments eingestellt und betrug bei allen Kondensationsversuchen 30 L/h. Der Temperaturunterschied zwischen Kühlwassereingangs- und Ausgangstemperatur wurde mit Thermometern des Typs ama-digit ad 15 th des Herstellers AMARELL Electronics mit konventionellen Edelstahl-Temperaturfühlern erfasst, die über PTFE-Verbindungsstücke thermisch isoliert ca. 20 mm in den Kühlwasserstrom ragten.

Um den Kondensationsprozess visuell beobachten zu können, wurden Videos mithilfe einer Highspeed-Kamera VW-600M mit einem Objektiv VH-Z20R 20-facher Vergrößerung der Firma Keyence und zugehörigem Analyserechner aufgenommen. Zu diesem Zweck befand sich die Kamera außerhalb des Glaskondensators auf einem Stativ.

### 3.3.3.2 Versuchsablauf

Bei allen Versuchen zur Bestimmung der Kondensationsleistung wurde sowohl die Kondensatmenge in einem Zeitintervall von 5 min als auch die Kühlwassereingangs- und Ausgangstemperaturen jeweils zu Beginn und Ende eines Messintervalls bestimmt. Dies erfolgte jeweils für variierte Unterkühlungen, die durch Regelung am Badthermostat eingestellt wurden. Dabei wurden die Unterkühlungstemperaturen, also die Temperaturdifferenzen zwischen gesättigtem Dampf und Kühlwasser sukzessiv vergrößert. Zu Beginn des Versuches wurde ein geringer Temperaturunterschied eingestellt, um anfänglich durch die geringe Unterkühlung wenige Keimstellen zu aktivieren. Im Gegensatz dazu würde bei einer allzu großen Temperaturdifferenz und somit einer Aktivierung von mehr Keimstellen, eine Flutung der Oberfläche infolge schnell wachsenden und sich zusammenschließenden Kondensattropfen eintreten (siehe Kapitel 2.1.1.2). So kann sich insbesondere auf rauen Oberflächen zwangsläufig nur Filmbildung einstellen, da in diesem Fall wie in Kapitel 2.1.1.2 durch die Erhebungen der Oberflächentopografie die Keimbildungsarbeit sowie der Dampfdruck niedriger ist.

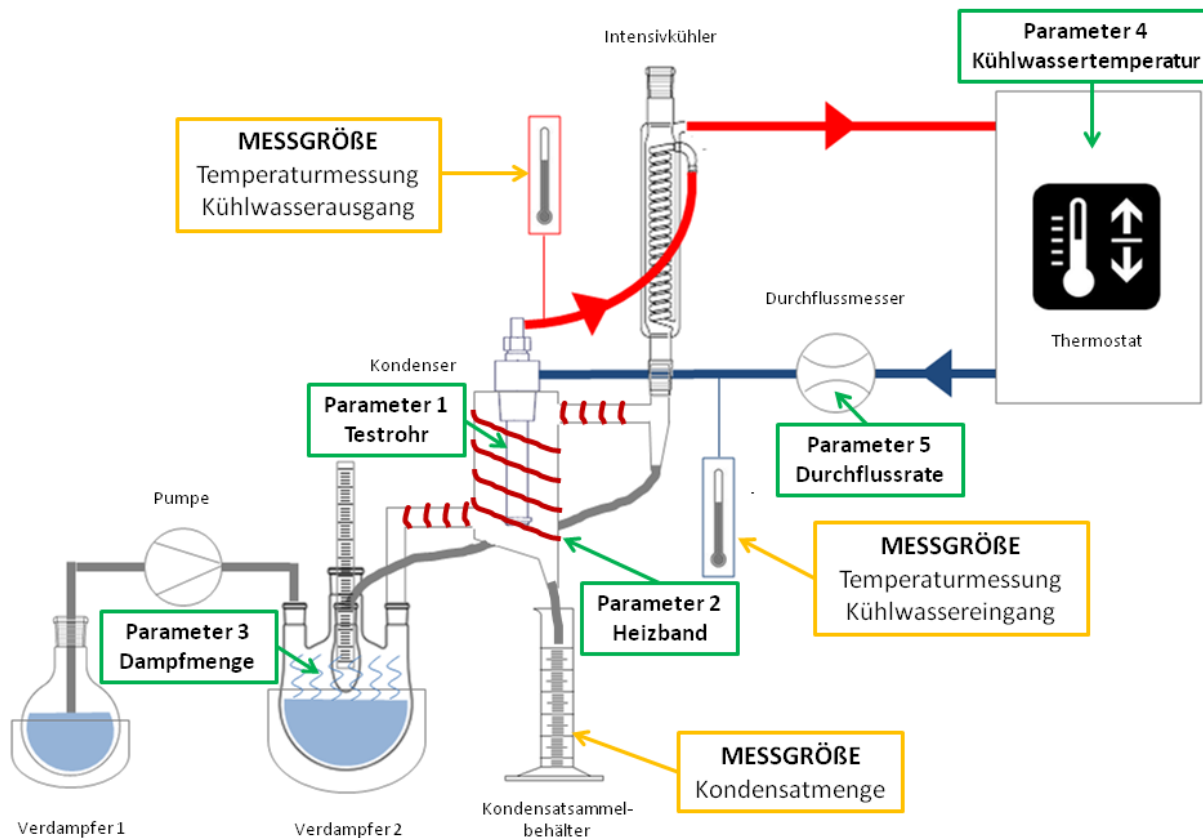
Ziel dieser Vorgehensweise war es, durch den anfänglichen geringeren Temperaturunterschied die Effekte der Keimstellen besser ausdifferenzieren zu können. Das erste Messintervall wurde mit einer am Badthermostat eingestellten Kühlwassertemperatur von 98°C gefahren. Anschließend folgte das zweite Messintervall bei 95°C, daraufhin wurde die Kondensationsleistung in Messintervallen von 5 K-Schritten bis zu einer Temperatur von 60°C für jeweils 5 min erfasst. Das jeweilige Testrohr befand sich dabei bis zum Beginn der Messreihe außerhalb des Glaskondensers in einer Halterung, sodass die Messreihe erst begonnen wurde, nachdem sich ein Gleichgewichtszustand zwischen siedendem Wasser und Dampf einstellte und somit das Testrohr in den Kondensator eingeführt werden konnte. Das zu verdampfende Wasser im Rundkolben wurde auf Siedetemperatur gebracht und die Kühlwassertemperatur am Badthermostat eingeregelt sowie der Durchfluss des Kühlwasserkreislaufs am Durchflussregler eingestellt. Damit einhergehend wurde das Heizband zur Beheizung der Kondensatorwand eingeschaltet und auf die entsprechende Temperatur aufgeheizt. Der Gleichgewichtszustand ließ sich über die Temperaturanzeige des sich im Inneren des Glaskolben befindlichen Laborthermometers überprüfen, wobei die Temperatur zwischen 93-97°C schwankte und vom Boden des Kolbens kontinuierlich Blasen aufstiegen. Kurz vor dem Beginn der Messreihe wurde die Videoaufnahme der Highspeed-Kamera gestartet und unmittelbar anschließend das Testrohr in den Kondensator eingebracht.

### 3.3.3.3 Einflussfaktoren sowie Grenzen der Messapparatur

Zweck der Apparatur ist es, die in einem bestimmten Zeitabschnitt anfallende Kondensatmenge bestimmter, oberflächenmodifizierter Testrohrsubstrate zu erfassen sowie die Temperaturdifferenz zwischen Kühlwasserein- und -ausgang aufzuzeichnen. Beide Messgrößen stehen in direkter Beziehung mit dem Wärmeübergang. Diese Messgrößen werden neben dem eigentlichen Kondensatorrohr (Parameter 1) bestehend aus einem Grundmaterial sowie einer



Oberflächenmodifikation, wiederum von verschiedenen Parametern wie Beheizung des Glaskondensers durch Heizband (Parameter 2), Dampfmenge (Parameter 3), Kühlwassertemperatur (Parameter 4) sowie –durchflussrate (Parameter 5) bestimmt, welche in Abbildung 3-11 visualisiert werden:



**Abbildung 3-11: Visualisierung der auf die Messgrößen Kondensatmenge und Eingangs- bzw. Ausgangstemperatur bezogenen Parameter (Eingangsgrößen)**

In diesem Zusammenhang treten unterschiedliche apparatbedingte, qualitative Einflüsse auf. Alle Versuche zur Ermittlung der Kondensationsleistung wurden vergleichend durchgeführt, wobei in jedem Fall die Einflüsse auf die jeweiligen Parameter gleichermaßen bestehen. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Messgrößen im Durchschnitt im gleichen Ausmaß von den Einflüssen der Parameter beeinflusst werden. Dennoch wird im Folgenden deren Auswirkung auf die Messgrößen näher erläutert, um die Limitierungen im Vergleich zu einer theoretisch idealen Messapparatur aufzuzeigen.

Einflussfaktoren auf die Messgrößen bzw. Parameter:

- Messgröße: Kondensatmenge
  - *Messintervall zur Erfassung der Kondensatmenge*: Als Messintervall wurde ein Zeitfenster von 5 min gewählt, sodass sich eine ausreichende, aussagekräftige Menge an kondensiertem Wasser im Messzylinder sammeln konnte.

- *Einfluss der am Silikonschlauch und Messzylinder haftenden Kondensatmenge:* Im Zuge der Messung der bei der Kondensation von Dampf an der Oberfläche des Testrohrs anfallenden Kondensatmenge traten bei allen Messungen sowohl am Silikonschlauch als auch an der Glaswand des Messzylinders anhaftende Kondensattropfen auf. Diese wurden beim Ablesen der Kondensatmenge nicht berücksichtigt, da dieser Einfluss bei der Erfassung der Kondensatmenge konstant war. Zudem wurde bei der ersten Messung der Kondensatmenge nach Konditionierung der Apparatur das Messintervall erst dann begonnen, als sich bereits eine gleichbleibende Belegung des Silikonschlauchs mit Kondensat eingestellt hatte.
  - *Ablesefehler:* Das Ablesen der Kondensatmenge am Messzylinder war mit einem Ablesefehler von ca.  $\pm 0,5$  ml behaftet.
- Messgröße: Temperaturmessung
    - *Einbauposition der Thermometer:* Der Edelstahlfühler des Thermometers zur Erfassung der Kühlwassereingangstemperatur befindet sich in jenem PTFE-Verbindungsstück, das den Silikonschlauch des Kühlwasserkreislaufes mit dem Kühlwasser zuführenden Innenrohr im eigentlichen Testrohr miteinander verbindet. Das einströmende Wasser wird zunächst durch das Innenrohr geführt, um dann am Rohrende außerhalb des Innenrohrs, jedoch innerhalb des Kondenserrohrs nach oben hin abzufließen und die durch den Kondensationsprozess an der Außenseite des Kondenserrohrs freiwerdende Wärme aufzunehmen. Der Edelstahlfühler des zweiten Thermometers zur Messung der Kühlwasserausgangstemperatur sitzt ebenfalls in einem PTFE-Verbindungsstück, welches die Verbindung mit dem abfließenden Kühlwasserkreislauf darstellt. Bedingt durch diese Art der Kühlwasserzu- und -abführung ist anzunehmen, dass sich zu- und abströmendes Kühlwasser gegenseitig beeinflussen. Das abströmende, Wärme aufnehmende Kühlwasser erwärmt gleichzeitig das zuströmende Kühlwasser bzw. kühlt das einströmende Kühlwasser das wärmere abströmende Kühlwasser. Daher kommt es zur Verfälschung der gemessenen Ein- und Ausgangstemperaturen. Aus diesem Grund ist bei einer zukünftigen Versuchsanordnung auf eine Entkopplung von Zu- und Abfluss zu achten.
    - *Messgenauigkeit der Thermometer:* Die Genauigkeit der verwendeten Thermometer mit Edelstahlfühler lag bei  $\pm 0,4$  K oder 0,4% des Messwerts bei einer Auflösung von 0,1 K. Da hinsichtlich des Wärmeübergangs bei den Versuchen zur Kondensation lediglich Temperaturdifferenzen zwischen Kühlwasserein- und -ausgang erfasst wurden und keine Absolutwerte, stellt die Messgenauigkeit der Thermometer eine untergeordnete Rolle dar.

- Parameter 1: Kondenserrohr
  - *Temperaturverlauf im Kondenserrohr:* Aufgrund der Durchströmung des Kondenserrohrs mit Kühlwasser wies dieses keine gleichmäßige Temperatur auf, sodass es zur Ausbildung eines Temperaturgradienten. Dadurch war die Temperaturverteilung auf im Proberohr nicht bekannt. Um den Einfluss der ungleichmäßigen Temperaturverteilung im Kondenserrohr entgegenzuwirken, müsste für zukünftige Versuche die Durchflussrate des Kühlwassers erhöht werden. In diesem Zusammenhang müsste jedoch ebenfalls die Genauigkeit der Temperaturmessung erhöht werden, um den Effekt der homogeneren Temperaturverteilung messen zu können.
  
- Parameter 2: Begleitheizung durch Heizband
  - *Einfluss der Beheizung der Glaskondenserwand durch das Heizband:* Wie bereits in Abschnitt 3.3.3.1 beschrieben, wurde ein Heizband zur Verhinderung von Kondensation an der Wand des Glaskondensers verwendet. Die experimentell ermittelten Daten für die Kondensatmenge (siehe Kapitel 4.3.1) gaben jedoch Anlass, den möglichen Einfluss der zusätzlichen Wärmeeinbringung in die nähere Umgebung des Kondenserrohrs aufgrund des Heizbandes auf den Kondensationsprozess zu untersuchen. Dazu wurde zunächst die Temperatur im Inneren des Kondensers ohne Testrohr bei einer Heizbandtemperatur von 150°C gemessen. Dabei betrug die Temperatur im Inneren ebenfalls 150°C sowie 130°C am oberen Ende des Kondensers. Diese hohen Dampftemperaturen können ein Hinweis auf eine mögliche Überhitzung des Dampfes sein.
  
- Parameter 3: Dampfmenge
  - *Begrenzte Dampfmenge:* Aufgrund der limitierten Heizleistung der verwendeten Heizhaube konnte selbst bei maximaler Heizleistung nur eine begrenzte Dampfmenge zur Verfügung gestellt werden.
  - *Variierende Dampfmenge:* beim Erhitzen des sich im Hauptkolben befindlichen Wassers stellte sich heraus, dass der Rundkolben nicht an allen Stellen gleichmäßig erwärmt wurde, sondern dass es durch den lokal unterschiedlichen Kontakt des Glaskolbens mit dem gewölbten Metallnetz im Inneren der Heizhaube sich Stellen höherer sowie niedrigerer Temperatur ausbildeten. Dies zeigte sich durch Bereiche am Glaskolben, die im Zuge der Erhitzung taktil spürbar wärmer als andere waren. Des Weiteren zeigte sich, dass der Siedevorgang des Wassers ungleichmäßig war, was sich durch unterschiedlich große, unregelmäßig aufsteigende Gasblasen äußerte, wodurch sich somit auch keine konstante Dampfmenge einstellen konnte. Daher sollte dies bei der Durchführung zukünftiger Versuche berücksichtigt werden und die

Apparatur dahingehend verändert werden. Dazu bietet sich beispielsweise ein Rotationsverdampfer an, wobei der Verdampferkolben homogen im Ölbad erhitzt wird und sich aufgrund der Rotation ein dünner Wasserfilm an der Kolbeninnenfläche ausbildet. So wird die Bildung von Blasen verhindert und ein gleichbleibender Dampfstrahl erzeugt.

- *Wasserverlust*: Wie bereits in Kapitel 3.3.3.1 unter Versuchsaufbau beschrieben, verringerte sich während der Versuche durch die kontinuierliche Verdampfung und Kondensation zwangsläufig die Wassermenge im Rundkolben (Verdampfer 1) mit fortschreitender Zeit. Zur Aufrechterhaltung einer Mindestwassermenge im Verdampferkolben musste dieser Wasserverlust durch Zudosieren mithilfe einer externen Niveaupumpe ausgeglichen werden. Um das Phasengleichgewicht von Sieden und Verdampfen des Wassers im Hauptverdampfer nicht zu stören und somit die Messergebnisse nicht zu beeinflussen, erfolgte die Zudosierung zwischen den Messintervallen mit siedender Flüssigkeit.
  - *Inertgasanteil*: bereits geringe Konzentrationen an Inertgasen können den Wärmeübergang maßgeblich infolge der Ausbildung einer Diffusionsschicht um die Kondenseroberfläche verringern (vgl. Kapitel 2.2.8). Der Einfluss dieser Gase auf den Kondensationsprozess lässt sich mit der verwendeten Apparatur nicht quantifizieren. Um diesem Einfluss entgegenzuwirken, wurde die Messapparatur vorkonditioniert: die Messung wurde erst nach 30 min gestartet, sodass der Dampf die Luft verdrängt den Probekörper schneller umströmen zu können und so die Bildung einer Diffusionsbarriere verhindert werden kann.
- Parameter 4: Eingestellte Kühlwassertemperatur (am Badthermostat)
    - *Schwankung der am Badthermostat eingestellten Kühlwassertemperatur*: die Schwankung betrug während der Messungen  $\pm 0,2$  K
    - *Temperaturverlust im Kühlwasserkreislauf über Silikon- und Gewebeschläuche*
  - Parameter 5: Durchflussrate
    - *Schwankung der Durchflussrate*: die Durchflussrate wurde anhand eines Schwebekörpers im Durchflussmesser visuell auf 30 L/h eingestellt. Bei allen Messungen traten Schwankungen der Durchflussrate um  $\pm 2$  L/h auf.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

Da das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer Herangehensweise zur Auswahl und anschließenden Charakterisierung und Bewertung von verschiedenen Strukturierungs- und Schichtsystemen zur Erhöhung der Kondensationsleistung war, werden im Folgenden exemplarisch anhand der ausgewählten Oberflächenmodifikationen die Ergebnisse der zuvor beschriebenen und durchgeführten Charakterisierungsmethoden vorgestellt und diskutiert.

### 4.1 Topografie

#### 4.1.1 Dreidimensionale Konfokalmikroskopie

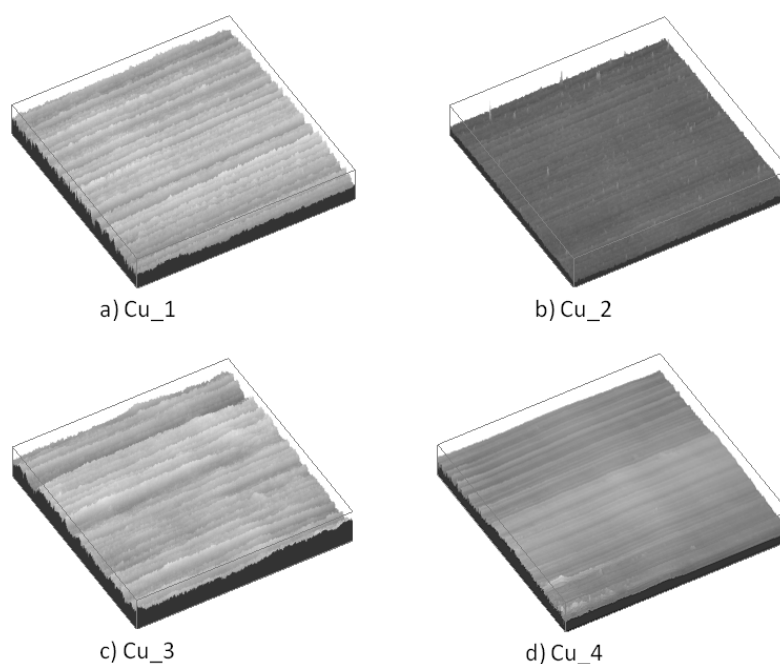
##### 4.1.1.1 Set A

Tabelle 4-1 führt die gemessenen Werte für die in Kapitel 3.3.1.1.1 besprochenen, ausgewählten 3D-Oberflächenparameter auf.

Tabelle 4-1: 3D-Oberflächenkenngrößen (Set A)

Probe	Str	Sdr [%]	Spd [ $1/\mu\text{m}^2$ ]	Spc [ $1/\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	S10z [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	S5p [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]	S5v [ $\mu\text{m}$ ]
Cu_1	0,0189	12,2	0,00321	0,622	13,8	8,04	6,04	3,47	7,75	4,58
Cu_2	0,0191	20,7	0,00195	1,07	29,4	18,2	22	12,8	7,33	5,4
Cu_3	0,0568	23	0,00604	0,962	17	9,67	7,15	4,79	9,82	4,88
Cu_4	0,359	1,57	0,000162	0,461	12,9	6,67	6,9	3,38	5,96	3,29

Abbildung 4-1 zeigt zusätzlich die dazugehörigen dreidimensionalen Projektionen der untersuchten Oberflächen.



