



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

# Bachelorarbeit

## Implementierung einer neuen Messmethodik am Sonnensimulatorprüfstand mit linearem Fokus der zweiten Generation

beim

**Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**

**Institut für Solarforschung**

**Abteilung: Qualifizierung**

Linder Höhe – 51147 Köln

**Jan Lütge**

Matrikel-Nr.: 2258152

betreut von:

**Dipl.-Ing. Christoph Happich, DLR**

**Prof. Heinzel, Universität Duisburg-Essen**



## Erklärung

Hiermit versichere ich durch meine Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen genommen sind, als solche kenntlich gemacht habe. Die Versicherung bezieht sich auch auf in der Arbeit gelieferte Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen und dergleichen.

Köln, 01. Februar 2016

---

Jan Lütge



## Danksagung

Hiermit möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung und Umsetzung meiner Bachelorarbeit unterstützt haben. Namentlich möchte ich kurz erwähnen...

- ...Prof. Heinzl, für die Übernahme des Referenten dieser Bachelorarbeit
- ...Christoph Happich und Johannes Pernpeintner, für die hervorragende Betreuung dieser Arbeit, das Korrekturlesen und die zahlreichen, interessanten Diskussionen,
- ...den Praktikanten und Laboranten Eva Heberle, Amin Boulassouak, Mirkan Yorulmaz und Sebastian Richter, für die tatkräftige Unterstützung bei der Umsetzung der Prüfstandserweiterungen und den Durchführungen der Messungen,
- ...allen Mitarbeitern der Solarforschung für die angenehme Arbeitsatmosphäre,
- ...meiner Familie, für die Ermöglichung meines Studiums



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>i</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>iii</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>vi</b>
<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>vii</b>
Lateinische Zeichen .....	vii
Griechische Zeichen.....	ix
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>2</b>
2.1 Sonnenstrahlung .....	2
2.2 Parabolrinnenkraftwerk .....	5
2.3 Parabolrinnenreceiver.....	6
<b>3 Stand der Technik.....</b>	<b>9</b>
3.1 Sonnensimulatorprüfstand.....	9
3.1.1 ElliRec.....	9
3.1.2 Nachfolgeprüfstand OptiRec.....	11
3.2 Receiverhalterung.....	15
3.3 Störkörper.....	18
3.4 Identifizierung des Verbesserungspotentials .....	19
<b>4 Implementierung einer neuen Messmethodik .....</b>	<b>20</b>
4.1 Erweiterung um eine zweite Messposition.....	21
4.1.1 Erweiterung des Wasserkreislaufs .....	21
4.1.2 Konstruktion der Receiverhalterung .....	24
4.1.2.1 Verfahreinheit .....	24
4.1.2.2 Dichtung .....	28
4.1.2.3 Ausrichtung.....	32
4.1.3 Anbindung der neuen Messtechnik an den Schaltschrank.....	35
4.2 Anpassungen der Prüfstandssoftware.....	37
4.3 Weiterentwicklung des Störkörpers .....	42
4.3.1 Anforderungen .....	42
4.3.2 Auslegung .....	43
4.3.3 Konstruktion.....	43

---

4.3.4	Charakterisierung des neuen Störkörpers .....	45
4.3.4.1	Ablauf der Charakterisierungsmessung .....	45
4.3.4.2	Auswertung und Ergebnisse .....	47
4.4	Charakterisierung der Prüfstandserweiterung .....	52
4.4.1	Reproduzierbarkeit einer absoluten Messung ohne Receiverwechsel .....	52
4.4.2	Reproduzierbarkeit mit Receiverwechsel .....	55
4.4.3	Reproduzierbarkeit einer relativen Messung ohne Receiverwechsel .....	58
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>63</b>
<b>ANHANG</b>	<b>.....</b>	<b>65</b>
	Anhang A: Fotos der Strahlenschilde aus Aluminium.....	65
	Anhang B: Foto der Verfahreinheit der neuen Receiverhalterung .....	66
	Anhang C: Zweiter Lösungsansatz zur Abdichtung zwischen Receiver und Halterung .....	67
	Anhang D: Übersicht einer Auswahl möglicher Profilquerschnitte .....	69
	Anhang E: Bildschirmfotos der überarbeiteten Prüfstandssoftware <i>OptiLive</i> .....	70
	Anhang F: Angebotsskizze eines Störkörpers als Förderschnecke.....	73
	Anhang G: Leistungsverlauf der relativen Leistungsmessung in MP A.....	73

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dämpfung der Sonnenstrahlung beim Weg durch die Atmosphäre [QUA13].....	2
Abbildung 2: Das Sonnenlicht beim Gang durch die Atmosphäre [QUA13].....	2
Abbildung 3: Geometrie des Parabolrinnenkollektors [QUA13] .....	3
Abbildung 4: Geometrie einer Ellipse [Pap09].....	4
Abbildung 5: Prinzip des Parabolrinnenkraftwerks mit parallelem Dampferzeuger [QUA13].....	5
Abbildung 6: Parabolrinnenreceiver [Sch09] .....	6
Abbildung 7: Optische und thermische Vorgänge im Absorberrohr [QUA13].....	7
Abbildung 8: Vereinfachte Skizze des <i>ElliRec</i> [BSc11].....	10
Abbildung 9: CAD-Modell des <i>OptiRec</i> [Hap12] .....	12
Abbildung 10: Fließschema des <i>OptiRec</i> - Stand 30.07.2015 .....	13
Abbildung 11: Receiverhalterung des <i>ElliRec</i> [Ant12] .....	15
Abbildung 12: Rohrverbindung der Receiverhalterung des <i>OptiRec</i> [Schm14].....	16
Abbildung 13: Aktuelle Version der Receiverhalterung des <i>OptiRec</i> [Schm14] .....	17
Abbildung 14: Fließschema des <i>OptiRec</i> mit zweiter Messposition .....	22
Abbildung 15: Seitenansicht der neuen Verfahrenseinheit der Receiverhalterung.....	25
Abbildung 16: Freischnitt der Gewindespindel .....	26
Abbildung 17: Gesamtverfahrweg der Receiverhalterung.....	28
Abbildung 18: Anordnungsskizze der aufblasbaren Gummidichtung.....	29
Abbildung 19: Aufblasbare Dichtung auf Receiverhalterung samt Pneumatikkomponenten.....	30
Abbildung 20: Pneumatikschaltbild.....	31
Abbildung 21: Fokustest im <i>OptiRec</i> durch Einbau eines Targets zwischen den Receiverhalterungen .....	32
Abbildung 22: Nahaufnahme des Targets bei horizontalem Fokustests.....	33
Abbildung 23: Ausrichtung der Eintrittsseite in Messposition A .....	34
Abbildung 24: Ausrichtung der Eintrittsseite in Messposition B .....	34
Abbildung 25: Ausrichtung der Austrittsseite in Messposition A .....	34
Abbildung 26: Ausrichtung der Austrittsseite in Messposition B .....	34
Abbildung 27: 230V Steuerstromkreis des <i>OptiRec</i> .....	35
Abbildung 28: Maßstabgetreue Skizze des Bestrahlungsbereiches der beiden Messpositionen .....	36
Abbildung 29: Ablaufschema der ursprünglichen Prüfstandssoftware.....	38

Abbildung 30: Systematische Unterteilung der Messabläufe .....	39
Abbildung 31: Ablaufschema der überarbeiteten Prüfstandssoftware.....	41
Abbildung 33: Inneres Ende einer Störkörperhälfte .....	44
Abbildung 32: Äußeres Ende einer Störkörperhälfte.....	44
Abbildung 34: Gesamtansicht eines weiterentwickelten Störkörpersteilstücks .....	44
Abbildung 35: Ablaufschema der Charakterisierungsmessung .....	46
Abbildung 36: Störkörper aus Polyethylen – 1. Temperatursprung von 22,8°C auf 23,4°C .....	48
Abbildung 37: Störkörper aus Polyethylen – 2. Temperatursprung von 23,4°C auf 22,9°C .....	48
Abbildung 38: Störkörper aus Polyethylen – 3. Temperatursprung von 23,9°C auf 22,4°C .....	49
Abbildung 39: Störkörper aus Edelstahl – 1. Temperatursprung von 22,9°C auf 23,4°C.....	50
Abbildung 40: Störkörper aus Edelstahl – 2. Temperatursprung von 23,4°C auf 22,9°C.....	50
Abbildung 41: Störkörper aus Edelstahl – 3. Temperatursprung von 22,9°C auf 22,4°C.....	51
Abbildung 42: Störkörper aus Edelstahl – 4. Temperatursprung von 22,4°C auf 22,9°C.....	51
Abbildung 43: Reproduzierbarkeit der absorbierten Leistung in Messposition B bei wiederholtem Verschieben des Receiverwagens ohne Receiverwechsel .....	53
Abbildung 44: Validierungsmessung - Messgenauigkeit der Messposition B während Receivertausch in Messposition A.....	54
Abbildung 45: Reproduzierbarkeit mit Receiverausbau zwischen den Messungen .....	55
Abbildung 46: Temperaturverlauf der einzelnen Temperaturmessfühler der Austrittsseite von Messposition A .....	56
Abbildung 47: Temperaturverlauf der einzelnen Temperaturmessfühler der Austrittsseite von Messposition B .....	56
Abbildung 48: Position der Kabeltemperaturfühler in der Receiverhalterung der Austrittsseite .....	57
Abbildung 49: Übersicht der relativen Leistungsmessungen .....	58
Abbildung 50: Aluminiumschild zum Schutz der Messtechnik in der Receiverhalterung.....	65
Abbildung 51: Hinteransicht eines Aluminiumschildes zum Schutz der Messtechnik der Receiverhalterung .....	65
Abbildung 52: Verfahrenheit der neuen Receiverhalterung .....	66
Abbildung 53: Vormontierte Spannvorrichtung - Einzelansicht .....	67
Abbildung 54: Vormontierte Spannvorrichtung .....	67
Abbildung 55: Skizze der Spannvorrichtung.....	68
Abbildung 56: Übersicht möglicher Profilquerschnitte einer aufblasbaren Gummidichtung .....	69
Abbildung 57: Übersicht einer Auswahl an Profilquerschnitten aufblasbarer Silikondichtungen .....	69

---

Abbildung 58: Ansicht der Messablaufssteuerung der überarbeiteten Prüfstandssteuerungssoftware <i>OptiLive</i> .....	70
Abbildung 59: Ansicht des neu implementierten Flussdiagramms zur besseren Übersicht der Prüfstandskomponenten in der Prüfstandssteuerungssoftware <i>OptiLive</i> .....	71
Abbildung 60: Ansicht der neu implementierten Lampenüberwachung in der Prüfstandssteuerung <i>OptiLive</i> .....	72
Abbildung 61: Angebotsskizze eines Herstellers – Störkörper als Variante einer Förderschnecke [Ste15] .....	73
Abbildung 62: Leistungsverlauf der relativen Leistungsmessung in Messposition A .....	73

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittlere Leistung bei wiederholter Messung ohne Receiverwechsel .....	53
Tabelle 2: Differenz der Leistungen des Prüflings zum Mittelwert der zuvor und im Anschluss durchgeführten Referenzmessungen .....	59
Tabelle 3: Differenz der beiden Referenzmessungen einer relativen Leistungsmessung.....	60