**Abbildung 4-1: 3D-Projektionen (Set A)**

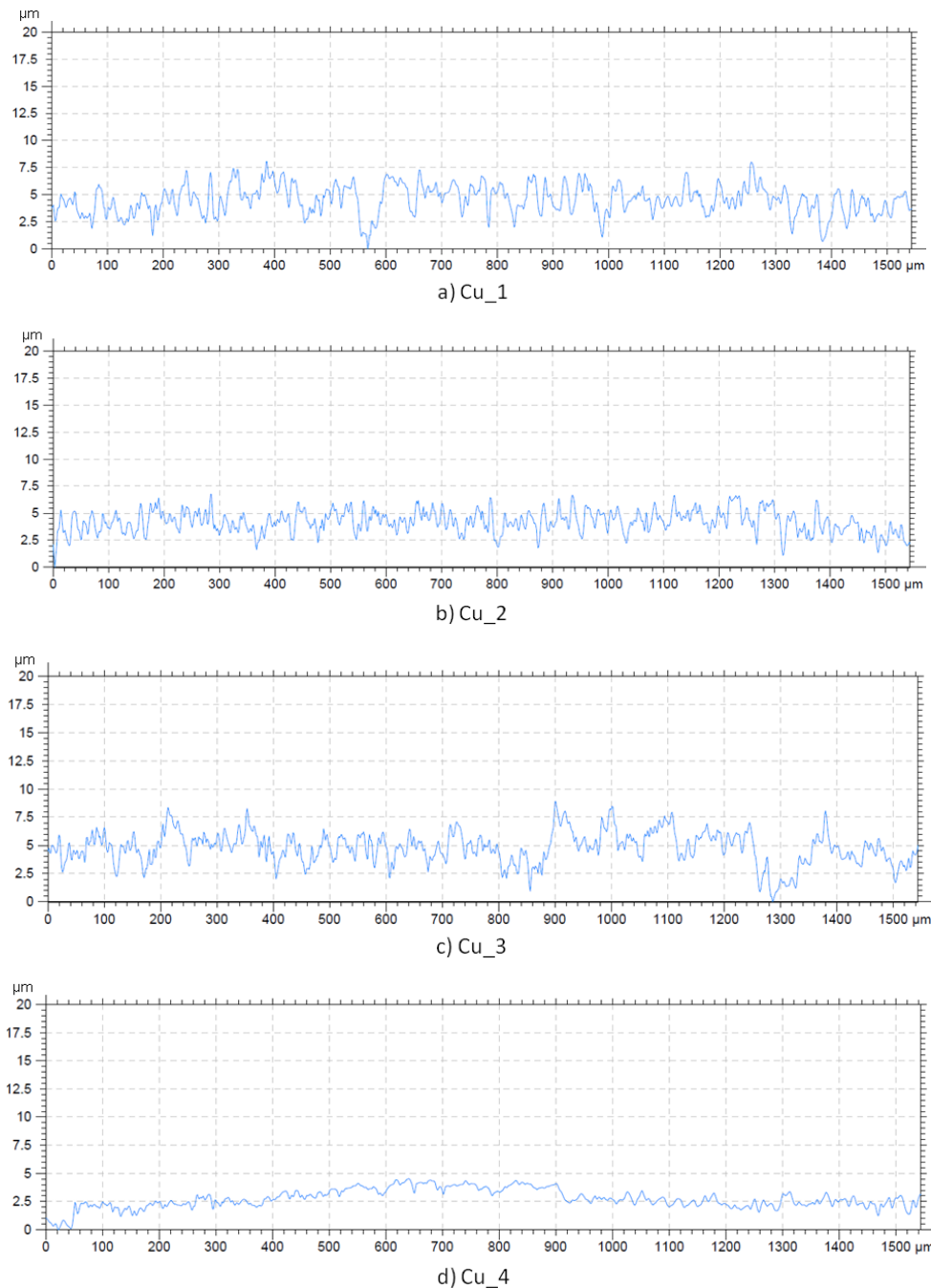
Sowohl aus dem Str-Wert, der Information über den Grad der Isotropie bzw. Anisotropie liefert als auch anhand der 3D-Projektionen ist ersichtlich, dass die Oberflächen der Probekörper Cu\_1 bis Cu\_3 wesentlich höhere Anisotropie aufweisen. Der Wert der Oberfläche von eingegebenen, vergoldeten Oberfläche von Cu\_4 hingegen beträgt 0,359, was auf einen höheren Grad an Isotropie hindeutet. Dies wird auch durch den visuellen Eindruck der Oberfläche bestätigt, die im Vergleich zu den anderen Oberflächen eine weniger ausgeprägte Vorzugsrichtung aufweist sowie insgesamt ausgeglichener erscheint.

Ein weiterer Indikator für die geringe allgemeine Rauheit dieser Oberfläche stellt der Sdr-Parameter, der als Maß der Gesamtrauheit gilt, dar. Er liegt für die besonders ausgeglichene, eingegebnete Oberfläche von Cu\_4 mit einem Wert von 1,57% deutlich unter den Werten der anderen Oberflächen. Die zuvor oxidierte und anschließend vergoldete Oberfläche von Cu\_3 zeigt in diesem Zusammenhang mit 23% den höchsten Wert, was sich auch anhand des Erscheinungsbildes in Abbildung 4-1, c) widerspiegelt.

Des Weiteren weisen die Höhenparameter  $S_z$ ,  $S_p$ ,  $S_v$  bzw. die Feature-Parameter  $S_{z10}$ ,  $S_{5p}$  sowie  $S_{5v}$  einen allgemeinen Trend hinsichtlich der Rauheit auf: nahezu alle dieser Werte sind für Cu\_4 am niedrigsten, während sie hingegen für Cu\_2 im Schnitt am höchsten sind.

Die Anzahl der Spitzen pro Fläche wird durch den Spd-Parameter ausgedrückt, welcher ebenfalls für Cu\_4 am niedrigsten ist, was wiederum auf die flache Oberfläche hindeutet. Im Fall der Oberfläche von Cu\_2 liegt dieser Wert mit  $0,00195 \text{ 1}/\mu\text{m}^2$  über dem Wert von Cu\_4 jedoch unter den Werten für

Cu\_1 und Cu\_3. Dies ist insofern unerwartet, da bei höheren Spitze-Senke-Abständen (die durch Sz, S10z, Sp, S5p sowie Sv, S5v ausgedrückt werden können) die Vermutung einer „dichteren“ Anordnung der Strukturelemente (Spitzen) naheliegt (vgl. Profilschnitt in Abbildung 4-2 b)).

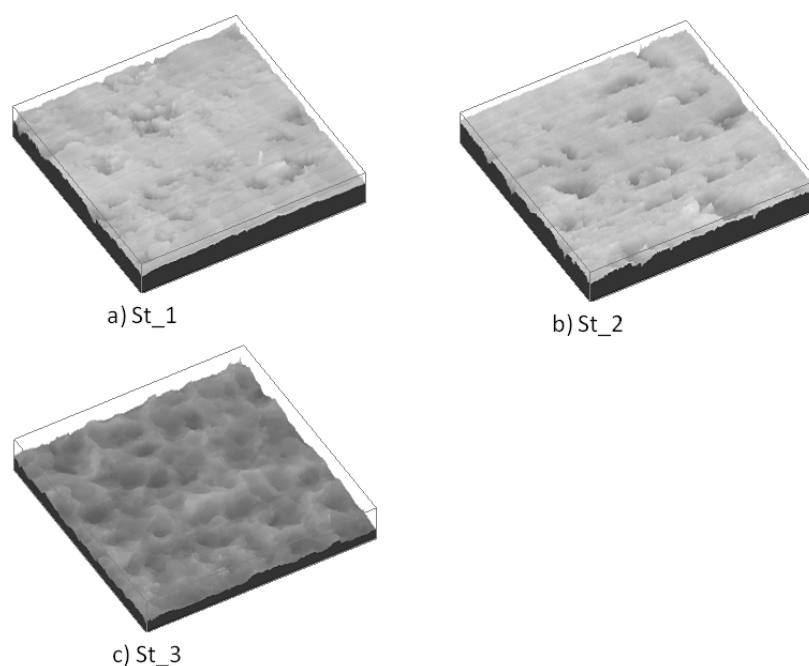


**Abbildung 4-2: Oberflächenprofile (Set A)**

Jedoch besteht im Fall von Cu\_2 der stärkste Unterschied in den Abständen zwischen Sz sowie S10z bzw. Sp und S5p usw. im Vergleich zu den anderen Oberflächen, was auf wenige herausragende Spitzen hinweist. Dies bestätigt sich auch in der Ansicht der 3D-Projektion in Abbildung 4-1 b), wo vereinzelte „Ausreißer“ zu sehen sind, die durch Sz repräsentiert werden. Da der Spd-Parameter nur







**Abbildung 4-3: 3D-Projektionen (Set B)**

Im Fall der verchromten Stahloberfläche war eine Charakterisierung der Topografie durch 3D-Konfokalmikroskopie aufgrund zu hoher Unterschiede im Kontrast zwischen Boden und Erhebungen nicht möglich.

Die gemessenen Werte für die ausgewählten Oberflächenkenngrößen vom blanken Stahlrohr St\_1 und dem silanisierten Stahlrohr St\_2 unterscheiden sich nur geringfügig. Dies beweist, dass die Silanschicht die Oberflächenstruktur vollständig nachzeichnet und keinen einebnenden Effekt hat, was ebenfalls aus den Profilstrecken für St\_1 (a) und St\_2 (b) in Abbildung 4-4 ersichtlich wird, die keinen signifikanten Unterschied zeigen. Anhand der 3D-Projektionen ist außerdem zu erkennen, dass die Oberflächen in unregelmäßigem Muster grobe Einkerbungen aufweisen. In den hoch vergrößerten REM-Aufnahmen der Oberflächen im folgenden Abschnitt 4.1.2.2 sind zudem „schuppenartige“ Bearbeitungsspuren des Fräsprozesses zu sehen.

Die allgemeinen Erscheinungsbilder der Oberflächen von St\_1 und St\_2 weisen sowohl in der 3D-Projektion als auch anhand des Str-Parameters eine weniger ausgeprägte Isotropie aus im Vergleich zum sandgestrahlten und silanisierten Rohr St\_3. Des Weiteren weist St\_3 eine höhere globale Rauheit auf, was sich durch den Sdr-Wert von 34% ausdrückt, was sich ebenfalls im visuellen Eindruck der 3D-Projektion und den Werten für die Höhenparameter Sz, Sp und Sv bzw. der Feature-Parameter S10z, S5p, S5v bestätigt. In der REM-Aufnahme in Abbildung 4-6 c) sind die stark vergrößerten Krater der sandgestrahlten Oberfläche deutlich zu erkennen.

Dass im Fall von St\_3 eine insgesamt gröbere Anordnung der Strukturelemente vorliegt, zeigt sich insbesondere im Wert für die Spitzendichte Spd, der für St\_3 am höchsten ist. Mit dieser Information

liefert der Spc-Parameter einen weiteren Indikator für die grobe Struktur, der mit  $2,04 \text{ 1}/\mu\text{m}$  für St\_3 auf grobe Spitzen hinweist.

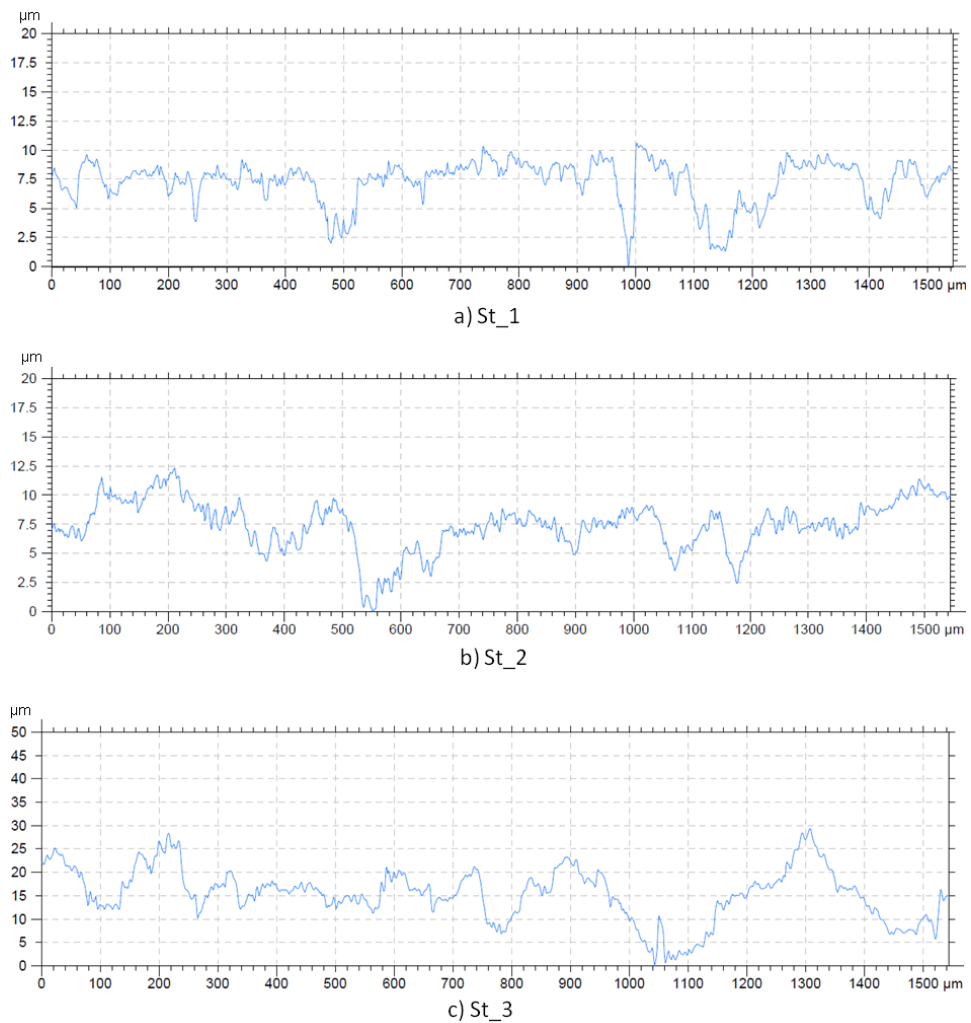


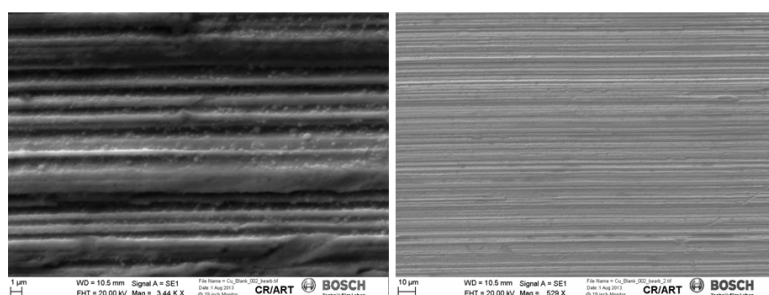
Abbildung 4-4: Oberflächenprofile (Set B)

### 4.1.2 REM-Aufnahmen

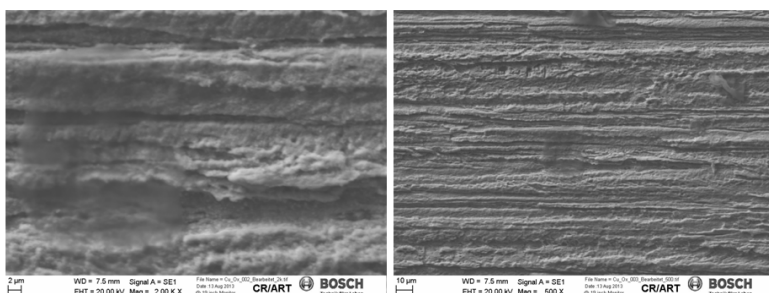
Die Abbildung 4-5 sowie Abbildung 4-6 stellen eine Übersicht aller REM-Aufnahmen für Set A bzw. Set B dar. Sie dienen zur detaillierteren Bewertung und dem erweiterten Verständnis der Oberflächencharakteristika.

#### 4.1.2.1 Set A

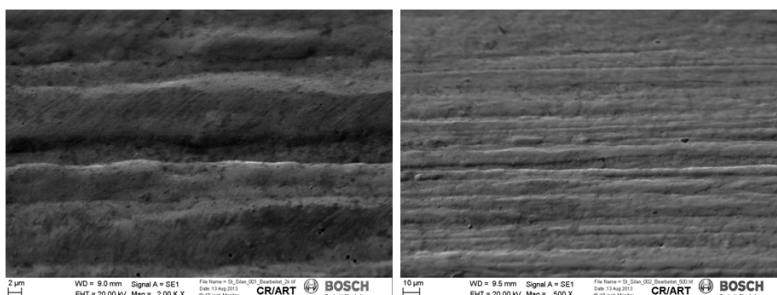
Abbildung 4-5 zeigt Aufnahmen der Oberflächen von Set A mithilfe des Rasterelektronenmikroskops.



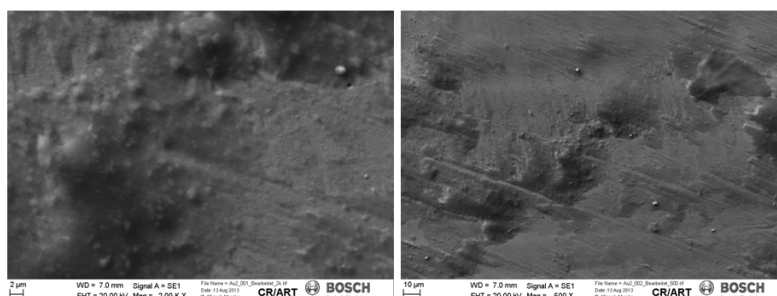
a) Cu\_1



b) Cu\_2



c) Cu\_3



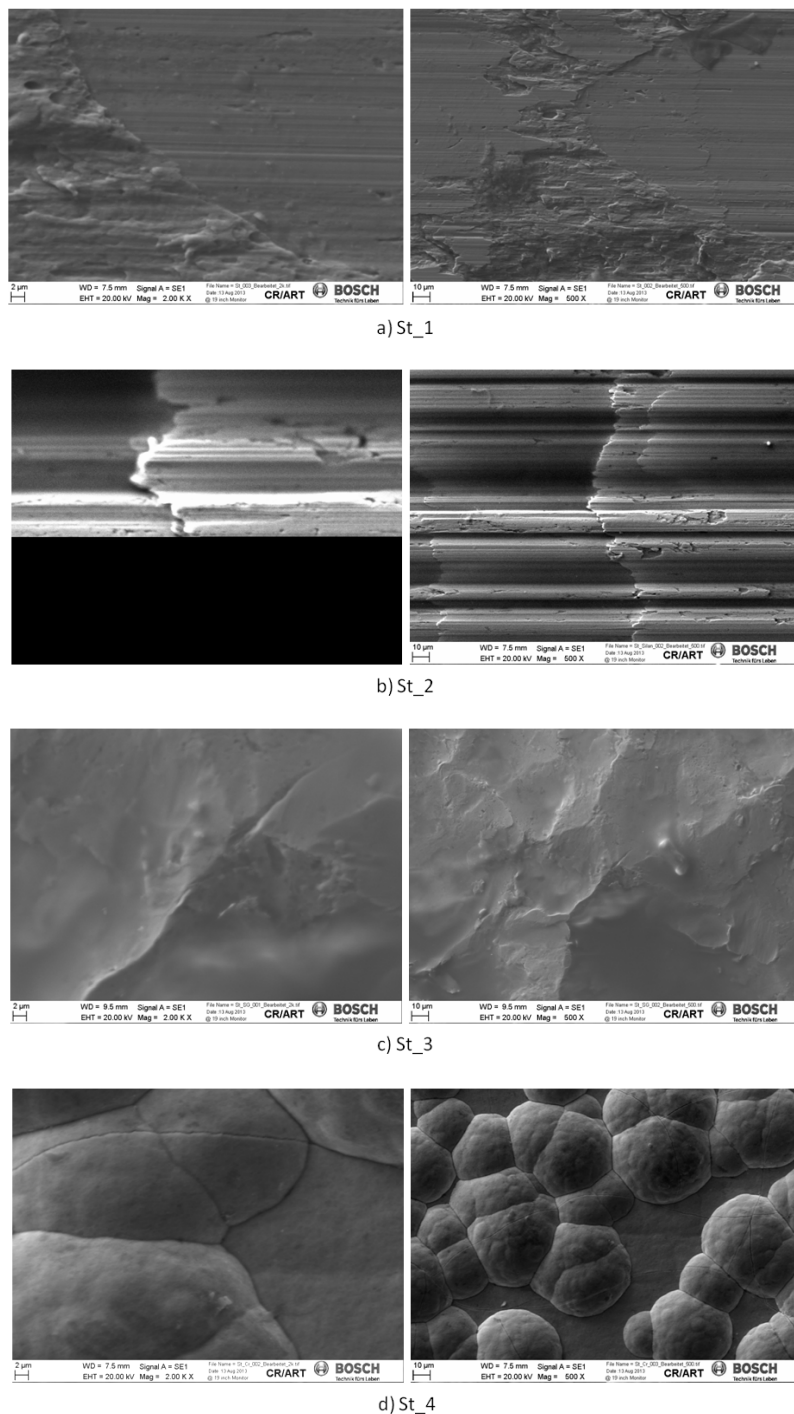
d) Cu\_4

Abbildung 4-5: REM-Aufnahmen (Set A); links: ca. 2000-fache Vergrößerung; rechts: ca. 500-fache Vergrößerung

Im Bild a) ist die blanke Kupferoberfläche zu sehen, welche wie in der 3D-Projektion in Abbildung 4-1 Längsrillen aufweist. Die Oberfläche oxidierte Kupferoberfläche des Probenrohrs Cu\_2 dagegen verfügt über eine wesentlich ausgeprägtere Topografie, wobei zwar ebenfalls eine Längsrillen-Struktur zu erkennen ist, jedoch diese in sich noch eine zusätzliche Rauheit aufweist, wie im linken Bild b) gut zu erkennen ist. Ein ähnliches Erscheinungsbild zeigt die zuvor oxidierte und anschließend vergoldete Oberfläche von Cu\_3, allerdings ist im Vergleich zu Cu\_2 die zusätzliche Rauheit in den Längsrillen geringer. Im Hinblick auf die Höhenparameter jedoch weisen Cu\_3 und Cu\_1 ähnliche Parameterwerte auf (vgl. Tabelle 4-1 aus Abschnitt 4.1.1.1). Bei der eingeebneten und anschließend vergoldeten Oberfläche des Probenrohrs von Cu\_4 sind die durch einebnende Wirkung der Nickelunterschicht die Erhebungen insgesamt ausgeglichener. Im Bild d) der Abbildung 4-5 sind einzelne Unebenheiten der Oberfläche zu erkennen, die insbesondere für die Tropfenbildung während der Kondensation als Keimstellen dienen können. [35]

## 4.1.2.2 Set B

Abbildung 4-6 gibt einen Überblick der REM-Aufnahmen der Oberflächen von Set B.



**Abbildung 4-6: REM-Aufnahmen (Set B); ca. 2000-fache Vergrößerung; rechts: ca. 500-fache Vergrößerung**

Hierbei weisen sowohl die blanke Stahloberfläche des Probenrohrs St\_1 (Bild a)) als auch die silanierte Oberfläche (Bild b)) ein ähnliches Erscheinungsbild auf, was auch durch die Ähnlichkeit der Parameterwerte (siehe Tabelle 4-2 in Abschnitt 4.1.1.2) bestätigt wird. So kann bestätigt werden, dass die Silanschicht als Topcoat keine einebnende Wirkung hat, sondern vielmehr die

Oberflächentopografie nachzeichnet. In beiden Fällen ist die von der mechanischen Bearbeitung herrührende Frässtruktur in Querrichtung auch noch deutlich zu erkennen.

Im Gegensatz zu den vergleichsweise planen Oberflächen der Probenrohre St\_1 und St\_2 verfügt die sandgestrahlte und zusätzlich silanisierte Stahloberfläche St\_3 über eine wesentlich höhere Rauheit, wobei die Topografie der Oberfläche „Gebirgskämmen“ ähnelt, zwischen denen sich ausgedehnte Vertiefungen befinden, was sich auch anhand der Höhenparameter und Feature-Parameter (S10z, S5p, S5v) in Tabelle 4-2 ausdrückt. In diesen Mulden kann sich leicht Wasser, das von den anwachsenden Tropfen stammt, ansammeln und so die Vertiefungen fluten.