# Symbolverzeichnis

## Lateinische Zeichen

$a$	Große Halbachse einer Ellipse	m
$a$	Abstand der Krafteingriffspunkte	mm
$b$	Kleine Halbachse einer Ellipse	m
$c$	Spezifische Wärmekapazität	$\text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$
$D$	Durchmesser	m
$d_{\text{Kern}}$	Kerndurchmesser eines Trapezgewindes	mm
$E$	Elastizitätsmodul	$\text{N} / \text{mm}^2$
$E_0$	Solarkonstante	$\text{W} / \text{m}^2$
$E_G$	Globalstrahlung	$\text{W} / \text{m}^2$
$E_{\text{dir}}$	Anteil direkter Strahlung	$\text{W} / \text{m}^2$
$E_{\text{diff}}$	Anteil diffuser Strahlung	$\text{W} / \text{m}^2$
$e$	Lineare Exzentrizität einer Ellipse	m
$F_1, F_2$	Brennpunkte einer Ellipse	-
$F_1, F_2$	Krafteingriffspunkte	N
$f$	Brennweite	m
$f$	Durchbiegung	mm

$f_m$	Maximale Durchbiegung	mm
$G$	Rohrdurchmesser in Zoll	“
$I_b$	Flächenträgheitsmoment	m <sup>4</sup>
$L$	Länge	m
$l$	Länge der Gewindespindel	mm
$\dot{m}$	Massenstrom	kg / s
$Nu$	Nußelt - Zahl	-
$P$	Leistung	W
$\dot{Q}_K$	Konvektiver Wärmestrom	W
$\dot{Q}_S$	Strahlungsenergie	W
$r_s$	Sonnenradius	m
$r_{se}$	Abstand von Sonne zur Erde	m
$Re$	Reynolds – Zahl	-
$t$	Zeit	s, min
$T$	Temperatur	K, °C
$T_{in}$	Eintrittstemperatur	°C
$T_{out}$	Austrittstemperatur	°C
$\dot{V}$	Volumenstrom	m <sup>3</sup> / s

## Griechische Zeichen

$\alpha$	Absorbtiionsgrad	-
$\varepsilon$	Emissionsgrad	-
$\gamma$	Intercept – Faktor	-
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	W / (m·K)
$\nu$	Kinematische Viskosität	m <sup>2</sup> /s
$\eta$	dynamische Viskosität	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	Dichte	kg / m <sup>2</sup>
$\rho$	Reflexionsgrad	-
$\sigma$	Standardabweichung	-
$\tau$	Transmissionsgrad	-
$\varphi_{s/2}$	Halber Öffnungswinkel der Sonne	°



# 1 Einleitung

Angesichts des stetig steigenden Energiebedarfs werden die Reserven an fossilen Energieträgern, die 2009 noch einen Anteil von 88 Prozent des Weltenergiebedarfs abdeckten [Mar12] bis zum Ende dieses Jahrhunderts aufgebraucht sein. Auf dem Weg hin zu einer nachhaltigen, bezahlbaren und umweltfreundlichen Energieversorgung gilt die Kernfusion der Sonne als eine der wichtigsten erneuerbaren Primärenergiequellen. Die Sonne versorgt die Erde mit  $1,08 \times 10^{18}$  kWh pro Jahr. Das ist das 10.000-fache des weltweiten benötigten Energiebedarfs [Mar12]. Demnach würde theoretisch 1% der Fläche der Sahara ausreichen, um die ganze Welt mit Strom zu versorgen [Kni11]. Auf Kraftwerksebene gilt die Parabolrinne als die kommerziell am weitesten verbreitete Technologie der solarthermischen Energiegewinnung [QUA13]. Für die einzelnen Komponenten eines Parabolrinnenkraftwerks gibt es jedoch noch immer keinen genormten Qualitätsstandard. Aus diesem Grund wurde im Jahr 2008 das Test- und Qualifizierungszentrum für konzentrierende Solartechnik, kurz QUARZ, am Institut für Solarforschung beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln gegründet, dessen Zielsetzung die Qualifizierung solarthermischer Kraftwerkskomponenten durch die Entwicklung geeigneter Prüfmethode ist. Neben den Reflektoren stellen vor allem die Receiver, welche die Sonnenstrahlung absorbieren und in thermische Energie umwandeln, eine Schlüsselkomponente dar. Zur Bewertung der optischen Eigenschaften wurde 2009 der Sonnensimulatorprüfstand *ElliRec* entwickelt, der die absorbierte Leistung eines Prüflings relativ zu einem Referenzreceiver misst. Da die Unterschiede der optischen Eigenschaften von Receivern immer geringer werden, steigen die Anforderungen an die verwendete Messmethodik. Aus diesem Grund wurde bereits der Nachfolgeprüfstand *OptiRec* entwickelt, bei dem das Verbesserungspotential, das sich aus den Erfahrungen durch die Messungen im *ElliRec* ergab, angewandt wurde.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll nun die Inbetriebnahme des Sonnensimulatorprüfstandes *OptiRec* zur Bestimmung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern durch die Implementierung einer neuen Messmethodik weiter vorangetrieben werden. Wesentliches Verbesserungspotential des bestehenden Prüfstandsbaus soll dabei genutzt werden. Hauptaugenmerk wird auf eine Reduzierung des zeitlichen Aufwandes einer Receivermessung gelegt. Durch die Konstruktion einer zweiten Messposition soll daher zukünftig ein kontinuierlicher Messbetrieb bei durchgängig eingeschalteten Lampen möglich sein. Weitere Optimierungsmaßnahmen sollen außerdem die Arbeitssicherheit sowie den Bedienkomfort des *OptiRec* erhöhen.

## 2 Grundlagen

Im Folgenden werden die technischen und physikalischen Grundlagen eines Parabolrinnenkraftwerks und deren einzelner Komponenten erläutert. Zur Veranschaulichung der Grundlagen wurde überwiegend auf die Grafiken von Volker Quaschnig zurückgegriffen. Des Weiteren werden einige wichtige Formeln erörtert, die zur Berechnung und Auslegung der Prüfstandserweiterung benötigt werden sowie zum besseren Verständnis dieser Arbeit beitragen.

### 2.1 Sonnenstrahlung

Bei der Kernfusion der Sonne wird elektromagnetische Strahlung emittiert, deren Spektrum in etwa der Strahlung eines Schwarzen Körpers bei ca. 5800 °C entspricht [CJu11]. Unmittelbar außerhalb unserer Atmosphäre ergibt sich so eine mittlere Bestrahlungsstärke von  $1367 \text{ W/m}^2$ , welche auch als Solarkonstante  $E_0$  bezeichnet wird. Durch Verluste beim Durchdringen der Erdatmosphäre, vorwiegend durch Absorption, Reflexion und Streuung, fällt die letztlich an der Erdoberfläche ankommende, terrestrische Strahlungsstärke deutlich geringer aus. Die Bestrahlungsstärke ist außerdem abhängig vom Einfallswinkel der Sonnenstrahlen. Bei schrägerem Strahlungseinfall wird eine längere Strecke durch die Atmosphäre zurückgelegt und außerdem eine größere Fläche der Erdoberfläche angestrahlt, wodurch sich eine geringere Bestrahlungsstärke ergibt als bei senkrechtem Einfall. Der Gang des Sonnenlichts durch die Erdatmosphäre ist in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt.

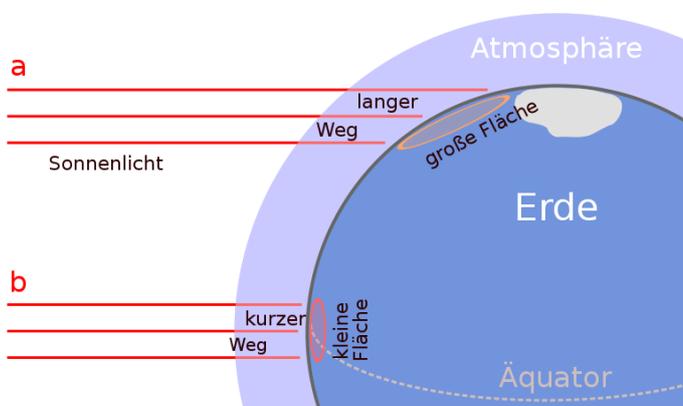


Abbildung 1: Dämpfung der Sonnenstrahlung beim Weg durch die Atmosphäre [QUA13]

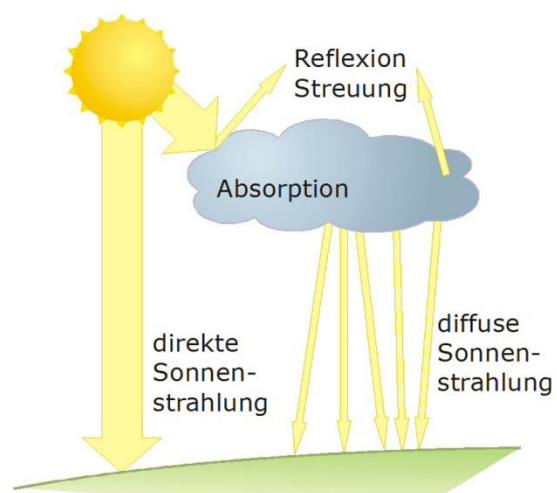


Abbildung 2: Das Sonnenlicht beim Gang durch die Atmosphäre [QUA13]

Die Globalstrahlung  $E_G$  ergibt sich aus einem Anteil direkter Strahlung  $E_{dir}$  und einem Anteil diffuser Strahlung  $E_{diff}$ , der erst in der Atmosphäre zerstreut bzw. reflektiert wird und dann zur Erde gelangt. Bei der konzentrierenden Solarthermie kann jedoch nur die direkte Strahlung genutzt werden, da der diffuse Anteil nicht vom Spiegel in den Brennpunkt reflektiert wird. Selbiges gilt für die Strahlen der Sonne, die nicht perfekt parallel auf die Erde treffen. Der halbe Öffnungswinkel, mit der das Licht auf die Erde einfällt, kann anhand des Sonnenradius  $r_s$  und dem Abstand von Sonne zu Erde  $r_{se}$  berechnet werden und besitzt den Wert  $\varphi_s/2 = 0,27^\circ$ .

Um das Wärmeträgerfluid in einem solarthermischen Kraftwerk auf Prozesstemperaturen von über  $200^\circ\text{C}$  zu erhitzen, die einen wirtschaftlichen Wirkungsgrad überhaupt erst ermöglichen, ist es notwendig das Sonnenlicht zu konzentrieren. Die parabelförmigen Spiegel in Parabolrinnenkraftwerken werden durch die Gleichung 2.1 beschrieben.

$$Y = \frac{x^2}{4 \cdot f} \tag{2.1}$$

Hierbei werden alle parallel zur optischen Achse  $y$  einfallenden Strahlen durch einmalige Reflexion in einem Brennpunkt, oder wenn die Parabel in  $z$ -Richtung ausgetragen eine Rinne ergibt, in einer Brennlinie, auch Fokallinie genannt, gebündelt. Die hier mit  $f$  bezeichnete Brennweite ist der Abstand vom Scheitelpunkt der Parabel bis zum Fokuspunkt [QUA13].