Obschon keine Oberflächenkenngrößen mithilfe des 3D-Mikroskops für die verchromte Oberfläche der Probe St\_4 ermittelt werden konnten, wurden Bilder dieser Oberfläche mit dem Rasterelektronenmikroskop aufgezeichnet (siehe Abbildung 4-6 d)). Aus den Aufnahmen geht hervor, dass sich auf der Oberfläche sphärische, halbkugelförmige Strukturelemente befinden, die in sich selbst noch eine blumenkohlartige Struktur aufweisen. Dabei bleibt die Grundfläche weiterhin zwischen den Halbkugeln sichtbar, jedoch wurde mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie bestätigt, dass die Grundfläche ebenfalls mit Chrom beschichtet ist. Des Weiteren sind in der REM-Bildaufnahme feine Risse zu beobachten, die sowohl die mit Chrom bedeckte Grundfläche als auch die sphärischen Halbkugeln durchziehen.

## 4.2 Benetzungseigenschaften

### 4.2.1 Set A

In Tabelle 4-3 sind die Ergebnisse der Charakterisierung des Benetzungsverhaltens für Set A zusammengefasst.

Tabelle 4-3: Benetzungseigenschaften (Set A)

Probe	Statischer Kontaktwinkel [°]	Hysterese [°]	Abrollwinkel [°]
Cu_1	95	23	89 (12)
Cu_2	105	21	74 (7)
Cu_3	74	19	80 (3)
Cu_4	73	17	43 (0)

Es zeigt sich, dass die oxidierte Kupferoberfläche des Proberohrs Cu\_2 den höchsten statischen Kontaktwinkel mit 105° aufweist, jedoch gleichzeitig über einen vergleichsweise hohen Wert für die Kontaktwinkelhysterese und demnach ebenfalls über einen hohen Abrollwinkel verfügt. Dies ist insofern konsistent, da eine hohe, durch Pinning der Kontaktlinie verursachte Hysterese mit einem hohen Abrollwinkel einhergeht (vgl. Kapitel 2.2.5). Im Fall für Cu\_2 beträgt der Abrollwinkel 74°, wobei die Zahl hinter diesem Wert in Klammern (7) die Anzahl der nicht abgerollten Tropfen angibt. Von insgesamt 16 Versuchen lief somit der Tropfen 7-mal selbst bei einer maximalen Drehung des Testrohrs auf 90° nicht ab. Wie aus Abbildung 4-7 b) hervorgeht, vergrößert sich zwar die Kontaktfläche und der Tropfen zeigt eine unregelmäßige Kontaktlinie, allerdings kommt es nicht zum Abrollen.

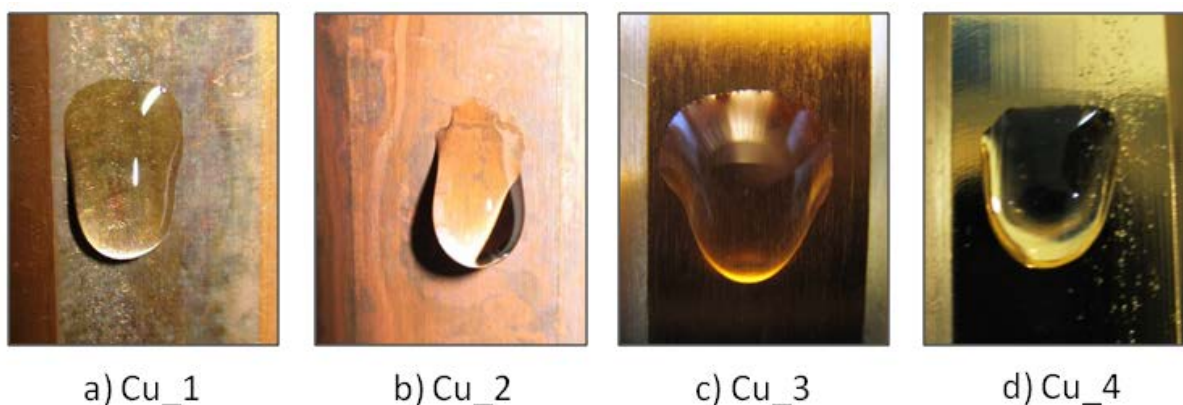


Abbildung 4-7: Abrollende Tropfen (Set A)

Da die Kontaktwinkelhysterese unter anderem aufgrund von Defekten der Festkörperoberfläche auftritt (siehe Kapitel 2.2.5), könnte durchaus eine hohe Hysterese auf rauen Oberflächen angenommen werden. Jedoch wird in der Literatur oft beobachtet, dass durch hohe Kontaktwinkel eine niedrige Hysterese resultiert. Dies lässt sich verstehen, wenn man für diesen Fall den Cassie-Zustand annimmt, wo sich Luftpolster zwischen den Erhebungen der Oberfläche befinden, was zu einer deutlichen Reduzierung der Kontaktwinkelhysterese führt. Die Ursache für das Benetzungsverhalten von Cu\_2 liegt im Wenzel-Benetzungszustand, wobei durchaus hohe makroskopische Kontaktwinkel erreicht werden, der Wassertropfen jedoch in diesem Zustand vollständig in die zahlreichen Senken zwischen den Spitzen der CuO-Oberfläche eindringt und durch die hohe Anzahl an Pinning-Defekten immobil und sehr viel adhäsiver zur Oberfläche wird. [24] Dieser Effekt wird durch die vergleichsweise hohen Werte der Höhenparameter verstärkt, wodurch sich die gesamte Kontaktfläche vergrößert und so ein einmal eingedrungener Tropfen noch stärker festgehalten wird.

Die blanke Kupferoberfläche des Probenrohrs Cu\_1 weist ebenfalls noch einen hohen statischen Kontaktwinkel von  $95^\circ$  sowie den höchsten Wert für die Kontaktwinkelhysterese auf. Dies spiegelt sich im Abrollwinkel wieder, der  $89^\circ$  beträgt und in 12 Fällen kein Tropfen abgelaufen ist. Ebenso wie im Fall von Cu\_2 verbreitert sich bei der Auslenkung des Rohrs die benetzte Fläche, jedoch war keine Bewegung der Kontaktlinie auszumachen. Während der Messungen des statischen Kontaktwinkels zeigte sich, dass der Tropfen mit fortschreitender Zeit sehr schnell auf der Kupferoberfläche spreitete und somit sich der anfänglich noch hohe Kontaktwinkel deutlich reduzierte. Dieses Verhalten ist insofern nicht verwunderlich, da metallische Oberflächen i.A. bedingt durch ihre Hydroxyterminierten Oberflächen der natürlichen Oxidschichten viele Wasserstoffbrückenbindungen zum Wassertropfen ausbilden können und so das Wasser gut benetzen kann.

Im Gegensatz dazu wurde bei den Goldoberflächen sowohl ein geringerer Abrollwinkel als auch eine geringere Kontaktwinkelhysterese beobachtet. Die statischen Kontaktwinkel der Goldoberflächen weisen nahezu dieselben Werte von  $74^\circ$  bzw.  $73^\circ$  auf. Auffällig ist in diesem Zusammenhang die vergleichsweise geringe Hysterese beider Goldoberflächen, da aufgrund der niedrigen statischen Kontaktwinkel gemeinhin eine größere Hysterese erwartet wurde.

Der Abrollwinkel der rauen, matten Goldoberfläche Cu\_3 liegt zwar mit  $80^\circ$  noch wesentlich höher als der Wert für die hocheingebnete Goldoberfläche Cu\_4, allerdings kam es lediglich in 3 Fällen des Versuchs zum Nichtabrollen der Tropfen. Bedingt durch die ausgeprägten Rillen in Längsrichtung bei der rauen Goldoberfläche von Probe Cu\_3 sowie die insgesamt höhere Rauheit, welche sich im ebenfalls hohen Sdr-Parameter äußert, entsteht so in Längsrichtung eine größere Benetzungsfläche als in Querrichtung, was den hohen Abrollwinkel erklärt.

Bei Cu\_4 rollten alle Versuchstropfen bei einer durchschnittlichen Neigung von  $43^\circ$  ab. Die besonders glatte Oberfläche dieser Probe, welche sich in den niedrigen Höhenparametern äußert, sorgt dafür, dass vergleichsweise wenig Kontaktfläche in Längsrichtung für den Tropfen zur Verfügung steht und so das Abrollen begünstigt.



Über das Benetzungsverhalten von Goldoberflächen herrscht in der Literatur Uneinigkeit darüber, ob Gold hydrophiler oder hydrophober Natur ist. Werte für den Kontaktwinkel schwanken dabei von  $0^\circ$  bis  $80^\circ$  je nach Reinheit der Oberfläche, wobei in diesem Zusammenhang von Reinheit im atomistischen Maßstab gesprochen wird. Teilweise wird vermutet, dass aufgrund von organischer Kontamination die Goldoberflächen hydrophobes Verhalten zeigen, jedoch mit höherem Reinheitsgrad zunehmend hydrophil werden. Dem gegenüber steht die Annahme, dass hydrophiles Verhalten durch hydrophile Kontamination wie z.B. Oxide verursacht wird. [36] Die gemessenen Werte von Cu\_3 und Cu\_4 lassen sich in diesem Zusammenhang eher in das hydrophobe Regime einordnen, wobei sie im Vergleich zu den Oberflächen von Cu\_1 und Cu\_2 hydrophiler sind. Des Weiteren kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht von Reinheit der Goldoberflächen auf atomistischem Niveau ausgegangen werden, daher liegt die Vermutung nahe, dass mit fortschreitender Zeit zwangsläufig organische Ablagerungen auf den Goldoberflächen adsorbieren. Smith wies mit Auger-Elektronenspektroskopie nach, dass eine zunächst atomistisch saubere Goldoberfläche bereits nach wenigen Minuten mit Sauerstoff und Kohlenstoff kontaminiert wurde. [36]

#### 4.2.2 Set B

Tabelle 4-4 zeigt die Übersicht der ermittelten Werte von statischem Kontaktwinkel, Hysterese sowie Abrollwinkel (vgl. Abbildung 4-8).

**Tabelle 4-4: Benetzungseigenschaften (Set B)**

Probe	Statischer Kontaktwinkel [°]	Hysterese [°]	Abrollwinkel [°]
St_1	80	20	82 (1)
St_2	102	17	18 (0)
St_3	108	16	23 (0)
St_4	82	19	60 (1)

Dabei weisen die hydrophilen metallischen Oberflächen von Probe St\_1 (blanker Stahl) und die verchromte Probe St\_4 erwartungsgemäß die niedrigsten statischen Kontaktwinkel mit  $80^\circ$  bzw.  $82^\circ$  auf. Demgegenüber stehen die silanisierten, hydrophobisierten Stahloberflächen der Proben St\_2 sowie St\_3 mit deutlich höheren Kontaktwinkeln. Die sandgestrahlte, silanierte Oberfläche des Rohrs St\_3 liegt mit  $108^\circ$  noch aufgrund der erhöhten Rauheit geringfügig über der im glatten Anlieferungszustand silanisierten Oberfläche des Rohrs St\_2 mit einem Kontaktwinkel von  $102^\circ$ .

Im Gegensatz zu Set A zeigen hierbei die metallischen Oberflächen mit niedrigem Kontaktwinkel eine entsprechend höhere Kontaktwinkelhysterese von  $20^\circ$  für St\_1 und  $19^\circ$  für St\_4 und damit auch einen höheren Abrollwinkel. Der Abrollwinkel der verchromten Oberfläche liegt aufgrund ihrer erhöhten Rauheit mit  $60^\circ$  unter dem der blanken Stahloberfläche, was sich ebenfalls in der geringfügig niedrigeren Hysterese äußert. Die höhere Rauheit wird dabei durch die intrinsische Topografie aus halbkugelförmigen Strukturelementen auf der Chromoberfläche (siehe Abbildung 4-6, Abschnitt 4.1.2.2) verursacht. Die Dreiphasenkontaktlinie auf dieser strukturierten Oberfläche (siehe Abbildung 4-8 d)) weist einen regelmäßigeren Verlauf auf im Vergleich zur Kontaktlinie auf der Stahloberfläche (vgl. Abbildung 4-8 a)).

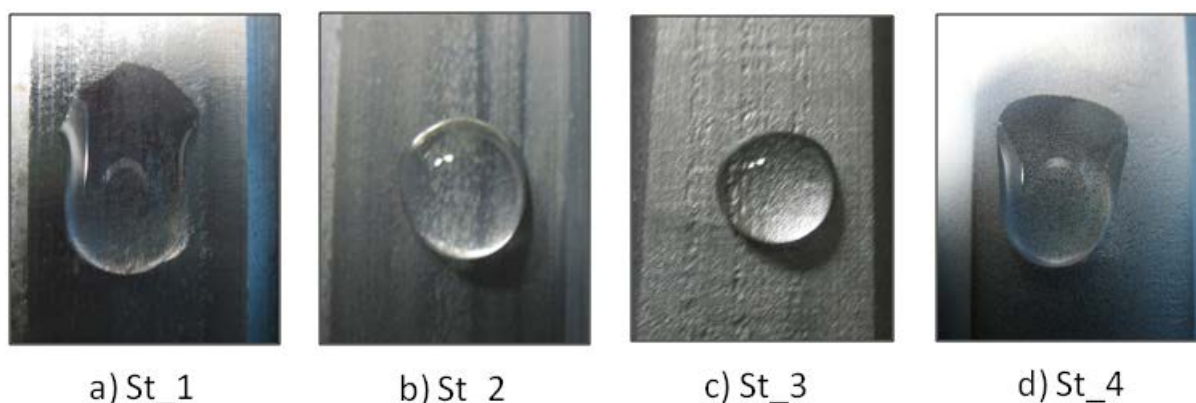


Abbildung 4-8: Abrollende Tropfen (Set B)

Die deutlich zackiger verlaufende Kontaktlinie im Fall von St\_1 ist ein Indikator für die vielen Inhomogenitäten infolge der mechanischen Bearbeitung der Planfläche der Stahlrohre, die lokal auf die Tropfenbewegung als Pinning-Zentren wirken, was sich auch im höheren Wert der Hysterese widerspiegelt. In einem Versuch rollten sowohl bei Probe St\_1 als auch bei St\_4 die aufgesetzten Tropfen selbst bei einer maximalen Auslenkung von  $90^\circ$  nicht ab.

Bei den silanisierten Proben hingegen traten keine Fälle auf, in denen der aufgesetzte Tropfen nicht abrollte. Nach Wenzel bzw. Cassie-Baxter (vgl. Kapitel 2.2.4) wird durch eine raue Oberfläche die Benetzung und somit der Kontaktwinkel erhöht, was zu einer höheren Tropfenmobilität führt. Dies zeigt sich beim Vergleich von Oberfläche St\_2 und St\_3 nicht, wobei der Abrollwinkel der raueren, sandgestrahlten Silan-Oberfläche von St\_3 mit  $23^\circ$  nur unwesentlich höher liegt als der Wert von  $18^\circ$  für die glatte, silanisierte Oberfläche. Wie aus Abbildung 4-8 b) und c) ersichtlich ist, behalten in beiden Fällen die Tropfen bei der Abrollbewegung ihre sphärische Form bei und weisen somit eine kleine Kontaktfläche auf, die sich vorteilhaft für die Tropfenbewegung auswirkt.

## 4.3 Wärmeübergang – Kondensationsleistung

### 4.3.1 Ermittlung der Kondensationsleistung

#### 4.3.1.1 Set A

Abbildung 4-9 zeigt für Set A mit Kupfer als Rohrgrundmaterial die Kondensatmenge in Abhängigkeit von verschiedenen, am Badthermostat eingestellten Kühlwassertemperaturen bzw. Unterkühlungen der Kondenserrohre im Vergleich zur Dampftemperatur.

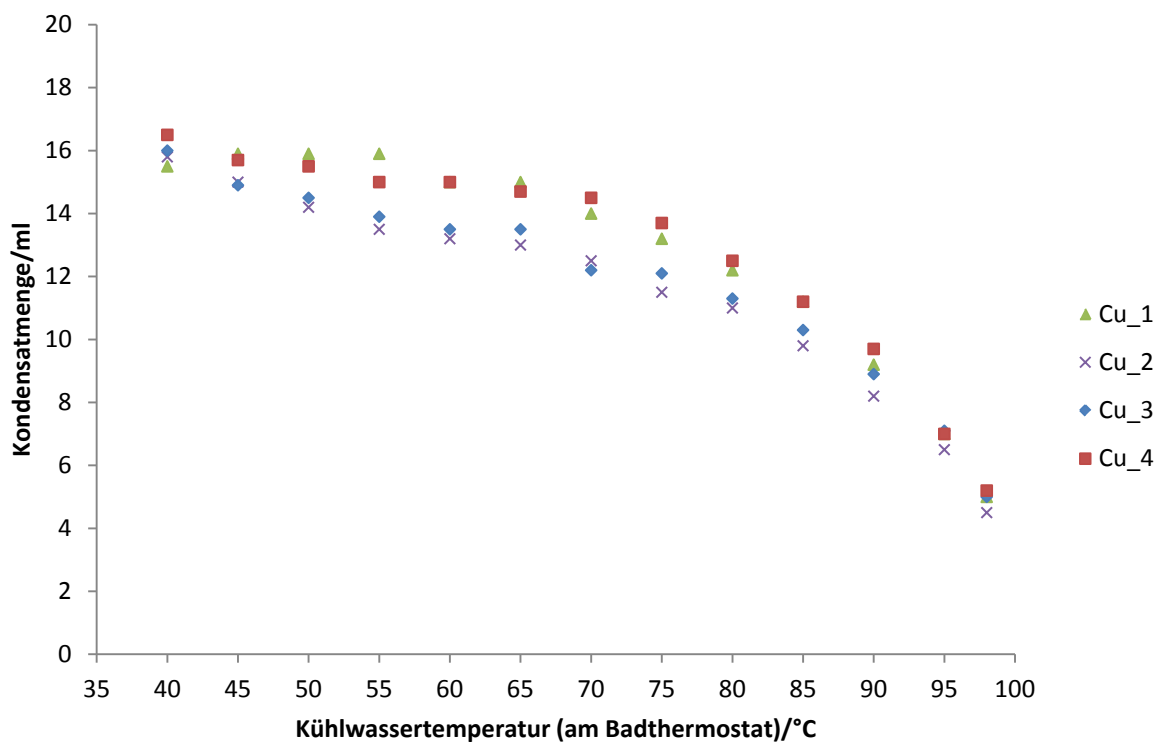
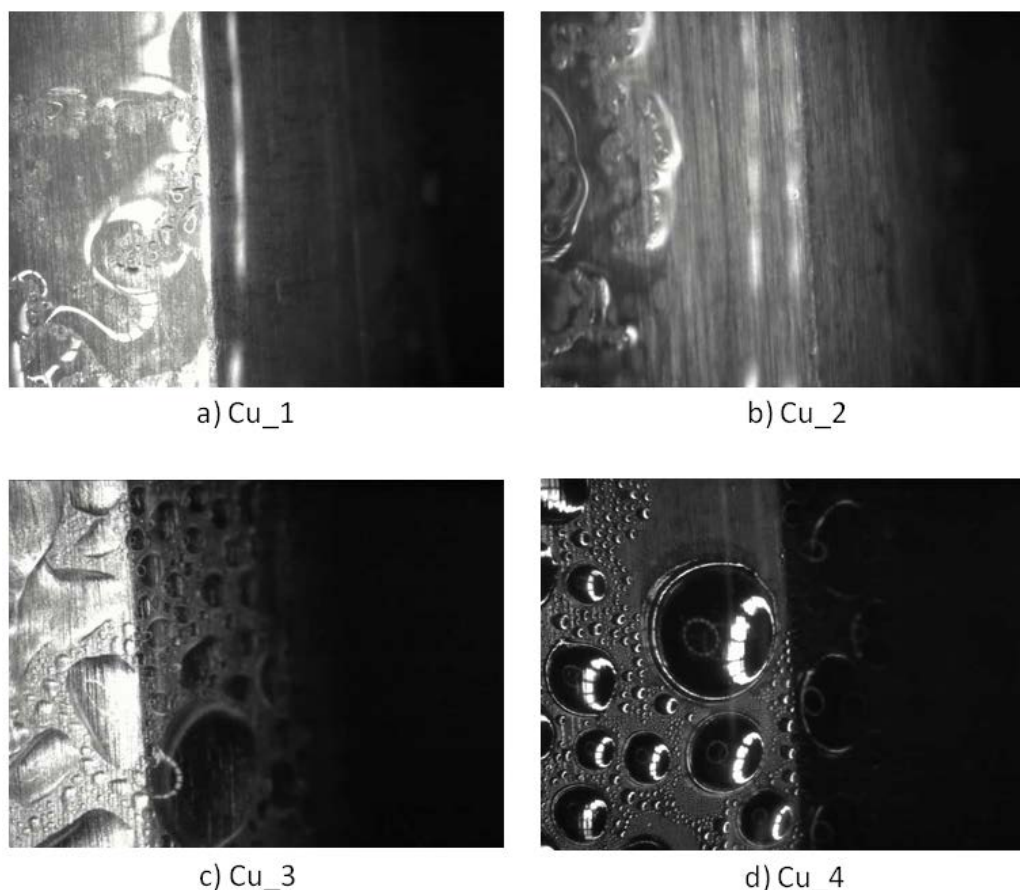


Abbildung 4-9: Kondensationsleistung Set A: Kondensatmenge über die am Badthermostat eingestellte Kühlwassertemperatur

Daraus wird ersichtlich, dass die Werte der Kondensatmenge für die unterschiedlichen Oberflächen lediglich geringe Varianzen aufweisen. Die Kondensatmenge nimmt kontinuierlich für alle Oberflächen mit ansteigender Unterkühlung zu, bis sie ab einer eingestellten Kühlwassertemperatur von 65°C nur noch vergleichsweise gering steigt und der Kurvenverlauf flacher wird. Aus dem Kurvenverlauf in Abbildung 4-9 ist ersichtlich, dass die Kondensatmenge des ersten Messintervalls bei 98°C eingestellter Kühlwassertemperatur bei fast allen Oberflächen den gleichen Wert annimmt.

Dabei zeigt sich, dass die jeweiligen Kondensatmengen der blanken Kupferoberfläche des Proberohrs Cu\_1 nahezu identisch mit den Werten der hocheingebneten vergoldeten Oberfläche des Proberohrs Cu\_4 sind. Dies ist insofern bemerkenswert, da wie aus Abbildung 4-10 ersichtlich ist, die

blanke Kupferoberfläche von Cu\_1 über den gesamten Versuch hinweg vollständige Filmkondensation aufwies, während hingegen im Fall der Goldoberfläche Cu\_4 beständig Tropfenkondensation vorherrschte.



**Abbildung 4-10: Kondensation auf den verschiedenen Oberflächen von Set A (Aufnahmen mit Highspeed-Kamera)**

Jedoch wird gemäß der Theorie davon ausgegangen, dass durch Tropfenkondensation einen signifikant (mindestens um Faktor 2) höheren Wärmeübergang im Vergleich zur Filmkondensation erreicht werden kann und sich dies folgendermaßen in der Kondensationsrate widerspiegelt. Im Fall der Filmkondensation auf der blanken Kupferoberfläche von Cu\_1 kann zu den höheren Werten der Kondensatmenge die Ausbildung von Wellen auch bei laminarer Filmströmung beitragen, die sowohl an rauen als auch an polierten Oberflächen auftraten. Die Erklärung für diesen Effekt liegt in den z.T. ungedämpften, stets in der Strömung vorhandenen kleinen Störungen der Geschwindigkeit, die für die Wellenbildung verantwortlich sind. [6]

Darüber hinaus sollen aufgrund der ähnlich hohen Werte des Sdr-Parameters, der als Maß für die allgemeine Rauheit gilt (vgl. Kapitel 3.3.1.1.1 sowie Abschnitt 4.1.1.1), die Kondensationsleistungen des oxidierten Kupferrohrs Cu\_2 wie ebenfalls des zuvor oxidierten und anschließend vergoldeten Rohrs Cu\_3 mit den beiden anderen Oberflächen verglichen werden. Die Kondensationsleistungen des oxidierten Kupferrohrs Cu\_2 sowie des zuvor oxidierten und anschließend vergoldeten Rohrs Cu\_3 liegen ebenso dicht beieinander, wie es im Fall von Cu\_1 und Cu\_4 der Fall ist. Im Folgenden

zeichnet sich im Schaubild ein geringer Abstand zwischen dem Paar Cu\_1 und Cu\_4 sowie dem Paar Cu\_2 und Cu\_3 auf, der sich besonders im Kühlwassertemperaturbereich von 75°C bis 50°C stärker manifestiert. Dabei fällt auf, dass sich die Kondensatmenge der beiden oxidierten Proberohre regelmäßig leicht unterhalb der Werte der beiden anderen Rohre Cu\_1 und Cu\_4 befindet. Anhand der REM-Aufnahmen in Abschnitt 4.1.2.1 ist zu erkennen, dass beide Proberohre eine ähnliche Oberflächentopografie mit zusätzlicher Rauheit im Mikrometer-Bereich aufweisen. Durch diese zusätzliche Rauheit werden bei der Kondensation somit viele Stellen zwischen den Erhebungen als Keimstellen durch die nun niedrigere Keimbildungsarbeit aktiviert. Das Auftreten dieses Effekts lässt sich durch die besonders hohe Kontaktwinkelhysterese des oxidierten Kupferrohrs Cu\_2, was auf das Pinning-Vermögen der Oberfläche hindeutet, erklären. So bilden sich zunächst Tropfen, die anwachsen und sich mit fortschreitender Zeit zusammenschließen. Als Folge davon füllen sich die Oberflächenstrukturen bis sich ein zusammenhängender Film ausbildet, der sich wiederum unvorteilhaft auf den Wärmeübergang auswirkt.

#### 4.3.1.2 Set B

In Abbildung 4-11 sind die Kondensatmengen über den eingestellten Kühlwassertemperaturen für Set B aufgetragen.

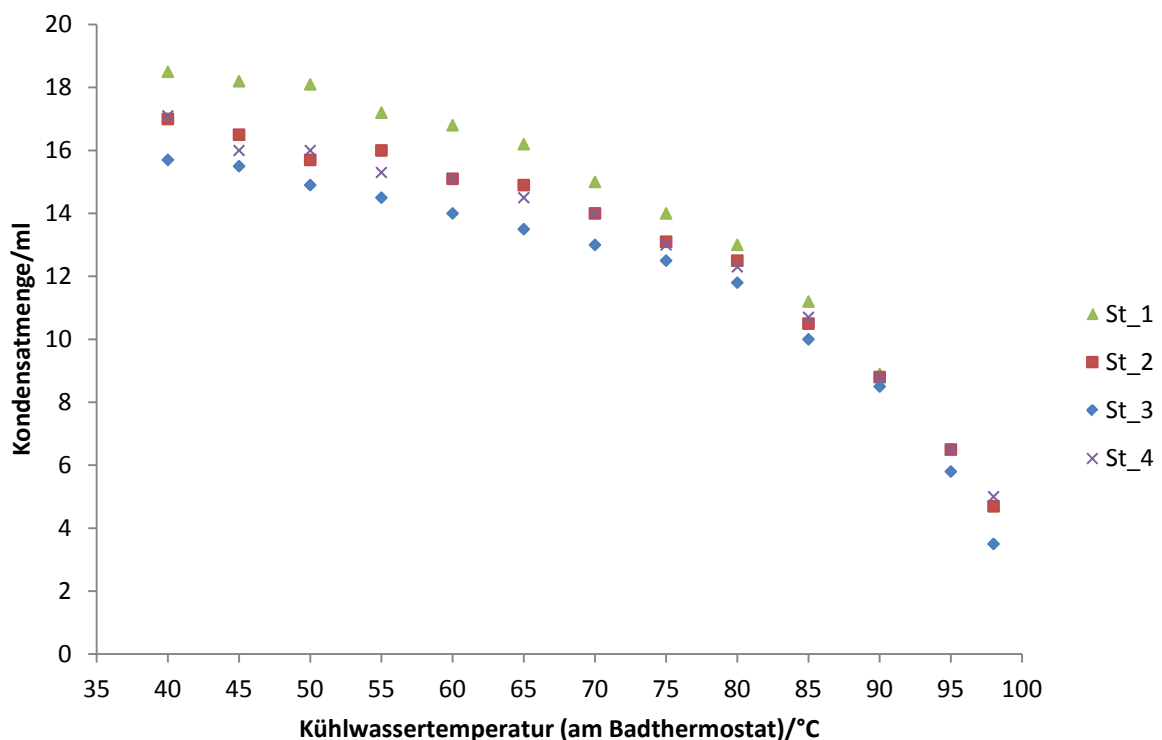
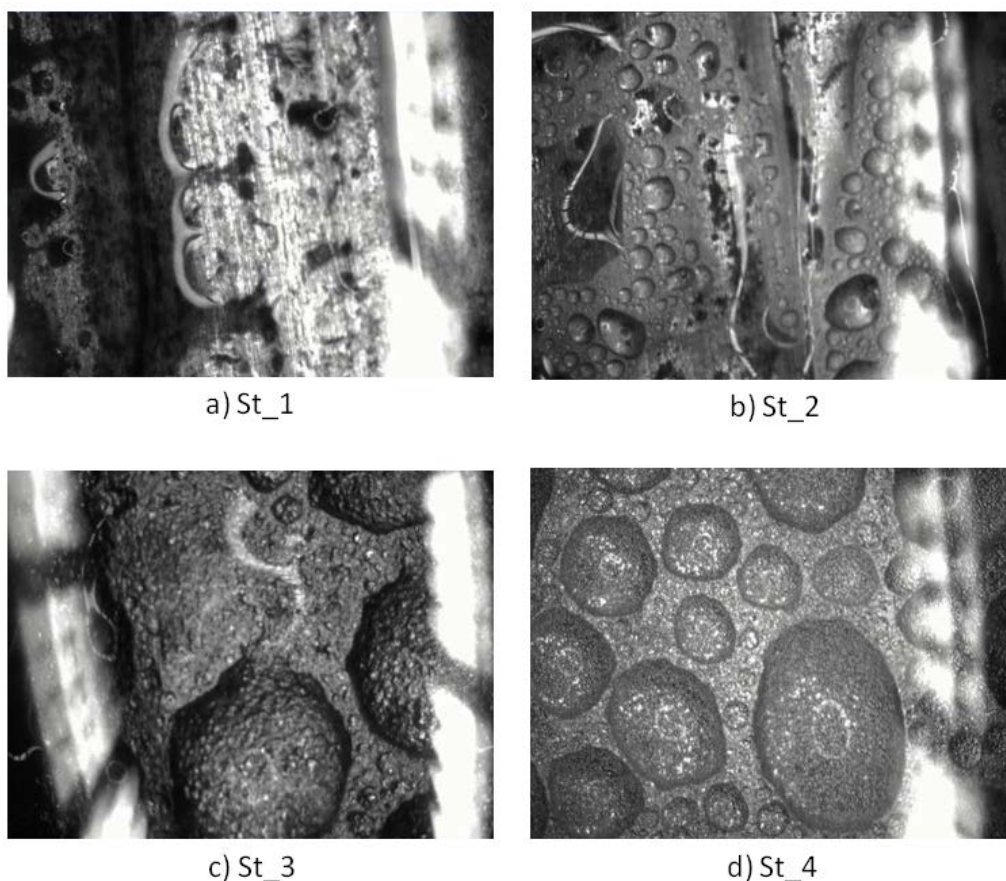


Abbildung 4-11: Kondensationsleistung Set B: Kondensatmenge über die am Badthermostat eingestellte Kühlwassertemperatur

Wie bereits im Fall für Set A steigen die Kurven bis zu einer Kühlwassertemperatur von 65°C in einem stärkeren Ausmaß, um dann in einen weniger steilen Verlauf weiter anzusteigen. Ab dieser Temperatur beginnen sich die Kondensatmengen in geringem Maße auszudifferenzieren, wobei die blanke Stahloberfläche des Proberohrs St\_1 die über alle Kühlwassertemperaturen hinweg die höchsten Werte aufweisen. Anhand der Videoaufzeichnungen mit der Highspeed-Kamera (vgl. Abbildung 4-12) war zu sehen, dass sich neben einem zusammenhängenden Kondensatfilm auf der Stahloberfläche ebenfalls lokal unbenetzte Stellen ausbildeten.



**Abbildung 4-12: Kondensation auf den verschiedenen Oberflächen von Set B (Aufnahmen mit Highspeed-Kamera)**

Von allen Oberflächen zeigt die sandgestrahlte, silanisierte Oberfläche des Kondenserrohrs St\_3 die niedrigsten Werte der Kondensatmenge. Aufgrund der Alufolie, die während des Versuchs um den Glaskondensator gewickelt war, stellte sich erst nach dem Versuch heraus, dass die Oberfläche korrodiert war trotz Versicherung des Herstellers bezüglich der Temperatur- und Hydrolysebeständigkeit der Silanschicht. Dadurch ließ sich der Beginn der Korrosion nicht bestimmen. Bei der visuellen Beobachtung der Kondensation fiel jedoch auf, dass sich an bestimmten, über die Dauer des gesamten Versuchs gleichen Stellen lokal Tropfen bildeten, kontinuierlich anwuchsen und ein großes Volumen erreichten ohne abzulaufen. Die Wassertropfen können sich regelrecht in der durch Sandstrahlen bearbeiteten, von Kratern übersäten Oberfläche ansammeln und die Krater fluten, wodurch sich die Tropfen festsetzen und wachsen können. Das

lange Verweilen und beständige Anwachsen der Tropfen stellt wiederum ein Hindernis für den Wärmeübergang dar, worauf die geringe Kondensatmenge ebenfalls hindeutet.

Die Kondensatmengen des verchromten Proberohrs St\_4 sowie des silanisierten Stahrohrs St\_2 weisen ähnliche Werte auf und liegen im Bereich zwischen der blanken Stahloberfläche und der sandgestrahlten, silanisierten Oberfläche. Bei der Beobachtung der Kondensation zeigte sich, dass im Fall der verchromten Oberfläche von St\_4 über den gesamten Versuch hinweg Tropfenkondensation vorherrschte, die Tropfen jedoch über eine geringere Durchschnittsgröße im Vergleich zur Oberfläche mit der schlechtesten Kondensationsleistung mit der sandgestrahlten, silanisierten und im Laufe des Versuches korrodierten Probe St\_3 verfügten. Auf der silanisierten Stahloberfläche St\_2 trat Mischkondensation auf, wobei insgesamt kleinere Tropfen zusätzlich zu Filmsträngen zu erkennen waren. Zudem kam es während des Versuchs wie bereits bei der sandgestrahlten, silanisierten Oberfläche von St\_3 auch auf dieser Oberfläche zur Korrosion, demnach stellt die Silanschicht keine langzeitbeständige Beschichtung dar.

Nichtsdestotrotz unterscheiden sich die Kondensatmengen der Oberflächen des Sets B wie im Fall von Set A lediglich in geringem Ausmaß. Sowohl mit Bezug auf die Langzeitstabilität als auch im Hinblick auf das Erscheinungsbild der Kondensationstropfen zeigen die hocheigebnete Goldschicht Cu\_4 von Set A sowie die Chromschicht St\_4 mit halbkugelförmigen Strukturelementen von Set B ähnliche Eigenschaften. Allerdings zeichnet sich in den Kurvenverläufen der Werte für die Kondensatmenge in beiden Oberflächen kein dominanter Einfluss ab, obwohl Kupfer mit ca. 240-380 W/mK [37] eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit als Baustahl mit 40-60 W/mK [37] besitzt. Daraus lässt sich schließen, dass seitens des Materials und der Oberfläche keine Hemmnisse auf den Wärmeübergang wirken, sondern vielmehr die Limitierung in der Dampfphase zu suchen ist.

## Fazit

Die ursprünglich erwartete Verbesserung der Kondensationsleistung konnte mithilfe der verwendeten Apparatur nicht gezeigt werden. Die Ursachen dafür können am Widerstand liegen, mit denen der Stofftransport während der Kondensation von Dämpfen verbunden ist. Dieser Widerstand setzt sich aus drei Teilwiderständen zusammen: der Wärmewiderstand im Dampf, der beim Übergang des Dampfes in die flüssige Phase auftretende Wärmewiderstand sowie der Wärmewiderstand der flüssigen Phase. [6] Aufgrund der unzureichenden Durchmischung in der beengten Kondensationskammer sowie der Anwesenheit von Inertgasen (vgl. Kapitel 2.2.8) kann nach Baehr und Stephan [6] der Wärmewiderstand der Dampfphase eine limitierende Wirkung auf den Stofftransport haben.

Da der im Rahmen dieser Arbeit konzipierte Versuchsaufbau aus Laborglasgeräten nicht evakuierbar war, ist anzunehmen, dass die Luft nicht vollständig verdrängt werden konnte und es sich zwangsläufig um ein Gemisch aus Wasserdampf und Luft als inerte Komponente im Wasserdampf handelte. So konzentrieren sich die nicht kondensierbaren Komponenten an der Phasengrenze von Dampf und Kondensatfilm auf, da sie über einen höheren Dampfdruck verfügen. So kommt es zur Ausbildung einer Inertgasschicht an der Phasengrenze von Dampf und Kondensatfilm, welche als

Diffusionsbarriere für die Wasserdampfmoleküle wirkt und aufgrund derer der Kondensationsprozess eine Limitierung erfährt. [38] Dieser Effekt wird noch durch den begrenzten Raum im Glaskondensator verstärkt. Um diese Diffusionsschicht zu verringern, muss das Testrohr schneller umströmt werden. Demnach muss die Strömungsgeschwindigkeit des Dampfes erhöht werden. Aus diesen Überlegungen heraus erfolgten weitere Versuche mit erhöhter Dampfmenge, wie im nachfolgenden Abschnitt 4.3.2 näher erläutert wird.

### **4.3.2 Variation der Dampfmenge sowie der Heizbandtemperatur**

Um bei der Messung der Kondensationsleistung den Einfluss des Heizbandes sowie der zur Verfügung stehenden Dampfmenge auf die Kondensationsprozess zu untersuchen, wurden im Zuge weiterer Versuche beide Parameter variiert. In diesem Zusammenhang wurde zum einen die die Dampfmenge erhöht sowie zum anderen die Heiztemperatur des Heizbandes erniedrigt. Diese Versuche erfolgten exemplarisch mit der blanken Kupferoberfläche des Proberohrs Cu\_1 sowie der hocheingeebneten, vergoldeten Oberfläche des Rohrs Cu\_4, da diese Oberflächen ausgeprägte Film- bzw. Tropfenkondensation zeigten (vgl. Abschnitt 4.3.1.1) und daher eine Differenz im Wärmeübergang aufweisen sollten.

Zur Untersuchung des Einflusses einer größeren Dampfmenge auf die Kondensation wurde ein zusätzlicher Verdampferkolben mithilfe eines Schlauchs mit dem Hauptverdampferkolben verbunden. Der Schlauchdurchmesser betrug 30 mm, sodass es durch den großen Durchmesser möglich war, zusätzlichen Dampf in den Hauptkolben einzuleiten. Es wurden Messreihen bei Heizbandtemperaturen von jeweils 150°C sowie 115°C durchgeführt, wobei sich das Schaubild für die Heizbandtemperatur von 115°C im Anhang D befindet.



#### 4.3.2.1 Einfluss vermehrter Dampfzuführung auf die Kondensationsleistung bei gleichbleibender Kondenserbeheizung

Abbildung 4-13 stellt die Kondensatmengen in Abhängigkeit der am Badthermostat eingestellten Kühlwassertemperatur bei Heizbandtemperaturen von 150°C dar. Dabei gibt die Zahl hinter der Probenbezeichnung in der Legende die Heizbandtemperierung an, während „D“ in der Legende auf vermehrte Dampfzufuhr hinweist.

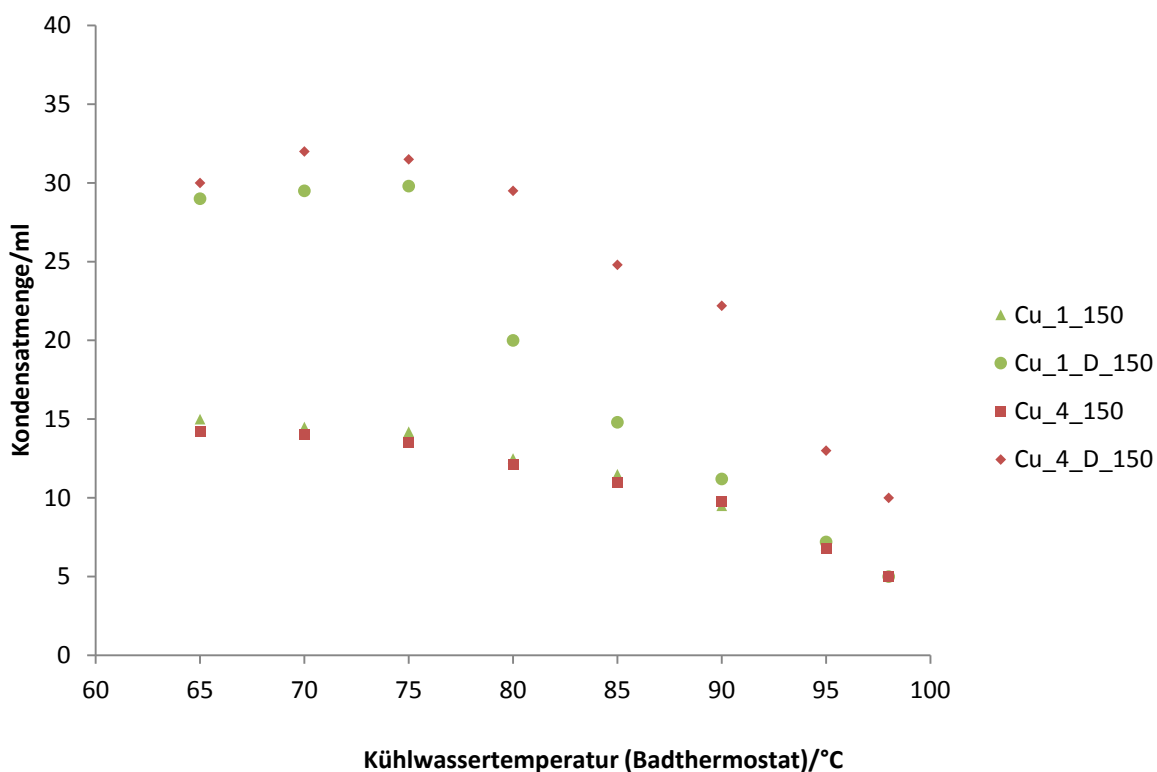


Abbildung 4-13: Einfluss erhöhter Dampfzufuhr bei einer Heizbandtemperatur von 150°C

Beiden Versuchsvariationen ist gemein, dass die Werte der Kondensatmenge für die Messreihen ohne zusätzliche Dampfzufuhr sowohl der Oberfläche von Cu\_1 als auch von Cu\_4 im Vergleich zu den jeweiligen Werten mit zusätzlichem Dampf nahe beieinander liegen. Im Fall von 150°C Heizbandtemperatur (siehe Abbildung 4-13) sind die Kondensatmenge nahezu identisch, erst bei der Zuführung von mehr Dampf wird eine Ausdifferenzierung sichtbar.

Des Weiteren geht aus Abbildung 4-13 hervor, dass die vergoldete Oberfläche des Probenrohrs Cu\_4 bei einer Heizbandtemperatur von 150°C mit vermehrter Dampfmenge durchgängig für alle Unterkühlungen deutlich höhere Kondensatmengen aufweist.

Ein weiterer Diskussionspunkt stellt wie bereits in Kapitel 3.3.3.3 erwähnt, die Möglichkeit einer Überhitzung der Kondenserkammer dar, da bei einer Heizbandtemperatur von 150°C im Inneren des leeren Glaskondensers die Dampftemperatur ebenfalls 150°C betrug. Am oberen Ende des Kondensers lag die Dampftemperatur immer noch bei 130°C. Aus diesem Grund wurde die ursprüngliche Temperatur des Heizbandes von 150°C abgesenkt. Dabei wurde die Temperatur

sukzessiv um 5 K-Schritten am Regler erniedrigt und auf eine Belegung der Glaskondensierwand mit kondensiertem Dampf geachtet. Ab 115°C trat eine Belegung der Glaswand in der Mitte des Kondensers ein, was als Indikator für eine Sättigung gewertet wurde und somit erneut Versuche mit dieser Heizbandtemperatur erfolgten.