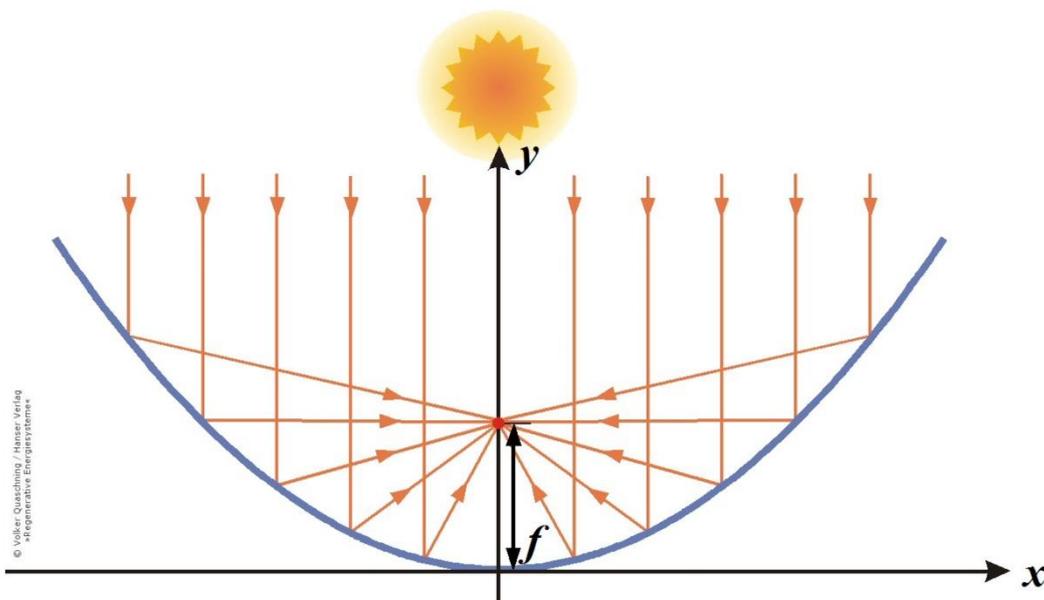


Abbildung 3: Geometrie des Parabolrinnenkollektors [QUA13]

Eine Ellipse besitzt zwei symmetrisch angeordnete Brennpunkte. Diese liegen beide auf der großen Halbachse  $a$  und werden, wie in Abbildung 2 zu erkennen, durch  $F_1$  und  $F_2$  abgekürzt. Orthogonal dazu verläuft die kleine Halbachse  $b$ . Diese Geometrie ermöglicht es, Licht aus Punktquellen zu konzentrieren. Das Licht einer Lampe im einen Brennpunkt wird also nahezu vollständig im zweiten Brennpunkt gebündelt, wenn die Ellipse als Reflektor ausgelegt ist. Diese Eigenschaft wird im Sonnenlichtsimulationsprüfstand genutzt, auf den im folgenden Kapitel noch näher eingegangen wird.

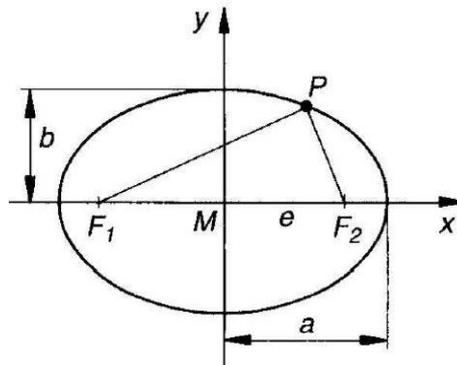


Abbildung 4: Geometrie einer Ellipse [Pap09]

Die Mittelpunktsgleichung einer Ellipse ist gegeben durch:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2.2)$$

Der Abstand zwischen Brennpunkt und Mittelpunkt ist definiert als die lineare Exzentrizität  $e$  und kann durch

$$e = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (2.3)$$

beschrieben werden.

## 2.2 Parabolrinnenkraftwerk

Parabolrinnenkraftwerke verdanken ihren Namen den parabelförmigen Spiegeln, die wie in Abbildung 5 zu sehen in mehreren Reihen nebeneinander angeordnet sind. Sie sind auf einachsigen drehbaren Unterkonstruktionen gelagert, wodurch sie sich dem Lauf der Sonne nachführen lassen um eine größere Strahlenintensität zu erhalten und damit einen höheren Wirkungsgrad zu erzielen. Durch die Parabelform werden alle parallel einfallenden Sonnenstrahlen in einer Fokallinie gebündelt. Durch diese Fokallinien verlaufen aneinandergefügte Parabolrinnenreceiver, auch Absorberrohre genannt.

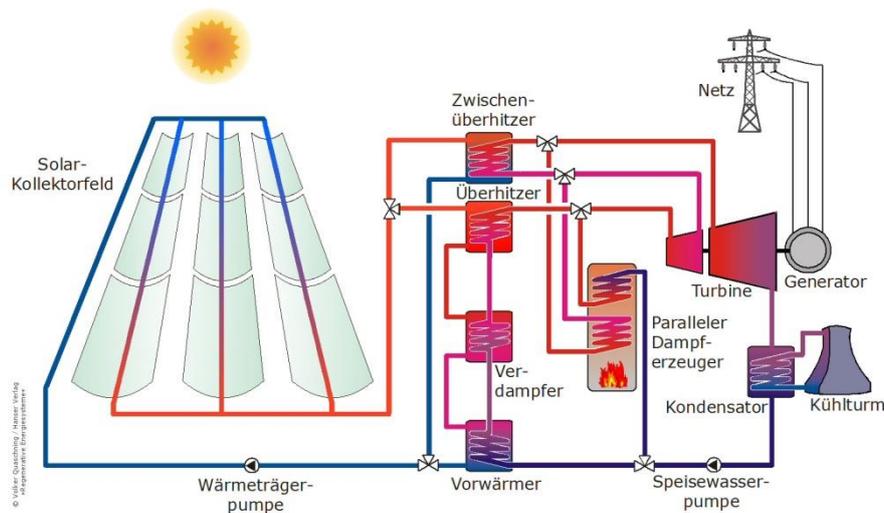


Abbildung 5: Prinzip des Parabolrinnenkraftwerks mit parallelem Dampferzeuger [QUA13]