#### 4.3.2.2 Einfluss einer niedrigeren Kondenserbeheizung bei gleichbleibender Dampfzuführung

In Abbildung 4-14 wird der nur geringe Einfluss der Variation der Kondenserbeheizung auf die Kondensatmenge deutlich. Dabei wird in diesem Fall kein zusätzlicher Dampf dem Hauptverdampfer zugeführt. Es wurden Messreihen jeweils mit als auch ohne zusätzliche Dampfzuführung durchgeführt, wobei die grafische Darstellung der Messreihe mit vermehrter Dampfmenge im Anhang D zu finden ist.

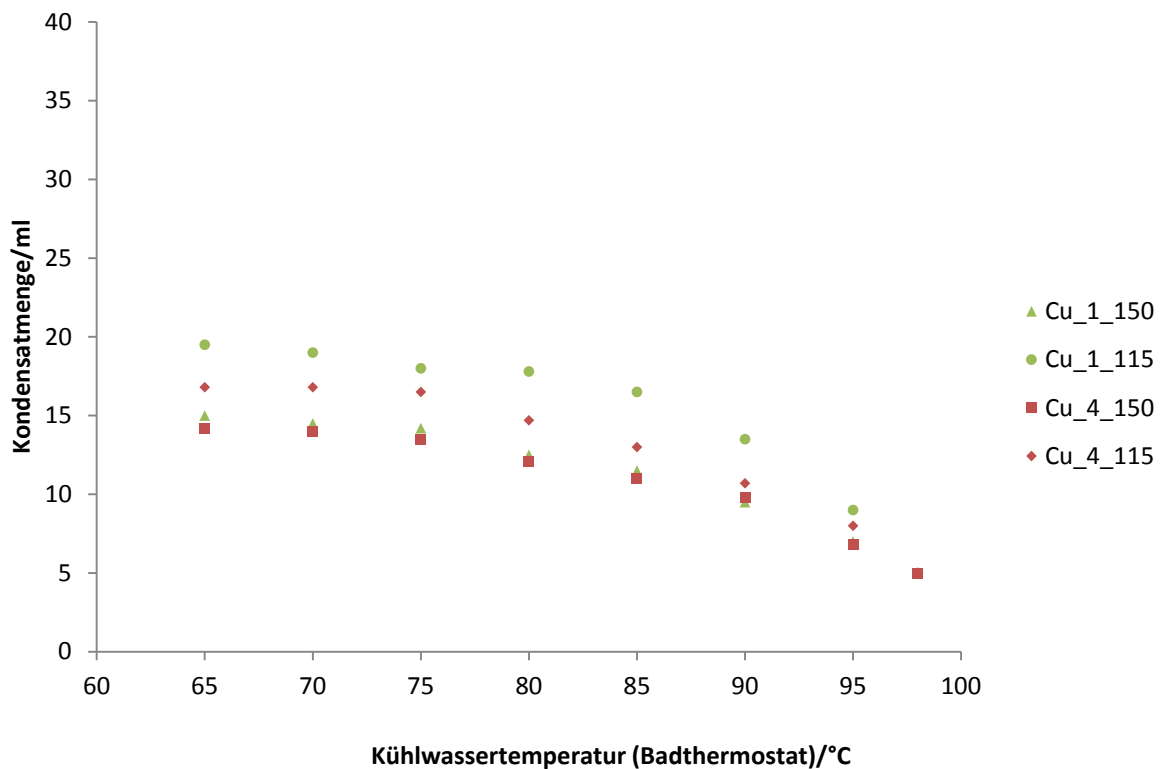


Abbildung 4-14: Einfluss der Kondenserbeheizung ohne zusätzliche Dampfzuführung

Aus Abbildung 4-14 wird ersichtlich, dass sich zwar die Kondensatmengen für beide Oberflächen vergrößern und ausdifferenzieren, allerdings nicht in dem Maße, wie es für die Variation der Dampfmenge bei gleichbleibender Kondenserbeheizung der Fall war (vgl. Abschnitt 4.3.2.1). Daraus lässt sich ableiten, dass der Einfluss der Beheizung des Kondensers eine im Vergleich zur Variation der Dampfmenge untergeordnete Rolle spielt. Während sich bei der Versuchsvariation ohne zusätzliche, vermehrte Dampfzuführung bei gleichzeitiger Heizbandtemperatur von 150°C in den Oberflächen der Probenrohre Cu\_1 und Cu\_2 nahezu keine Unterschiede in der Kondensatmenge

---

ersichtlich sind (siehe Abbildung 4-14), liegen die Werte für die Goldoberfläche von Cu\_4 bei größerer Dampfmenge und gleichbleibender Heizbandtemperatur klar über den Werten der blanken Kupferoberfläche Cu\_1 (siehe Abbildung 4-13).

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die exemplarische Etablierung einer Herangehensweise, um zukünftige Oberflächenmodifikationen wie Schichten oder Strukturierungen im Hinblick auf ihre Eignung als Kondensationsoberfläche in Wärmeübertragungsanwendungen zu überprüfen. Dabei sollten Zusammenhänge zwischen verschiedenen Oberflächentopografien sowie dem Benetzungsverhalten und dem Wärmeübergang diskutiert werden. Die Charakterisierung der Oberflächentopografie erfolgte anhand dreidimensionaler Konfokalmikroskopie, wohingegen das Benetzungsverhalten der Oberfläche durch Kontakt- sowie Abrollwinkelmessungen untersucht wurde.

Darüber hinaus wurde eine speziell für die Messung der Kondensationsleistung zuständige Versuchsapparatur konzipiert, mithilfe derer die bei der Kondensation von Wasserdampf anfallende Menge an Kondensat ermittelt werden konnte. Dabei wurden die Kondensatmengen jeweils in definierten Zeitintervallen über Messreihen von unterschiedlichen Temperaturunterschieden zwischen Dampftemperatur und Kühlwassertemperatur hinweg gesammelt. Zudem wurde der Kondensationsvorgang mithilfe einer Highspeed-Kamera aufgezeichnet.

Dazu wurden zunächst Testkörper aus Rohrmaterial aus jeweils Kupfer und Baustahl hergestellt, deren Oberflächen im Anschluss modifiziert wurden. Die Modifikation der Oberflächen erfolgte zum einen über mechanische oder chemische Strukturierung des Rohrgrundmaterials mit ggf. anschließender Beschichtung sowie zum anderen bereits über das Beschichten selbst. Als Referenzproben wurden für beide Grundmaterialien jeweils Testrohre im Anlieferungszustand, d.h. ohne Modifikation durch eine Schicht oder zusätzliche Strukturierung, verwendet. Auf diesem Weg konnten Oberflächen unterschiedlicher Topografie erzeugt und diese anhand von dreidimensionalen Oberflächenkennwerten und Bildaufnahmen sowie bezüglich des Benetzungsverhaltens charakterisiert werden.

Im Zusammenhang mit den Versuchen zur Messung der Kondensationsleistung zeigte sich jedoch, dass sich Veränderungen aufgrund einer Oberflächenstrukturierung oder durch ein geändertes Benetzungsverhalten nicht auf die Kondensatmenge auswirkten. Diesbezüglich wies insbesondere die eingeebnete, vergoldete Oberfläche eines Kupfertestrohrs unverkennbar Tropfenkondensation auf, während hingegen der Dampf auf der blanken Kupferoberfläche des Referenzrohrs als Film kondensierte. Aus den Untersuchungen jedoch ging der erwartete Effekt einer signifikant höheren Kondensatmenge als Folge eines entsprechend höheren Wärmeübergangs für Tropfenkondensation aufweisende Oberflächen nicht hervor. Es zeigte sich, dass die Kondensatmengen ähnliche Werte für beide Oberflächen aufwiesen. Selbst im Fall der Testrohre aus Stahl unterschieden sich die erfassten Kondensatmengen nicht wesentlich von jenen der Kupfertestrohre, obwohl Kupfer eine ca. 4-fach höhere Wärmeleitfähigkeit als Stahl besitzt. Aus diesem Grund lässt sich darauf schließen, dass weder ein limitierender Einfluss auf den Wärmeübergang durch die Oberfläche noch durch den Wärmetransport durch das Material besteht.

Durch Versuche mit vermehrter Dampfführung und einer damit einhergehenden höheren Umströmung der Kondensertestrohre konnte gezeigt werden, dass sich die Kondensationsleistungen

sowohl für die eingeebnete, vergoldete Oberfläche als auch für die blanke Kupferoberfläche deutlich gesteigert werden konnten. Daraus geht hervor, dass der limitierende Einfluss in der Dampfphase vorliegen muss, wodurch der Stofftransport aufgrund einer als Diffusionsbarriere wirkenden Anreicherung an nichtkondensierbaren Gasen an der Phasengrenze gehemmt wurde. Durch die höhere Dampfleistung werden lokal höhere Anströmgeschwindigkeiten des Dampfes an die Kondenseroberfläche erreicht, was eine geringere Diffusionsschicht und somit eine geringere Konzentration an Inertgasen zur Folge hatte.

Eine Ausdifferenzierung der Kondensatmenge an verschiedenen Oberflächen ist unter den gegenwärtigen, in der Versuchsanordnung vorherrschenden Bedingungen nicht zu realisieren. So spielt in diesem Zusammenhang das jeweilige Originalsystem mit seinen Betriebsbedingungen und damit einhergehend seinem spezifischen Betriebspunkt eine wichtige Rolle. Zur Auswahl geeigneter Modifikationen der Oberfläche für einen konkreten Anwendungsfall sollten daher die Abweichungen zum realen Betriebspunkt gering gehalten werden, welche sich in den nachfolgenden Punkten äußern:

- Benetzungsverhalten: je nach verwendetem Wärmeträgermedium kann das Benetzungsverhalten für dieselbe Oberfläche stark variieren, sodass für zukünftige Betrachtungen Versuche mit dem Zielmedium durchgeführt werden sollten
- Konvektion/Diffusion: um den Einfluss einer Diffusionsgrenzschicht an der Phasengrenze möglichst gering zu halten, muss insgesamt eine größere Kondensationskammer vorhanden sein, d.h. größere Wandabstände der Kondenseroberfläche zur Kammerwand. Dies hat zur Folge, dass ebenfalls mehr Dampf zur Verfügung gestellt werden muss, der gleichzeitig mit einer höheren Strömung beaufschlagt werden muss, um den Probekörper schneller umströmen zu können und so die Bildung einer Diffusionsbarriere verhindert werden kann, auch sollte die anströmende Dampfmenge quantifiziert werden können.
- Temperaturgradient: Um den Einfluss der ungleichmäßigen Temperaturverteilung im Kondenserrohr entgegenzuwirken, müsste für zukünftige Versuche die Durchflussrate des Kühlwassers erhöht werden. Allerdings müsste ebenfalls die Genauigkeit der Temperaturmessung erhöht werden, um den Effekt der homogeneren Temperaturverteilung messen zu können.
- Berücksichtigung der realen Einbauposition: laut Literatur nimmt der Wärmeübergangskoeffizient bei horizontaler Einbaulage niedrigere Werte im Vergleich zur vertikalen Einbaulage an.

- Temperierung der Kondenserwand: die Temperierung der Kondenserwand sollte gleichmäßig erfolgen, sodass der zu kondensierende Dampf nicht lokal überhitzt. Hierfür eignet sich ein Kondensator mit temperierbarer Doppelwand besser als eine Begleitheizung.

Im Hinblick auf die Charakterisierung der Oberflächentopografie ist der Zusammenhang zwischen den dreidimensionalen Oberflächenkenngrößen und dem Kondensationsverhalten noch nicht ausreichend erforscht und sollte aus diesem Grund bei zukünftigen Untersuchungen verstärkt werden.

## 6 Anhang

### 6.1 Anhang A: Zeichnungen des Prüfkörpers

Prüfkörper

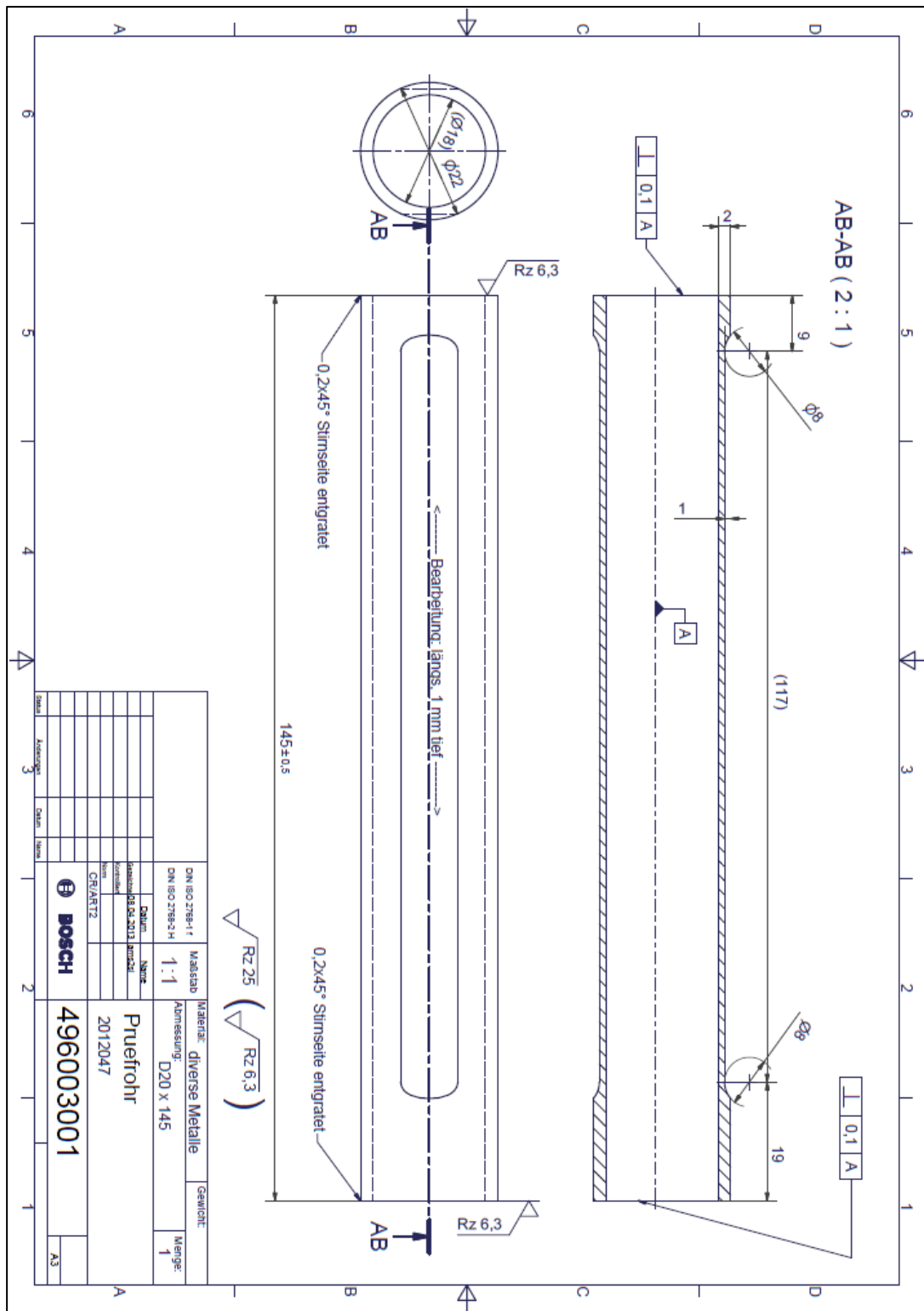


Abbildung A.6-1: CAD-Zeichnung des Prüfkörpers

Zusammenbau

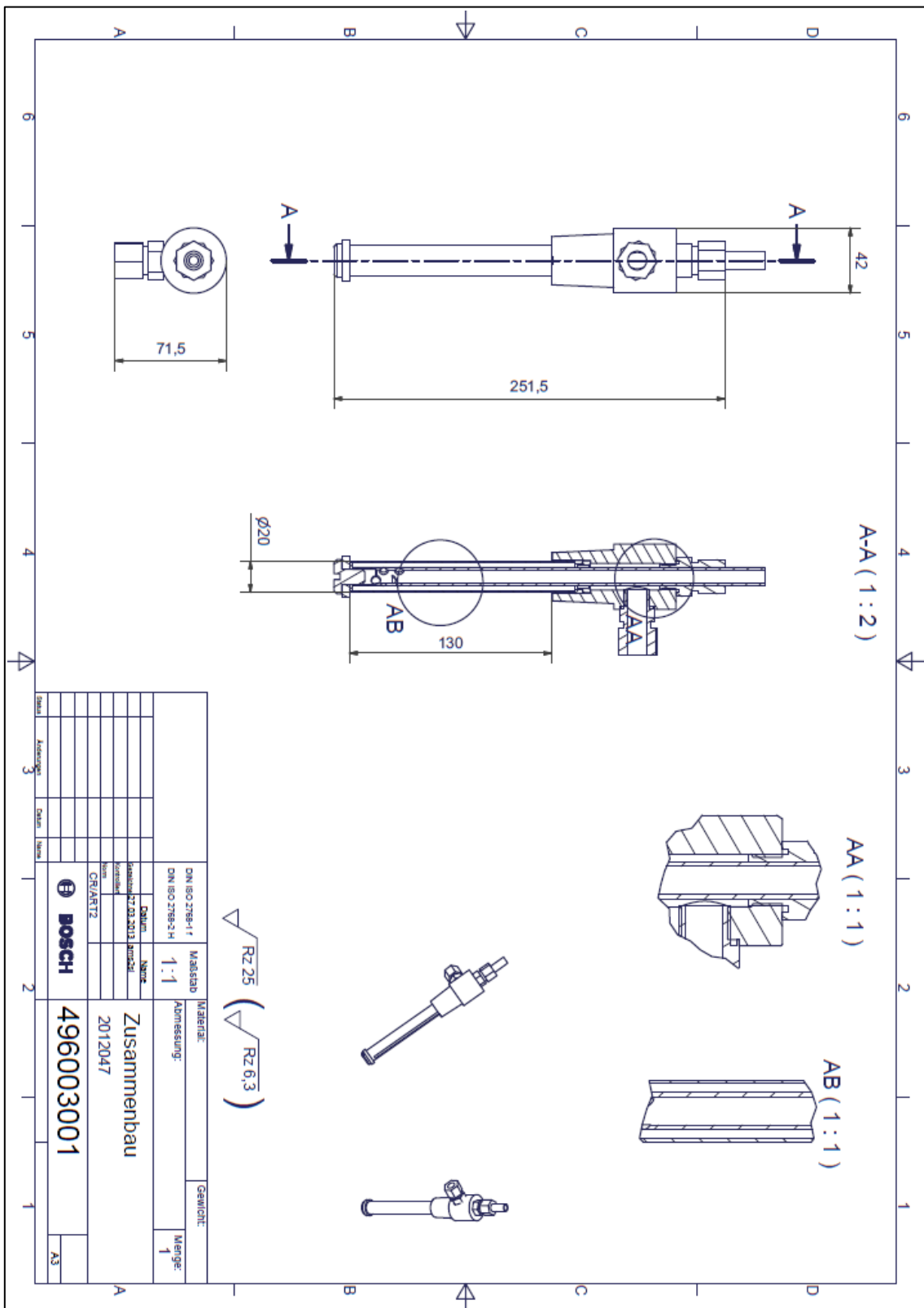


Abbildung A.6-2: Zusammenbau Prüfkörper



## Messaufbau im Labor

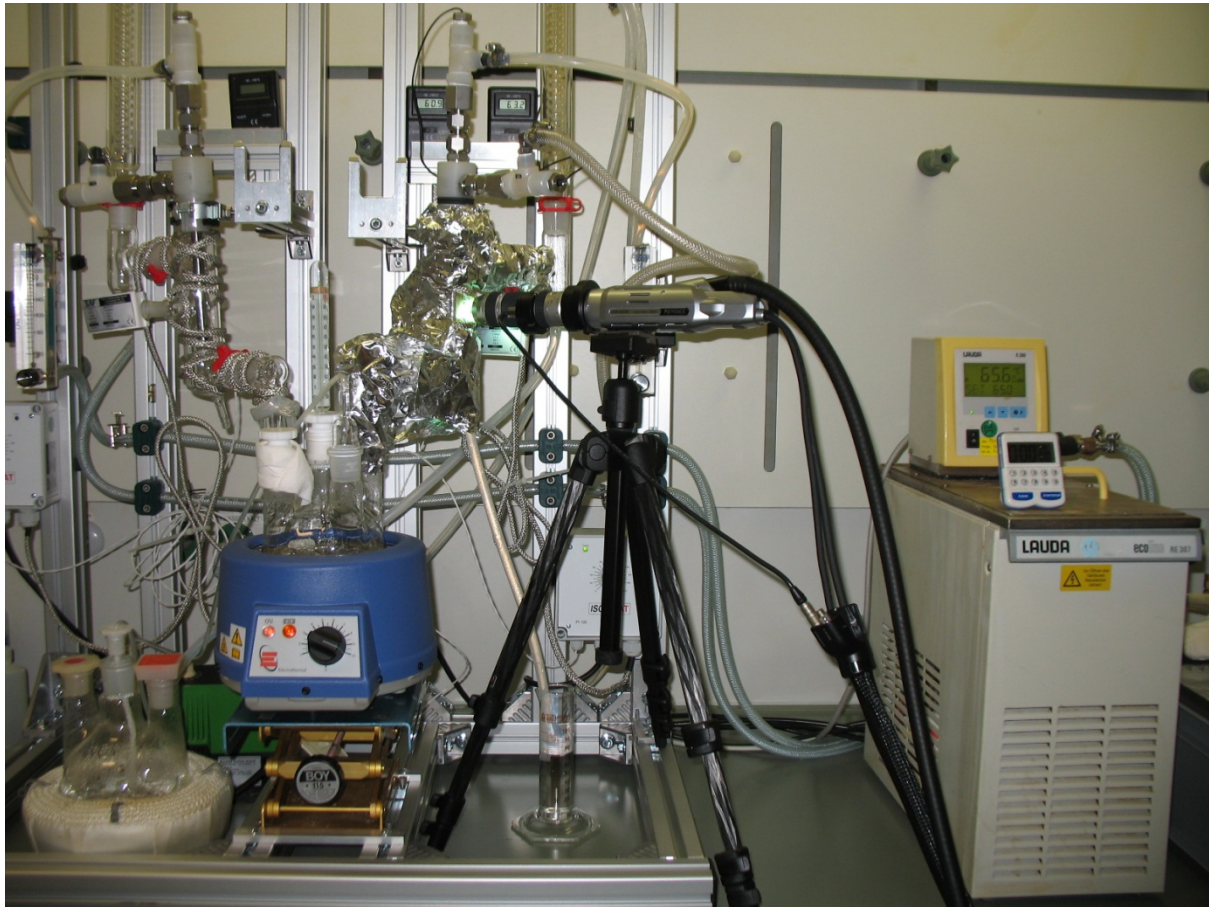


Abbildung A.6-3: Versuchsaufbau im Labor

## 6.2 Anhang B: Ansichten der Oberflächentopografie

Topografie: Planflächen (Set A)