Leitet man nun ein Wärmeträgerfluid, meistens ein Thermoöl, durch die Parabolrinnenreceiver, heizt sich dieses immer weiter auf bis es am Ende der Leitung schließlich Temperaturen von über  $500^{\circ}\text{C}$  erreichen kann. Mit Hilfe von Wärmetauschern wird die thermische Energie dann auf einen konventionellen Dampfturbinenprozess übertragen um Strom zu erzeugen.

Im Vergleich zu Photovoltaikanlagen, bei denen aus Sonnenlicht direkt Strom erzeugt wird, lässt sich die im Parabolrinnenkraftwerk erzeugte Wärme leichter speichern. Dies geschieht beispielsweise durch die Übertragung der Wärme auf ein flüssiges Nitratsalz, wodurch sich auch nachts oder bei bewölktem Himmel Strom erzeugen lässt.

## 2.3 Parabolrinnenreceiver

Eine wesentliche Komponente des Parabolrinnenkraftwerks sind die Parabolrinnenreceiver, die in der Fokallinie positioniert sind und die konzentrierte Solarstrahlung absorbieren. In Abbildung 6 ist ein solcher Parabolrinnenreceiver dargestellt.



Abbildung 6: Parabolrinnenreceiver [Sch09]

Üblicher Weise besteht ein solcher Receiver aus einem 4060 mm langen Edelstahlrohr mit einem Durchmesser von 70 mm, welches von einem Glasrohr umhüllt ist. Der Raum zwischen Absorberrohr und Glashüllrohr ist evakuiert um konvektive, thermische Verluste zu verringern. Da bei der Überhitzung von Thermoöl Wasserstoff entstehen kann, der dann durch das Absorberrohr diffundieren würde, ist im evakuierten Ringspalt des Receivers ein sogenannter Getter angebracht. Dieser bindet den Wasserstoff und hält somit das Vakuum aufrecht, wodurch die Wärmeverluste gering gehalten werden. Zur Kontrolle ist zusätzlich ein Silberindikator auf der Innenseite des Glasrohres angebracht, der sich beim Kontakt mit Sauerstoff verfärbt und damit den Verlust des Vakuums signalisiert. Am Übergang von Glas und Metall wird die unterschiedliche thermisch induzierte Ausdehnung beider Materialien durch Faltenbälge kompensiert, um einen Bruch durch Spannungsrisse im Glashüllrohrs zu verhindern.

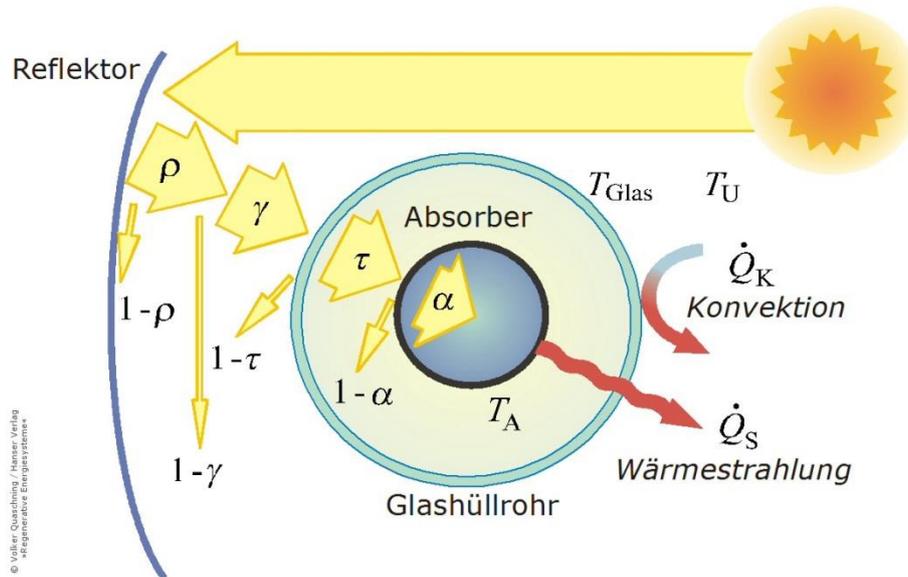


Abbildung 7: Optische und thermische Vorgänge im Absorberrohr [QUA13]

In Abbildung 7 sind die optischen und thermischen Verluste eines Parabolrinnenkollektors grafisch veranschaulicht. Die konzentrierte Strahlung wird bereits durch optische Verluste bei der Reflexion an den Spiegeln verringert, da diese einen Reflexionsgrad von  $\rho < 1$  besitzen. Alle geometrisch bedingten Verluste an Reflektor und Receiver werden zum sogenannten Intercept-Faktor  $\gamma$  zusammengefasst. Die auf das Wärmeträgerfluid übertragene Strahlungsenergie wird außerdem am Glashüllrohr durch Transmission  $\tau$  und am Absorberrohr durch Absorption  $\alpha$  verringert. Zusätzlich zu den optischen Verlusten treten thermische Verluste in Form von Konvektion  $\dot{Q}_K$  am Glashüllrohr  $\dot{Q}_S$  und Wärmestrahlung  $\dot{Q}_K$  am Absorber auf.