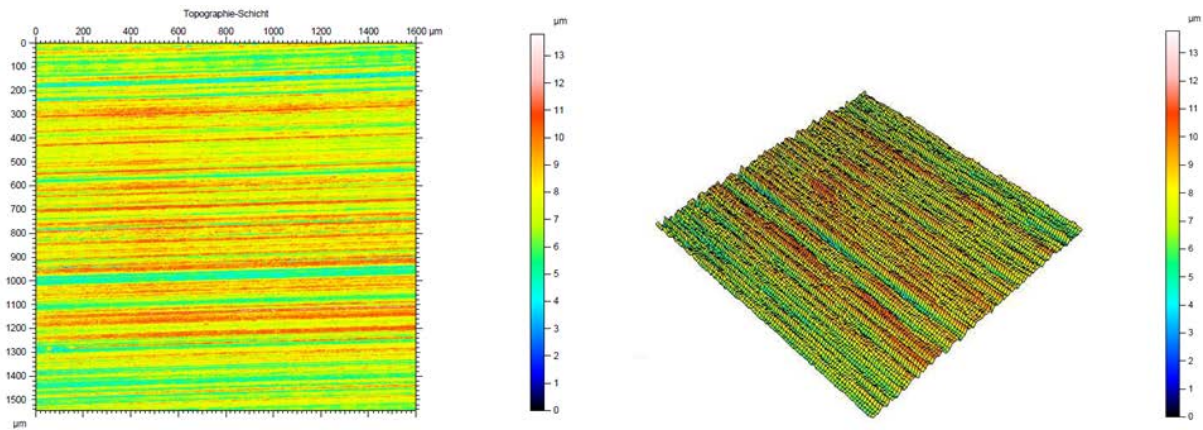


Abbildung A.6-4: Topografie für Planfläche der Probe Cu\_1 (blanke Kupferoberfläche)

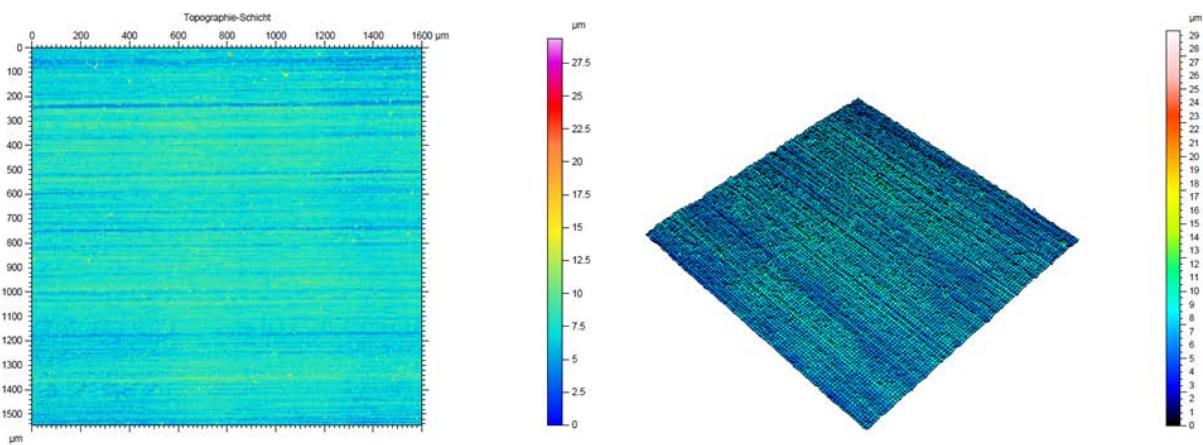


Abbildung A.6-5: Topografie für Planfläche der Probe Cu\_2 (oxidierte Kupferoberfläche)

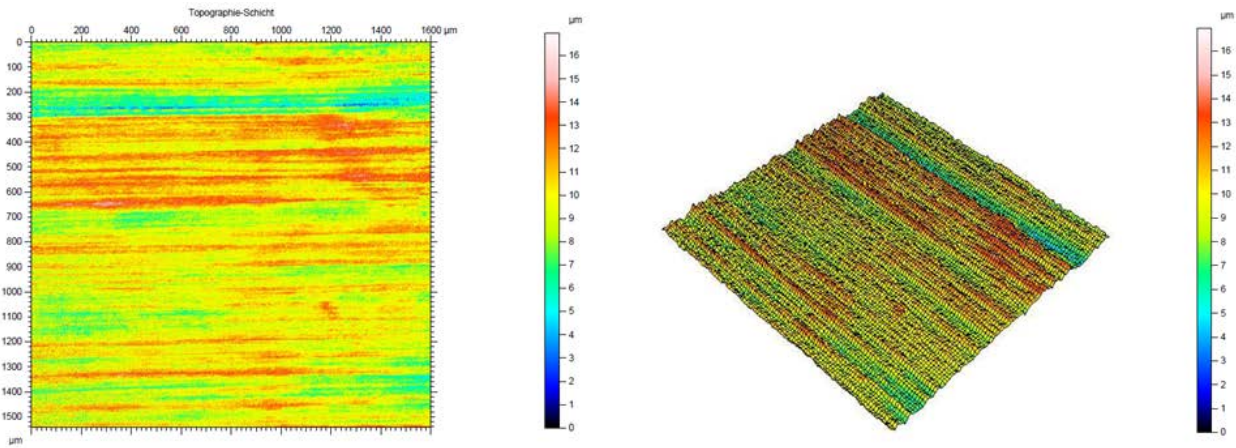


Abbildung A.6-6: Topografie für Planfläche der Probe Cu\_3 (oxidierte und vergoldete Oberfläche)

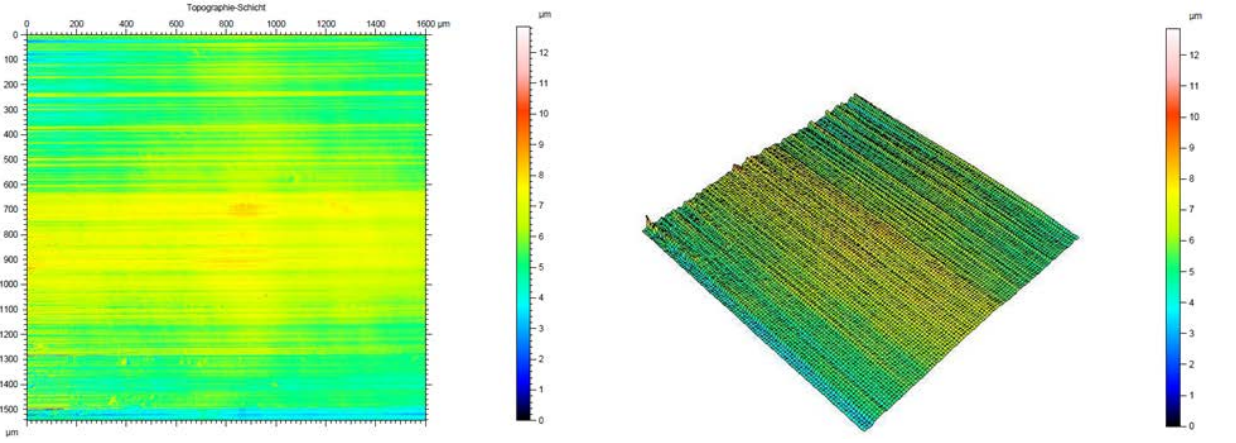


Abbildung A.6-7: Topografie für Planfläche der Probe Cu\_4 (hocheingebnete, vergoldete Oberfläche)

## Topografie: Planflächen (Set B)

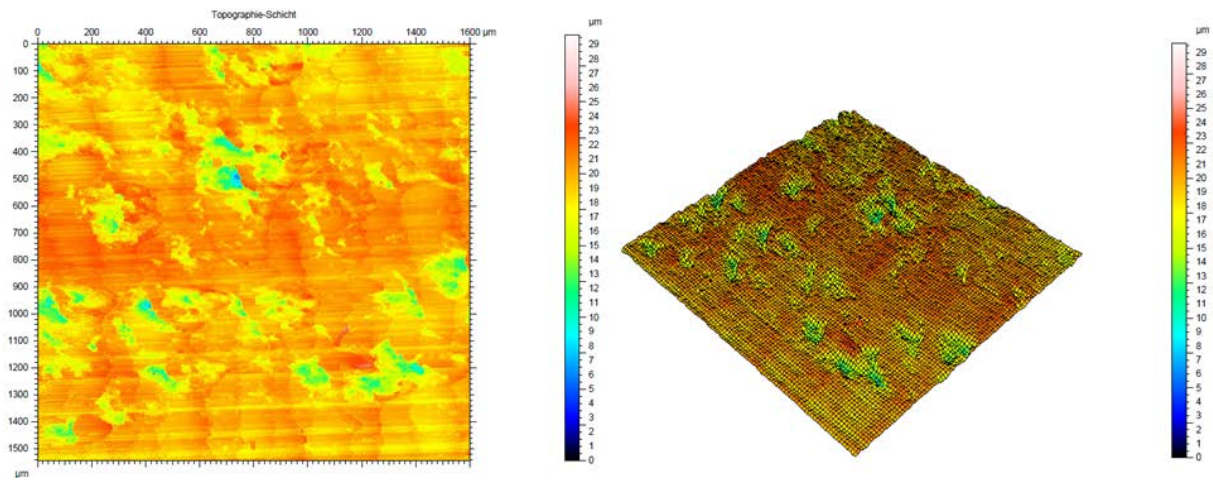


Abbildung A.6-8: Topografie für Planfläche der Probe St\_1 (blanke Stahloberfläche)

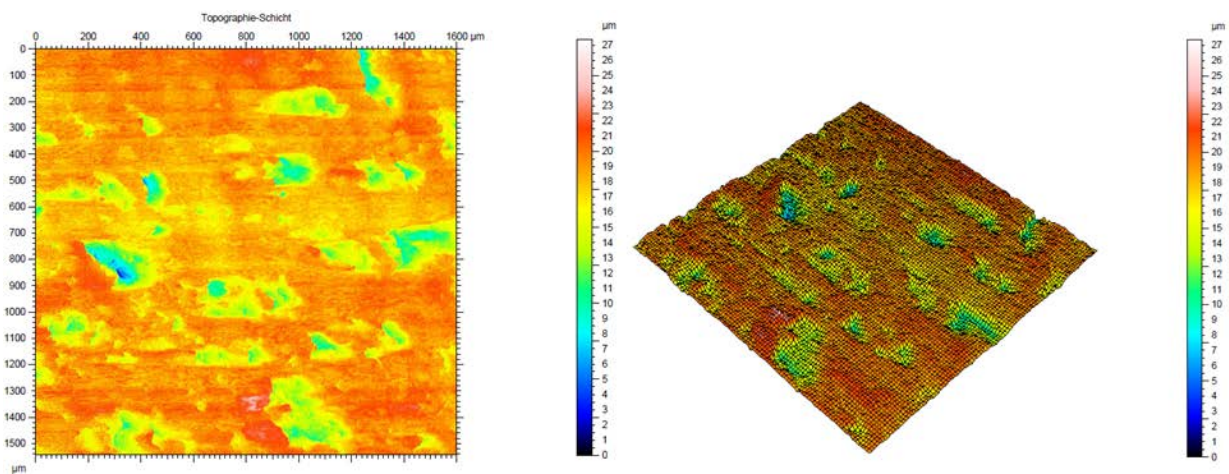


Abbildung A.6-9: Topografie für Planfläche der Probe St\_2 (silanisierte Stahloberfläche)

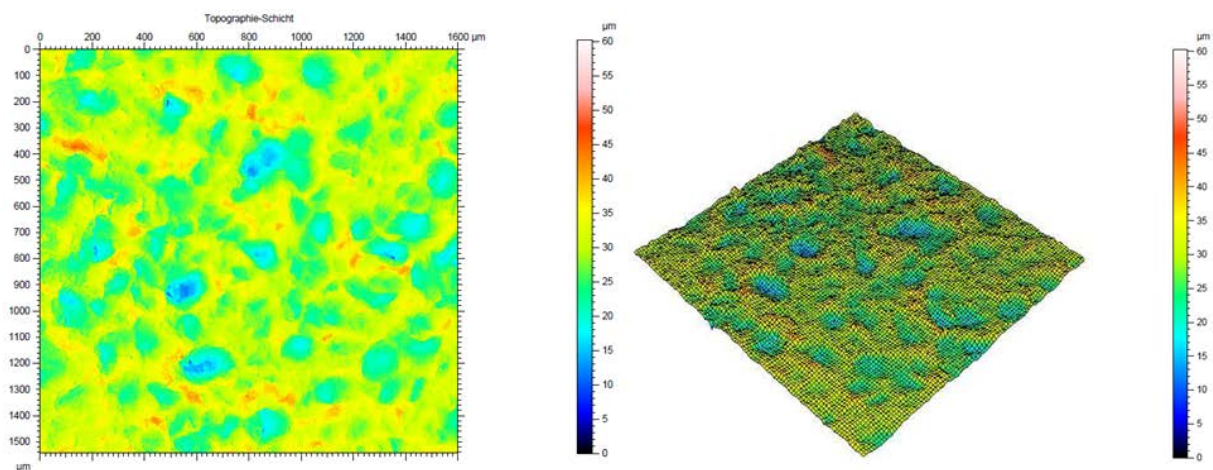


Abbildung A.6-10: Topografie für Planfläche der Probe St\_3 (sandgestrahlte, silanisierte Stahloberfläche)

Topografie: Runde Flächen (Set A)

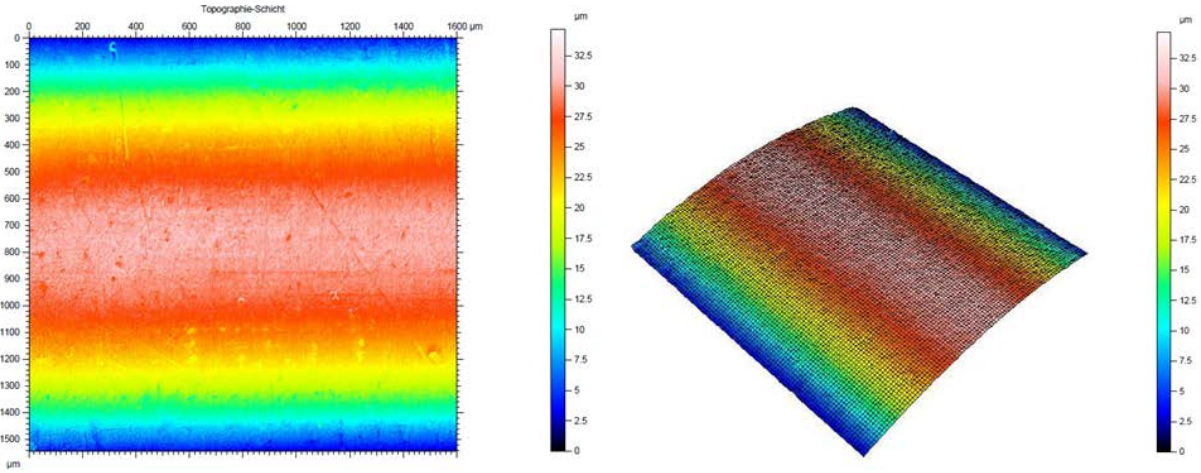


Abbildung A.6-11: Topografie für Rundfläche der Probe Cu\_1 (blanke Kupferoberfläche)

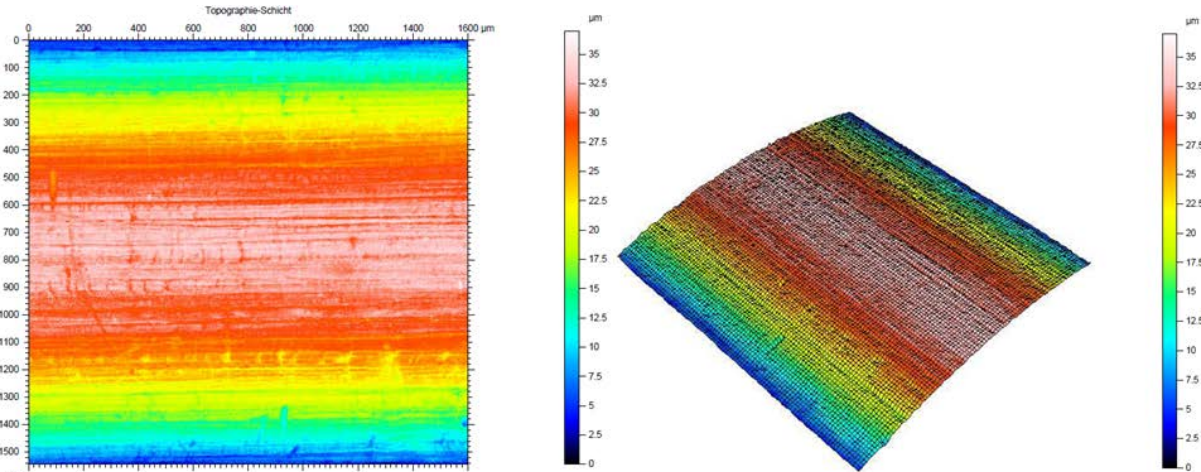


Abbildung A.6-12: Topografie für Rundfläche der Probe Cu\_2 (oxidierte Kupferoberfläche)

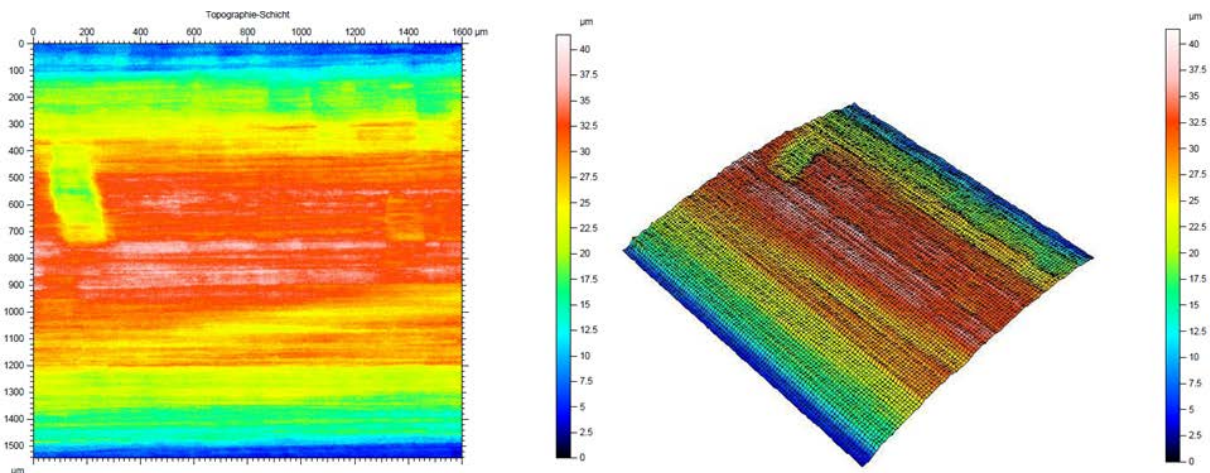


Abbildung A.6-13: Topografie für Rundfläche der Probe Cu\_3 (oxidierte und vergoldete Oberfläche)

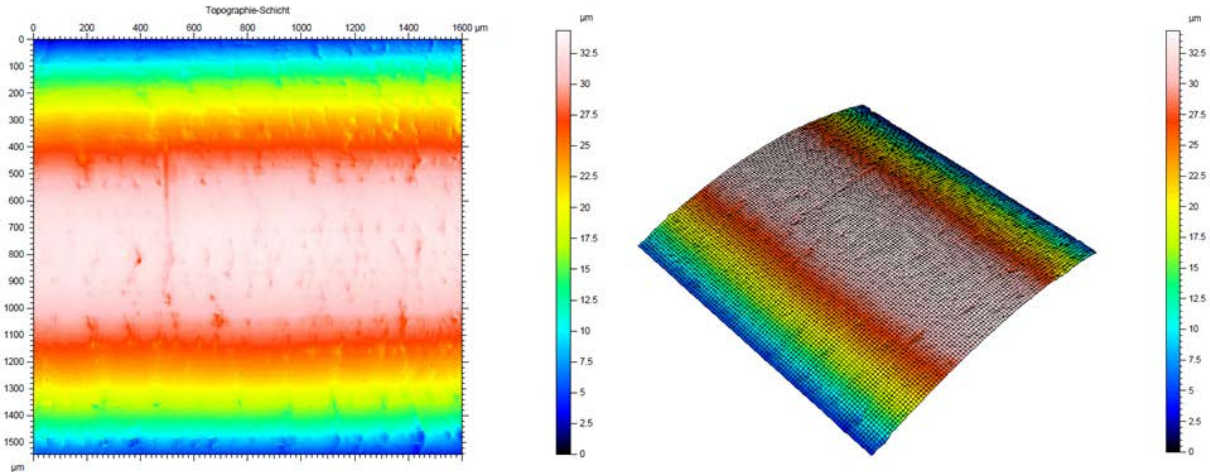


Abbildung A.6-14: Topografie für Rundfläche der Probe Cu\_4 (hocheingebnete, vergoldete Oberfläche)

## Topografie: Runde Flächen (Set B)

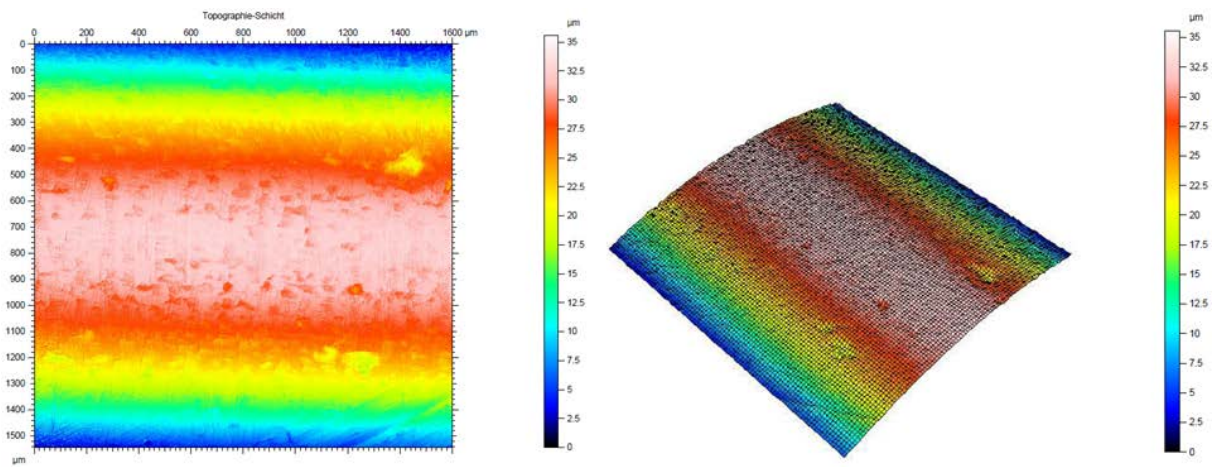


Abbildung A.6-15: Topografie für Rundfläche der Probe St\_1 (blanke Stahloberfläche)

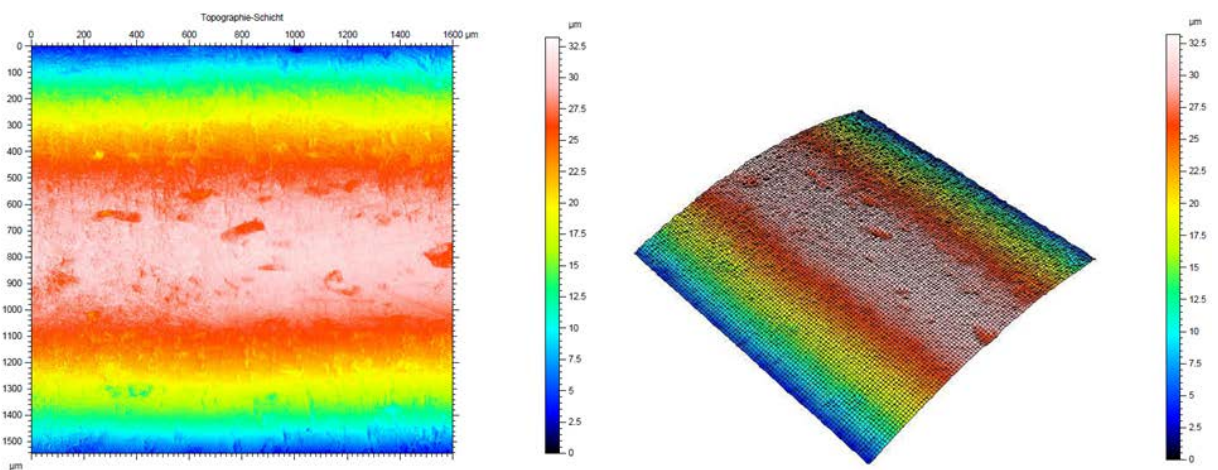


Abbildung A.6-16: Topografie für Rundfläche der Probe St\_2 (silanierte Stahloberfläche)

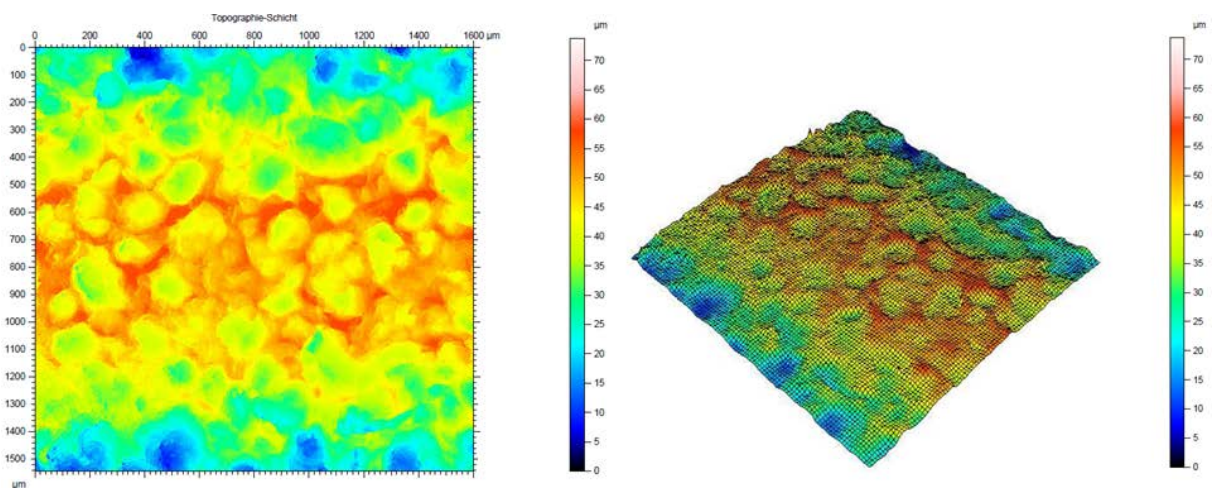


Abbildung A.6-17: Topografie für Rundfläche der Probe St\_3 (sandgestrahlte, silanierte Stahloberfläche)

### 6.3 Anhang C: Messdaten der Benetzungseigenschaften

Messdaten: Statischer Kontaktwinkel (Set A)

Tabelle A.6-1: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe Cu\_1 (blanke Kupferoberfläche)

Messpunkt	Rohr 1		Rohr 2	
	Planfläche	runde Fläche	Planfläche	runde Fläche
1	97	92	91	91
2	96	97	85	92
3	92	99	89	90
4	99	94	92	94
5	104	93	90	95
6	103	84	90	93
7	98	97	94	92
8	103	97	88	92
9	99	102	91	92
10	98	88	102	97
11	102	88	98	92
12	102	95	93	90
13	100	98	90	91
14	99	97	89	89
15	100	98	87	87
<b>MW</b>	<b>100</b>	<b>95</b>	<b>91</b>	<b>92</b>
<b>STABW</b>	3,0	4,6	4,1	2,4
<b>MIN</b>	91,9	84,2	85,2	86,9
<b>MAX</b>	103,8	101,6	102,3	97,1

Tabelle A.6-2: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe Cu\_2 (oxidierte Kupferoberfläche)

Messpunkt	Rohr 1		Rohr 2	
	Planfläche	runde Fläche	Planfläche	runde Fläche
1	105	109	106	101
2	105	109	102	102
3	107	110	103	104
4	107	107	104	104
5	106	108	102	104
6	106	108	105	104
7	106	106	103	104
8	108	107	105	104
9	105	107	106	105
10	104	107	106	102
11	105	109	107	105
12	105	106	105	105
13	109	107	104	106
14	109	107	105	104
15	108	106	103	104
<b>MW</b>	<b>106</b>	<b>107</b>	<b>104</b>	<b>104</b>
<b>STABW</b>	1,5	1,1	1,3	1,1
<b>MIN</b>	103,7	106,1	102,1	101,3
<b>MAX</b>	109,3	109,6	106,5	105,6



Tabelle A.6-3: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe Cu\_3 (oxidierte und vergoldete Oberfläche)

Messpunkt	Rohr 1		Rohr 2	
	Planfläche	runde Fläche	Planfläche	runde Fläche
1	81	84	69	61
2	85	77	70	61
3	85	77	68	66
4	86	78	68	66
5	86	75	68	68
6	87	77	68	66
7	84	75	67	64
8	82	76	71	63
9	80	75	77	62
10	81	73	76	65
11	86	72	71	66
12	86	72	72	70
13	86	70	75	70
14	83	72	73	69
15	85	71	72	66
<b>MW</b>	<b>84</b>	<b>75</b>	<b>71</b>	<b>66</b>
<b>STABW</b>	2,3	3,4	3,0	2,7
<b>MIN</b>	79,6	70,4	67,4	61,2
<b>MAX</b>	87,4	84,1	76,8	70,3

Tabelle A.6-4: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe Cu\_4 (hocheingebnete, vergoldete Oberfläche)

Messpunkt	Rohr 1		Rohr 2	
	Planfläche	runde Fläche	Planfläche	runde Fläche
1	68	66	72	75
2	63	72	71	75
3	61	72	72	73
4	60	75	72	73
5	63	77	73	76
6	65	80	74	77
7	64	80	75	78
8	65	77	74	76
9	68	79	71	76
10	63	80	68	74
11	68	81	65	75
12	65	83	74	76
13	67	83	75	76
14	67	82	74	76
15	67	83	75	72
<b>MW</b>	<b>65</b>	<b>78</b>	<b>72</b>	<b>75</b>
<b>STABW</b>	2,5	4,8	2,8	1,5
<b>MIN</b>	59,7	66,4	64,7	72,0
<b>MAX</b>	68,1	83,5	75,1	77,9

## Messdaten: Statischer Kontaktwinkel (Set B)

Tabelle A.6-5: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe St\_1 (blanke Stahloberfläche)

Messpunkt	Rohr 1		Rohr 2	
	Planfläche	runde Fläche	Planfläche	runde Fläche
1	81	75	75	79
2	83	83	80	85
3	83	83	78	82
4	81	82	84	83
5	81	80	79	83
6	83	75	84	77
7	81	77	83	83
8	82	82	80	84
9	82	83	75	80
10	81	84	76	77
11	74	79	81	76
12	77	78	82	81
13	79	80	83	80
14	80	76	76	75
15	74	81	80	79
<b>MW</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>
<b>STABW</b>	2,8	3,0	3,1	3,0
<b>MIN</b>	74	75	75	75
<b>MAX</b>	83	84	84	85

Tabelle A.6-6: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe St\_2 (silanierte Stahloberfläche)

Messpunkt	Rohr 1		Rohr 2	
	Planfläche	runde Fläche	Planfläche	runde Fläche
1	96	103	103	103
2	99	103	102	104
3	99	103	103	104
4	99	102	102	105
5	98	103	103	104
6	98	104	104	105
7	100	105	106	104
8	100	103	105	104
9	103	104	100	103
10	104	105	105	104
11	104	103	104	103
12	104	102	104	104
13	105	102	104	105
14	106	102	105	103
15	104	100	104	104
<b>MW</b>	<b>101</b>	<b>103</b>	<b>104</b>	<b>104</b>
<b>STABW</b>	3,0	1,2	1,5	0,7
<b>MIN</b>	96	100	100	103
<b>MAX</b>	106	105	106	105

Tabelle A.6-7: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe St\_3 (sandgestrahlte, silanisierte Stahloberfläche)

Messpunkt	Rohr 1		Rohr 2	
	Planfläche	runde Fläche	Planfläche	runde Fläche
1	106	109	108	105
2	106	107	108	106
3	107	109	107	105
4	108	107	106	107
5	107	109	109	107
6	107	109	107	106
7	109	109	107	107
8	108	107	108	106
9	108	107	108	106
10	107	110	106	107
11	107	107	106	108
12	108	108	107	107
13	107	107	107	107
14	108	108	106	107
15	108	107	109	108
<b>MW</b>	<b>107</b>	<b>108</b>	<b>107</b>	<b>107</b>
<b>STABW</b>	0,8	1,0	1,0	0,9
<b>MIN</b>	106	107	106	105
<b>MAX</b>	109	110	109	108

Tabelle A.6-8: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe St\_4 (verchromte Oberfläche)

Messpunkt	Rohr 1	
	Planfläche	runde Fläche
1	81	72
2	84	72
3	86	83
4	84	79
5	85	77
6	85	79
7	87	74
8	83	79
9	81	79
10	84	91
11	85	79
12	79	80
13	87	92
14	78	87
15	76	84
<b>MW</b>	<b>83</b>	<b>80</b>
<b>STABW</b>	3,2	5,8
<b>MIN</b>	76	72
<b>MAX</b>	87	92

## Messdaten: Kontaktwinkelhysterese (Set A)

Tabelle A.6-9: Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe Cu\_1 (blanke Kupferoberfläche)

Messpunkt	Rohr 1			Rohr 2		
	FW	RW	HYS	FW	RW	HYS
1	106	81	25	94	72	22
2	107	78	29	95	73	22
3	96	75	21	94	73	21
4	94	74	20	100	78	22
5	108	81	27	105	77	28
6	104	82	22	113	82	31
7	86	68	18	103	80	23
8	84	67	17	112	87	25
<b>MW</b>	<b>98</b>	<b>76</b>	<b>22</b>	<b>102</b>	<b>78</b>	<b>24</b>

Tabelle A.6-10: Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe Cu\_2 (oxidierte Kupferoberfläche)

Messpunkt	Rohr 1			Rohr 2		
	FW	RW	HYS	FW	RW	HYS
1	101	79	22	130	111	19
2	132	110	22	118	96	22
3	115	101	14	118	96	22
4	142	119	23	130	107	23
5	144	127	17	130	106	24
6	137	118	19	145	129	16
7	146	123	23	122	96	26
8	134	108	26	110	92	18
<b>MW</b>	<b>131</b>	<b>111</b>	<b>21</b>	<b>125</b>	<b>104</b>	<b>21</b>

Tabelle A.6-11: Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe Cu\_3 (oxidierte und vergoldete Oberfläche)

Messpunkt	Rohr 1			Rohr 2		
	FW	RW	HYS	FW	RW	HYS
1	84	68	16	82	63	19
2	83	65	18	75	55	20
3	84	66	18	83	67	16
4	77	58	19	79	59	20
5	76	54	22	89	74	15
6	82	65	17	90	76	14
7	84	65	19	81	67	14
8	80	59	21	86	63	23
<b>MW</b>	<b>81</b>	<b>63</b>	<b>19</b>	<b>83</b>	<b>66</b>	<b>18</b>

Tabelle A.6-12: Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe Cu\_4 (hocheingebnete, vergoldete Oberfläche)

Messpunkt	Rohr 1			Rohr 2		
	FW	RW	HYS	FW	RW	HYS
1	79	61	18	75	57	18
2	77	59	18	73	54	19
3	75	57	18	75	63	12
4	80	62	18	74	59	15
5	83	69	14	77	60	17
6	84	67	17	71	56	15
7	83	69	14	72	51	21
8	88	78	10	79	61	18
<b>MW</b>	<b>81</b>	<b>65</b>	<b>16</b>	<b>75</b>	<b>58</b>	<b>17</b>

## Messdaten: Kontaktwinkelhysterese (Set B)

Tabelle A.6-13: Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe St\_1 (blanke Stahloberfläche)

Messpunkt	Rohr 1			Rohr 2		
	FW	RW	HYS	FW	RW	HYS
1	85	59	26	84	60	24
2	86	70	16	86	69	17
3	86	70	16	85	58	27
4	85	60	25	85	70	15
5	88	72	16	86	66	20
6	85	69	16	88	69	19
7	84	57	27	84	70	14
8	85	70	15	85	59	26
<b>MW</b>	<b>86</b>	<b>66</b>	<b>20</b>	<b>85</b>	<b>65</b>	<b>20</b>

Tabelle A.6-14: Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe St\_2 (silanierte Stahloberfläche)

Messpunkt	Rohr 1			Rohr 2		
	FW	RW	HYS	FW	RW	HYS
1	108	90	18	107	88	19
2	109	93	16	110	92	18
3	111	93	18	109	91	18
4	109	94	15	106	91	15
5	107	94	13	110	92	18
6	107	91	16	107	91	16
7	107	92	15	107	89	18
8	107	90	17	106	93	13
<b>MW</b>	<b>108</b>	<b>92</b>	<b>16</b>	<b>108</b>	<b>91</b>	<b>17</b>

Tabelle A.6-15: Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe St\_3 (sandgestrahlte, silanierte Oberfläche)

Messpunkt	Rohr 1			Rohr 2		
	FW	RW	HYS	FW	RW	HYS
1	105	89	16	110	95	15
2	103	88	15	110	95	15
3	105	91	14	111	94	17
4	109	91	18	109	93	16
5	104	88	16	111	96	15
6	106	90	16	108	94	14
7	106	90	16	108	90	18
8	107	89	18	109	91	18
<b>MW</b>	<b>106</b>	<b>90</b>	<b>16</b>	<b>110</b>	<b>94</b>	<b>16</b>

Tabelle A.6-16: Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe St\_4 (verchromte Oberfläche)

Messpunkt	Rohr 1		
	FW	RW	HYS
1	90	73	17
2	95	76	19
3	93	76	17
4	95	78	17
5	95	71	24
6	93	75	18
7	95	74	21
8	93	76	17
<b>MW</b>	<b>94</b>	<b>75</b>	<b>19</b>

Messdaten: Abrollwinkel (Set A)

Tabelle A.6-17: Messdaten des Abrollwinkels für Probe Cu\_1 (blanke Kupferoberfläche)

Messpunkt	Rohr 1	Rohr 2
1	-	-
2	90	-
3	-	-
4	-	87
5	-	85
6	-	-
7	-	-
8	-	90
<b>MW</b>	<b>90</b>	<b>87</b>
	<b>7</b>	<b>5</b>

Tabelle A.6-18: Messdaten des Abrollwinkels für Probe Cu\_2 (oxidierte Kupferoberfläche)

Messpunkt	Rohr 1	Rohr 2
1	90	90
2	-	-
3	-	70
4	58	-
5	59	-
6	57	90
7	61	82
8	-	-
<b>MW</b>	<b>65</b>	<b>83</b>
	<b>3</b>	<b>4</b>

Tabelle A.6-19: Messdaten des Abrollwinkels für Probe Cu\_3 (oxidierte und vergoldete Oberfläche)

Messpunkt	Rohr 1	Rohr 2
1	85	78
2	-	85
3	79	72
4	80	-
5	86	62
6	80	80
7	78	88
8	-	90
<b>MW</b>	<b>81</b>	<b>79</b>
	<b>2</b>	<b>1</b>



Tabelle A.6-20: Messdaten des Abrollwinkels für Probe Cu\_1 (blanke Kupferoberfläche)

Messpunkt	Rohr 1	Rohr 2
1	51	50
2	45	49
3	47	47
4	44	39
5	48	47
6	41	51
7	40	28
8	38	28
MW	<b>44</b>	<b>42</b>
	<b>0</b>	<b>0</b>

Messdaten: Abrollwinkel (Set B)

Tabelle A.6-21: Messdaten des Abrollwinkels für Probe St\_1 (blanke Stahloberfläche)

Messpunkt	Rohr 1	Rohr 2
1	90	-
2	85	84
3	82	83
4	-	82
5	88	78
6	78	80
7	73	79
8	79	86
<b>MW</b>	<b>82</b>	<b>82</b>
	<b>1</b>	<b>1</b>

Tabelle A.6-22: Messdaten des Abrollwinkels für Probe St\_2 (silanierte Stahloberfläche)

Messpunkt	Rohr 1	Rohr 2
1	18	verrostet
2	17	
3	15	
4	15	
5	20	
6	23	
7	16	
8	19	
<b>MW</b>	<b>18</b>	
	<b>0</b>	

Tabelle A.6-23: Messdaten des Abrollwinkels für Probe St\_3 (sandgestrahlte, silanierte Stahloberfläche)

Messpunkt	Rohr 1	Rohr 2
1	21	21
2	22	25
3	23	28
4	22	28
5	20	20
6	23	19
7	23	20
8	22	21
<b>MW</b>	<b>22</b>	<b>23</b>
	<b>0</b>	<b>0</b>

Tabelle A.6-24: Messdaten des Abrollwinkels für Probe St\_4 (verchromte Oberfläche)

Messpunkt	Rohr 1
1	-
2	61
3	68
4	69
5	65
6	62
7	41
8	57
<b>MW</b>	<b>60</b>
	<b>1</b>

## 6.4 Anhang D: Messung der Kondensationsleistung bei Variation der Dampfmenge bzw. Heizbandtemperierung

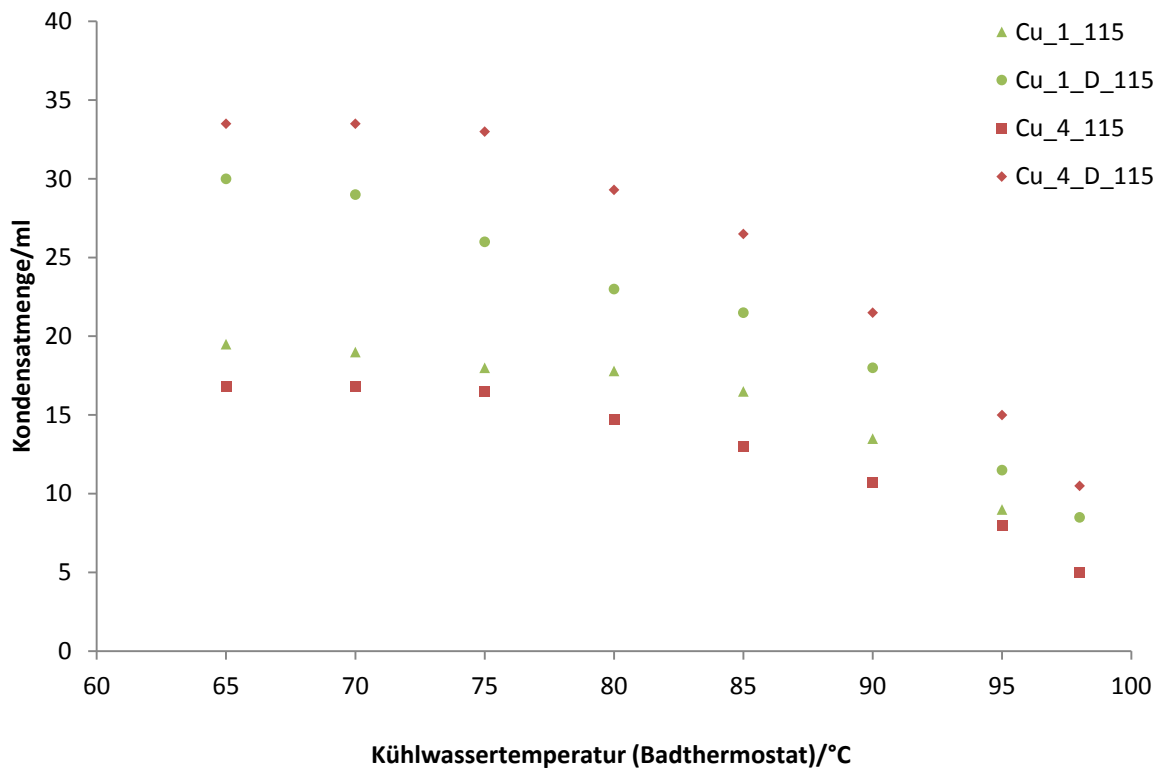


Abbildung A.6-18: Einfluss erhöhter Dampfmenge bei einer Heizbandtemperierung von 115°C