Um diese Verluste möglichst gering zu halten, wurde eine Reihe von Optimierungen vorgenommen. So ist beispielsweise das Glashüllrohr mit einer Antireflexbeschichtung überzogen. Sie sorgt dafür, dass sich der Transmissionsgrad im Bereich des Sonnenlichtspektrums von 92 % auf bis zu 96 % erhöht [Wei11].

Der Absorber hingegen ist mit einer selektiven Beschichtung versehen. Diese weist einen hohen Absorptionsgrad bei Wellenlängen im Bereich der Solarstrahlung auf. Aufgrund seiner Betriebstemperatur liegt das Strahlungsmaximum des Receivers im längerwelligen Infrarotbereich, für den die Schicht einen niedrigen Absorptions- bzw. Emissionsgrad besitzt um Wärmeverluste zu vermeiden. Aktuelle Parabolrinnenreceiver erreichen einen Absorptionsgrad  $\alpha$  von 95,5 % und einen Emissionsgrad  $\varepsilon$  von unter 9,5 % bei einer Temperatur von 400 °C [Ben11].

Der gesamte optische Wirkungsgrad eines Parabolrinnenreceivers ist in Gleichung 2.4 [Lüp04] gegeben.

$$\eta_{opt,rec} = \tau_{rec} \cdot \alpha_{rec} \cdot \chi_{rec} \cdot \kappa_{\tau_{arec}}(\theta) \cdot \kappa_{\chi_{rec}}(\theta) \quad (2.4)$$

Hierbei sind  $\tau_{rec}$  der solare Transmissionsgrad des Glashüllrohrs,  $\alpha_{rec}$  der solare Absorptionsgrad des Absorberrohres,  $\chi_{rec}$  ein Sauberkeitsfaktor, der den Grad der Verschmutzung des Glashüllrohres angibt, und  $\kappa$  der sogenannte incidence angle modifier, kurz IAM Faktor. Dieser gibt die Verluste nicht senkrechter Einstrahlung wieder und ist unterteilt in den Faktor  $\kappa_{\tau_{arec}}$ , der sowohl die einstrahlungsrichtungsabhängige Absorption des Absorberrohres als auch die Transmission des Glashüllrohres miteinbezieht und den Faktor  $\kappa_{\chi_{rec}}$ , der für die ebenfalls einstrahlungsrichtungsabhängigen Verluste durch Verschmutzung des Glashüllrohres steht.

## 3 Stand der Technik

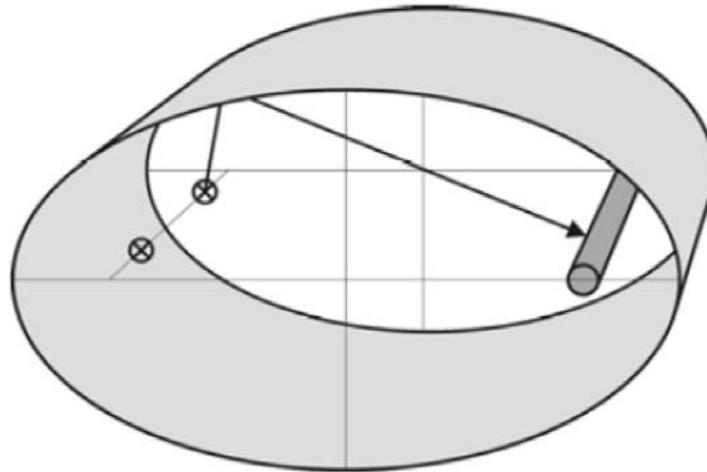
### 3.1 Sonnensimulatorprüfstand

#### 3.1.1 ElliRec

Zur Bewertung der optischen Eigenschaften von Parabolrinnenreceivern, wurde 2008 im QUARZ-Zentrum des DLR der Sonnensimulatorprüfstand *ElliRec* entwickelt. Im Rahmen einer Diplomarbeit erarbeitete Ansgar Macke [Mac08] das Konzept für den Prüfstand, dessen Zielsetzung es war, die optischen Verluste zerstörungsfrei, witterungsunabhängig und reproduzierbar bestimmen zu können.

Die Funktionsweise des *ElliRec* lässt sich wie folgt zusammenfassen. Ein Parabolrinnenreceiver wird mit Wasser durchströmt und dabei von sonnenlichtsimulierenden Lampen bestrahlt. Die Wassertemperatur am Ein- und Austritt des Receivers wird gemessen und anhand der Temperaturdifferenz sowie des eingebrachten Massenstroms lässt sich die absorbierte Leistung berechnen. Da das Leitungswasser, welches den Receiver durchströmt, nahezu Umgebungstemperatur besitzt können thermische Verluste vernachlässigt werden. Die Wärmeübertragung auf das Fluid ist jedoch zusätzlich zu den Absorbereigenschaften noch von einigen anderen Faktoren wie der Lampenleistung oder den Reflektoreigenschaften abhängig, die sich mit der Zeit verändern können. Um dennoch reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, wird der optische Wirkungsgrad nicht absolut bestimmt, sondern in Relation zu einem Referenzreceiver angegeben. Dieser Referenzreceiver wird zu Beginn eines Messtages und im Anschluss an die letzte Messung eines Prüflings gemessen. Weichen hierbei die errechneten Leistungen der Referenzmessungen zu stark voneinander ab, ist das ein Indiz für inhomogene Umgebungsbedingungen und die an diesem Tag durchgeführten Messungen müssen verworfen werden. Auf diese Weise lässt sich eine hohe Wiederholgenauigkeit mit einer Standardabweichung von 0,23 % bei  $1 \sigma$  erreichen [Ant12]. Dies entspricht bei einer durchschnittlichen Leistung von etwa 6500 W einer Standardabweichung von nur 15 W.