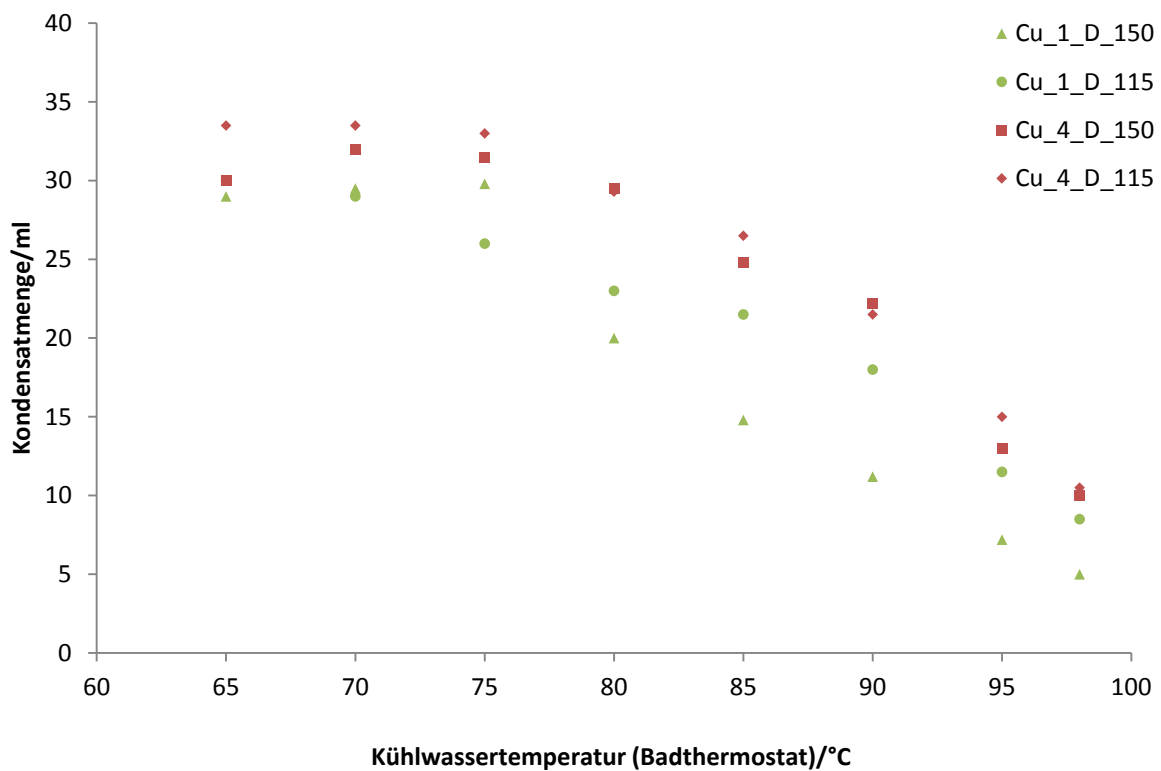


Abbildung A.6-19: Einfluss der Heizbandtemperierung bei erhöhter Dampfzufuhr

## II Abkürzungs- und Formelverzeichnis

### Formelzeichen und Einheiten

$A$	$m^2$	Fläche
$g$	$\frac{m}{s^2}$	Gewichtskraft
$h_v$	$\frac{J}{mol}$	Verdampfungsenthalpie
$L$	$m$	Länge
$\dot{M}$	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom
$n$		Exponent
$O$	$m^2$	Tropfenoberfläche
$p$	$Pa$	Druck
$Q$	$J$	Wärmemenge
$\dot{Q}$	$W$	Wärmestrom
$\dot{q}$	$\frac{W}{m^2}$	Wärmestromdichte
$R$	$m$	Radius
$R_{th}$	$\frac{K}{W}$	Wärmeleitwiderstand
$r$		Oberflächenbeschaffenheitsfaktor
$T$	$K$	Temperatur
$t$	$s$	Zeit
$V$	$m^3$	Tropfenvolumen
$W$	$J, Nm$	Arbeit

**Griechische Buchstaben**

$\alpha$	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient
$\beta$	°	Neigungswinkel
$\gamma$	$\frac{N}{m}$	Grenzflächenspannung
$\Delta T$	$K$	Unterkühlung
$\delta$	$m$	Filmdicke
$\eta$	$\frac{Ns}{m^2}$	Dynamische Viskosität
$\theta$	°	Kontaktwinkel
$\lambda$	$\frac{W}{mK}$	Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
$\sigma$	$\frac{N}{m}$	Oberflächenspannung
$\phi$	$m^2$	Anteil vom Tropfen benetzte Fläche

**Indizes**

$a$	außen
$CB$	Cassie-Baxter
$D$	Dampf
$Diff$	Diffusion
$F$	Festkörper
$f$	Fortschreitend
$G$	Gas
$GG$	Gleichgewicht
$GM$	Grundmaterial
$I$	an der Phasengrenzfläche
$i$	innen
$K$	Keimbildung
$KW$	Kühlwasser

---

<i>L</i>	Flüssigkeit
<i>nG</i>	nicht kondensierbares Gas, Inertgas
<i>O</i>	Oberfläche
<i>r</i>	Rückziehend
<i>S</i>	Schicht
<i>Sä</i>	Sättigung
<i>V</i>	Volumen
<i>W</i>	Wand
<i>WE</i>	Wenzel
<i>WL</i>	Wärmeleitung

### III Literaturverzeichnis

- [1] R. Marek und K. Nitsche, Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen - Anwendungen - Übungsaufgaben, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2007.
  
- [2] Skriptum zur Vorlesung Wärmetransportphänomene, Lehrstuhl für Thermodynamik, TU München, SS 2003, [Online]. Verfügbar unter: [http://www.td.mw.tum.de/tum-td/en/studium/lehre/waermetrans/download/Skripten/1\\_WTP\\_Skript\\_SS03.pdf](http://www.td.mw.tum.de/tum-td/en/studium/lehre/waermetrans/download/Skripten/1_WTP_Skript_SS03.pdf). [Zugriff am 20.06.2013].
  
- [3] H. Herwig und A. Moschallski, Wärmeübertragung: Physikalische Grundlagen - Illustrierende Beispiele - Übungsaufgaben mit Musterlösungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
  
- [4] DK-Kälteanlagen: DK-Sauggas-Wärmetauscher, [Online]. Verfügbar unter: <http://www.google.de/imgres?q=w%C3%A4rmetauscher+mantelraum&um=1&sa=N&biw=1600&bih=738&hl=de&tbm=isch&tbnid=sMATNG4V6YQIZM:&imgrefurl=http://www.dk-kaelteanlagen.de/de/html/2392/schaltungsschema.html&docid=4nH0hV6JuhXzaM&imgurl=http://www.dk-kaelteanlagen>. [Zugriff am 04.07.2013].
  
- [5] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, VDI-Wärmeatlas, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
  
- [6] H. Baehr und K. Stephan, Wärme- und Stoffübertragung, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
  
- [7] B. Sikarwar, S. Khandekar, S. Agrawal, S. Kumar und K. Muralidhar, „Dropwise Condensation Studies on Multiple Scales,“ Heat Transfer Engineering, S. 301 - 341, 2012.



- [8] W. Kast, „Bedeutung der Keimbildung und der instationären Wärmeübertragung für den Wärmeübergang bei Blasenverdampfung und Tropfenkondensation,“ Chemie Ingenieur Technik, S. 933 - 940, 1964.
- [9] P. von Böckh und T. Wetzel, Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [10] K.-H. Grote und J. Feldhusen, Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [11] R. Dittmeyer, W. Keim, G. Kreysa und A. Oberholz, Hrsg., Winnacker-Küchler: Chemische Technik: Prozesse und Produkte, Bd. Band 6a: Metalle, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
- [12] A. Kuhlmann, E. Medra, F. Rößner, H. Schneider und T. Woehl, ChemgaPedia: Wärmeleitung durch Wände, [Online]. Verfügbar unter:  
[http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/waermetransport/waermeleitung\\_durch\\_waende/waermeleitung\\_durch\\_waende.vlu.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/waermetransport/waermeleitung_durch_waende/waermeleitung_durch_waende.vlu.html). [Zugriff am 29.04.2013].
- [13] J. Boreyko und C.-H. Chen, „Self-Propelled Dropwise Condensate on Superhydrophobic Surfaces,“ Physical Review Letters, S. 184501-1 - 184501-4, 2009.
- [14] A. Leipertz und A. Fröba, „Improvement of Condensation Heat Transfer by Surface Modifications,“ Heat Transfer Engineering, S. 343 - 356, 2008.
- [15] H. Reiss, „Warum gibt es Benetzung?,“ Physik in unserer Zeit, S. 204 - 212, 1992.
- [16] S. Kamps, Untersuchungen und Herstellung von hydrophoben und superhydrophoben Beschichtungen zur Verbesserung des Wärmeübergangs durch Tropfenkondensation, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2012.

- 
- [17] S. Sepeur, Nanotechnologie: Grundlagen und Anwendungen, Hannover: Vincentz Network, 2008.
- [18] C. Dorrer und J. Rühle, „Condensation and Wetting Transitions on Microstructured Ultrahydrophobic Surfaces,“ *Langmuir*, S. 3820 - 3824, 2007.
- [19] S. Dallmann, Reinigung superhydrophober Oberflächen, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2011.
- [20] H.-D. Dörfler, Grenzflächen und kolloid-disperse Systeme: Physik und Chemie, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
- [21] U. Mock, Über das Benetzungsverhalten polymermodifizierter Grenzflächen, Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2004.
- [22] M. Miwa, A. Nakajima, A. Fujishima, K. Hashimoto und T. Watanabe, „Effects of the Surface Roughness on Sliding Angles of Water Droplets on Superhydrophobic Surfaces,“ *Langmuir*, S. 5754 - 5760, 2000.
- [23] G. Koch, D. Zhang und A. Leipertz, „Condensation of steam on the surface of hard coated copper discs,“ *Heat and Mass Transfer*, S. 149 - 156, 1997.
- [24] D. Quéré, A. Lafuma und J. Bico, „Slippy and sticky microtextured solids,“ *Nanotechnology*, S. 1109 - 1112, 2003.
- [25] F. Bošnjaković und K. Knoche, Technische Thermodynamik, Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, 1998.

- [26] N. Miljkovic, R. Enright, Y. Nam, K. Lopez, N. Dou, J. Sack und E. Wang, „Jumping-Droplet-Enhanced Condensation on Scalable Superhydrophobic Nanostructured Surfaces,“ *Nano Letters*, S. 179 - 187, 2012.
- [27] W. Li, Kondensation von Wasserdampf oder eines Wasserdampf/Stickstoff-Gemisches in einem horizontalen Rohr, Dissertation, Forschungszentrum Jülich GmbH, 2001.
- [28] D. S. Christen, *Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [29] S. Finnicum und J. Westwater, „Dropwise vs filmwise condensation of steam on chromium,“ *International Journal of Heat Mass Transfer*, S. 1541 - 1549, 1989.
- [30] Langbein-Pfanhauser Werke AG, *Taschenbuch für Galvanotechnik*, Neuss/Rhein: Eigenverlag der Langbein-Pfanhauser Werke AG, 1970.
- [31] DIN Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 25178*, 2012.
- [32] Michigan Metrology: 3D S Parameters - Spatial Parameters, [Online] Verfügbar unter: [http://www.michmet.com/3d\\_s\\_spatial\\_parameters\\_sal.htm](http://www.michmet.com/3d_s_spatial_parameters_sal.htm) [Zugriff am 03.09.2013]
- [33] K. Stout und L. Blunt, *Development of Methods for Characterisation of Roughness in Three Dimensions*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [34] C. Wiehr und J. Seewig, „3D-Kenngrößen nach ISO 25178,“ Aufsatz, Technische Universität Kaiserslautern, [Online]. Verfügbar unter: <http://ak-rauheit.de/files/3D%20Kenngro%F6%DFen.pdf>. [Zugriff am 11.08.2013].
- [35] C.M. Detz und R.J. Vermesh, „Nucleation Effects in the Dropwise Condensation of Steam on Electroplated Gold Surfaces“, *AIChE Journal*, S. 87 - 93, 1976.

- 
- [36] H.J. Bargel und G. Schulze, Werkstoffkunde, Springer-Verlag, Berlin Hiedelberg, 2013
- [37] T. Smith, „The Hydrophilic Nature of a Clean Gold Surface“, Journal of Colloid and Interface Science, S.51 - 55, 1980.
- [38] W.J. Minkowycz und E.M. Sparrow, „Condensation Heat Transfer in the Presence of Noncondensables, Interfacial Resistance, Superheating, Variable Properties, and Diffusion“, International Journal of Heat Mass Transfer, S. 1125 - 1144, 1966.

## IV Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1-1:	Rohrbündelkondensator (nach [4]).....	6
Abbildung 2-1:	links: Filmkondensation; rechts: Tropfenkondensation (nach [6]) .....	9
Abbildung 2-2:	Zur Ableitung der Keimbildungsarbeit (nach [8]).....	11
Abbildung 2-3:	Zusammenhang zwischen Unterkühlung, Keimradius und Kontaktwinkel (nach [8]).....	12
Abbildung 2-4:	Tropfenkondensation als zyklischer Prozess.....	13
Abbildung 2-5:	Wärmeleitung durch Rohrwand mit Beschichtung .....	15
Abbildung 2-6:	zur Berechnung der Wärmeleitung durch eine Rohrwand mit Beschichtung.....	16
Abbildung 2-7:	Einflussfaktoren auf den Wärmeübergang bei der Kondensation.....	18
Abbildung 2-8:	Benetzungsmodelle; links: Cassie-Baxter; rechts: Wenzel (nach [18]) .....	20
Abbildung 2-9:	Kontaktwinkelhysterese auf geneigten Oberflächen (nach [23]) .....	22
Abbildung 2-10:	Einfluss von nicht kondensierbaren Gasen auf die Kondensation (nach [27]).....	24
Abbildung 3-1:	Detaillierte Übersicht der durchgeführten Oberflächenmodifikationen sowie Charakterisierungsmethoden .....	26
Abbildung 3-2:	Testrohr.....	27
Abbildung 3-3:	Wärmestromdichte in Abhängigkeit der Schichtdicke.....	29
Abbildung 3-4:	Übersicht Set A.....	30
Abbildung 3-5:	Übersicht Set B.....	31
Abbildung 3-6:	Vorgehensweise zur Auswahl geeigneter 3D-Parameter.....	34
Abbildung 3-7:	Verdeutlichung des Str-Parameters anhand unterschiedlich bearbeiteter Oberflächen: a) gerichtete Oberfläche mit Längsrillen sowie geringem Str-Wert; b) ungerichtete Oberfläche mit hohem Str-Wert (nach [32]).....	34
Abbildung 3-8:	Kontaktwinkelmessung; links: XY-Tisch mit Dosiereinheit, rechts: Aufbringung eines Tropfens mit der Mikroliterspritze.....	36
Abbildung 3-9:	Abrollwinkelmessung .....	37
Abbildung 3-10:	Versuchsaufbau.....	38
Abbildung 3-11:	Visualisierung der auf die Messgrößen Kondensatmenge und Eingangs- bzw. Ausgangstemperatur bezogenen Parameter (Eingangsgrößen) .....	41
Abbildung 4-1:	3D-Projektionen (Set A) .....	46

---

Abbildung 4-2:	Oberflächenprofile (Set A) .....	47
Abbildung 4-3:	3D-Projektionen (Set B).....	49
Abbildung 4-4:	Oberflächenprofile (Set B) .....	50
Abbildung 4-5:	REM-Aufnahmen (Set A); links: ca. 2000-fache Vergrößerung; rechts: ca. 500-fache Vergrößerung.....	51
Abbildung 4-6:	REM-Aufnahmen (Set B); ca. 2000-fache Vergrößerung; rechts: ca. 500-fache Vergrößerung .....	53
Abbildung 4-7:	Abrollende Tropfen (Set A) .....	55
Abbildung 4-8:	Abrollende Tropfen (Set B).....	58
Abbildung 4-9:	Kondensationsleistung Set A: Kondensatmenge über die am Badthermostat eingestellte Kühlwassertemperatur.....	59
Abbildung 4-10:	Kondensation auf den verschiedenen Oberflächen von Set A (Aufnahmen mit Highspeed-Kamera).....	60
Abbildung 4-11:	Kondensationsleistung Set B: Kondensatmenge über die am Badthermostat eingestellte Kühlwassertemperatur.....	61
Abbildung 4-12:	Kondensation auf den verschiedenen Oberflächen von Set B (Aufnahmen mit Highspeed-Kamera).....	62
Abbildung 4-13:	Einfluss erhöhter Dampfungabe bei einer Heizbandtemperatur von 150°C.....	65
Abbildung 4-14:	Einfluss der Kondenserbeheizung ohne zusätzliche Dampfungabe .....	66
Abbildung A.6-1:	CAD-Zeichnung des Prüfkörpers .....	71
Abbildung A.6-2:	Zusammenbau Prüfkörper .....	72
Abbildung A.6-3:	Versuchsaufbau im Labor.....	73
Abbildung A.6-4:	Topografie für Planfläche der Probe Cu_1 (blanke Kupferoberfläche).....	74
Abbildung A.6-5:	Topografie für Planfläche der Probe Cu_2 (oxidierte Kupferoberfläche) .....	74
Abbildung A.6-6:	Topografie für Planfläche der Probe Cu_3 (oxidierte und vergoldete Oberfläche) .....	75
Abbildung A.6-7:	Topografie für Planfläche der Probe Cu_4 (hocheingebnete, vergoldete Oberfläche) .....	75
Abbildung A.6-8:	Topografie für Planfläche der Probe St_1 (blanke Stahloberfläche).....	76
Abbildung A.6-9:	Topografie für Planfläche der Probe St_2 (silanisierter Stahloberfläche) .....	76
Abbildung A.6-10:	Topografie für Planfläche der Probe St_3 (sandgestrahlte, silanisierter Stahloberfläche) .....	76
Abbildung A.6-11:	Topografie für Rundfläche der Probe Cu_1 (blanke Kupferoberfläche) .....	77

Abbildung A.6-12: Topografie für Rundfläche der Probe Cu_2 (oxidierte Kupferoberfläche).....	77
Abbildung A.6-13: Topografie für Rundfläche der Probe Cu_3 (oxidierte und vergoldete Oberfläche).....	78
Abbildung A.6-14: Topografie für Rundfläche der Probe Cu_4 (hocheingebnete, vergoldete Oberfläche) .....	78
Abbildung A.6-15: Topografie für Rundfläche der Probe St_1 (blanke Stahloberfläche) .....	79
Abbildung A.6-16: Topografie für Rundfläche der Probe St_2 (silanierte Stahloberfläche).....	79
Abbildung A.6-17: Topografie für Rundfläche der Probe St_3 (sandgestrahlte, silanierte Stahloberfläche) ...	79
Abbildung A.6-18: Einfluss erhöhter Dampfmenge bei einer Heizbandtemperierung von 115°C.....	92
Abbildung A.6-19: Einfluss der Heizbandtemperierung bei erhöhter Dampfzufuhr .....	92

---

Tabelle 3-1: Übersicht Set A: Kupferrohrsubstrate.....	30
Tabelle 3-2: Übersicht Set B: Stahlrohrsubstrate.....	31
Tabelle 3-3: Ausgewählte 3D-Parameter nach DIN EN ISO 25178 [31] .....	33
Tabelle 4-1: 3D-Oberflächenkenngrößen (Set A).....	45
Tabelle 4-2: 3D-Oberflächenkenngrößen (Set B).....	48
Tabelle 4-3: Benetzungseigenschaften (Set A).....	55
Tabelle 4-4: Benetzungseigenschaften (Set B).....	57
Tabelle A.6-1: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe Cu_1 (blanke Kupferoberfläche) .....	80
Tabelle A.6-2: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe Cu_2 (oxidierte Kupferoberfläche) ....	80
Tabelle A.6-3: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe Cu_3 (oxidierte und vergoldete Oberfläche).....	81
Tabelle A.6-4: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe Cu_4 (hocheingebnete, vergoldete Oberfläche).....	81
Tabelle A.6-5: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe St_1 (blanke Stahloberfläche) .....	82
Tabelle A.6-6: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe St_2 (silanierte Stahloberfläche) .....	82
Tabelle A.6-7: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe St_3 (sandgestrahlte, silanierte Stahloberfläche) .....	83
Tabelle A.6-8: Messdaten des statischen Kontaktwinkels für Probe St_4 (verchromte Oberfläche) .....	83
Tabelle A.6-9: Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe Cu_1 (blanke Kupferoberfläche) .....	84

---

Tabelle A.6-10:	Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe Cu_2 (oxidierte Kupferoberfläche).....	84
Tabelle A.6-11:	Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe Cu_3 (oxidierte und vergoldete Oberfläche).....	84
Tabelle A.6-12:	Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe Cu_4 (hocheingebnete, vergoldete Oberfläche).....	85
Tabelle A.6-13:	Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe St_1 (blanke Stahloberfläche) .....	86
Tabelle A.6-14:	Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe St_2 (silanisierte Stahloberfläche).....	86
Tabelle A.6-15:	Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe St_3 (sandgestrahlte, silanisierte Oberfläche) .....	86
Tabelle A.6-16:	Messdaten der Kontaktwinkelhysterese für Probe St_4 (verchromte Oberfläche).....	87
Tabelle A.6-17:	Messdaten des Abrollwinkels für Probe Cu_1 (blanke Kupferoberfläche) .....	88
Tabelle A.6-18:	Messdaten des Abrollwinkels für Probe Cu_2 (oxidierte Kupferoberfläche).....	88
Tabelle A.6-19:	Messdaten des Abrollwinkels für Probe Cu_3 (oxidierte und vergoldete Oberfläche) .....	88
Tabelle A.6-20:	Messdaten des Abrollwinkels für Probe Cu_1 (blanke Kupferoberfläche) .....	89
Tabelle A.6-21:	Messdaten des Abrollwinkels für Probe St_1 (blanke Stahloberfläche) .....	90
Tabelle A.6-22:	Messdaten des Abrollwinkels für Probe St_2 (silanisierte Stahloberfläche) .....	90
Tabelle A.6-23:	Messdaten des Abrollwinkels für Probe St_3 (sandgestrahlte, silanisierte Stahloberfläche) .....	90
Tabelle A.6-24:	Messdaten des Abrollwinkels für Probe St_4 (verchromte Oberfläche) .....	91