Der *ElliRec* verdankt seinen Namen der elliptischen Bauform, wie sie in Abbildung 8 dargestellt ist. Hierbei wird von der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Eigenschaft der Ellipse, zwei Brennpunkte bzw. räumlich ausgetragene zwei Brennlinien zu besitzen, Gebrauch gemacht. Diese ermöglicht den in der linken Fokallinie befindlichen Lampen ein Maximum der von ihnen emittierten



**Abbildung 8: Vereinfachte Skizze des *ElliRec* [BSc11]**

Strahlungsenergie an den in der rechten Fokallinie befestigten Receiver zu übertragen. Die formgebende Spantenkonstruktion ist dazu vollständig mit hochreflektierenden Aluminiumspiegeln verkleidet. Zusätzlich sorgt die Verspiegelung der flachen Enden dafür, dass eine Längshomogenität der Einstrahlung auf den Receiver erzielt wird [Hap12].

Als Leuchtmittel dienen vier Halogenmetallampfen mit jeweils 4 kW elektrischer Anschlussleistung, die äquidistant angeordnet sind, um eine einheitliche Strahlungsverteilung zu gewährleisten. Die Lampen besitzen ein sonnenlichtähnliches Spektrum, welches sie zeitlich konstant abstrahlen können. Eine genauere Beschreibung der Auswahlkriterien und eine Veranschaulichung des Spektrums ist in der Arbeit von Macke [Mac08] zu finden.

Vor dem Einbau eines Prüflings wird ein Verdrängungskörper, im Folgenden als Störkörper bezeichnet, in den Receiver eingesetzt. Dieser soll einer Durchbiegung des Absorberrohres aufgrund von Temperaturschichtungen entgegenwirken und gleichzeitig den abführbaren Wärmestrom erhöhen. An die Enden wird je eine Halterung mit einer Gummidichtung verschraubt, mit denen der Receiver an den Wasserkreislauf angebunden und in der Fokallinie positioniert wird. Da die Weiterentwicklung des Störkörpers sowie der Receiverhalterung Teil dieser Bachelorarbeit sind, wird ihre Funktionsweise in den folgenden Abschnitten 3.2 und 3.3 noch genauer erläutert.

Mit einer Kreiselpumpe wird Leitungswasser mit einem Volumenstrom von 850 l/h bei einem Druck von etwa 3 bar durch den Receiver gepumpt. Optimiert wurden diese Prozessparameter um eine turbulente Strömung zu generieren und dadurch den Wärmeübergang zu verbessern [Min10]. Nach dem Durchströmen des Leitungssystems wird das erwärmte Wasser schließlich dem Ausguss zugeführt. Ein ressourcenschonender Wasserkreislauf wurde erst beim Nachfolgeprüfstand *OptiRec* realisiert.

### 3.1.2 Nachfolgeprüfstand *OptiRec*

Durch die Erfahrungen aus dem Betrieb mit dem *ElliRec* ergaben sich viele Verbesserungsmöglichkeiten. Einige, wie die Überwachung der Lampenleistung durch ein Pyranometer, konnten direkt umgesetzt werden. Bei anderen Verbesserungsideen war jedoch der Aufwand für eine Aufrüstung zu groß, sodass man sich 2011 im QUARZ zum Bau eines Nachfolgeprüfstands entschloss.

Hauptbeweggründe für die Entwicklung und Konstruktion einer neuen Generation von Sonnensimulatorprüfstand zur Bewertung der optischen Eigenschaften von Parabolrinnenreceivern waren folgende:

1. Form- sowie alterungsbeständigere Spiegelflächen statt aus Aluminium aus echtem Glas
2. Geringere Messunsicherheit, höhere Reproduzierbarkeit
3. Erhöhung des Bedienkomforts und der Arbeitssicherheit
4. Wasserkreislauf statt Betrieb mit Leitungswasser
5. Receiveraustausch ohne Lampenabschaltung

Da sich das Messverfahren zur Ermittlung der absorbierten Leistung im Allgemeinen bewährt hat, soll es auch weiterhin im *OptiRec* angewandt werden. Das erste Konzept zur konstruktiven Gestaltung des *OptiRec* entwickelte Jan Weinhausen [Wei11] im Rahmen einer Diplomarbeit. Aufgrund zu hoher Kosten wurde es jedoch nicht umgesetzt. Christoph Happich [Hap12] erstellte daraufhin, aufbauend auf Weinhausens Auslegung der optischen Komponenten, ein Konzept, welches kostengünstiger und zudem platzsparender realisiert werden konnte. Für die Tragestruktur wurde, wie bereits beim *ElliRec*, auf das Profilsystem der Firma Maschinenbau Kitz (MK) zurückgegriffen. Dieses bietet den Vorteil, die verschiedenen Komponenten passgenau durch genormte Verbindungstücke verschrauben zu können und im Vergleich zu einer Schweißkonstruktion auch wieder zu lösen, was spätere Anpassungen sowie Erweiterungen enorm erleichtert.

In Abbildung 9 ist der Aufbau des *OptiRec* schematisch dargestellt. Wie zu erkennen ist, liegen die Fokallinien nun übereinander statt wie bisher im *ElliRec* nebeneinander. Die Ellipse ist außerdem nicht mehr geschlossen, sondern nach unten hin offen. Dies ermöglicht es, einen Receiver aus dem Bestrahlungsbereich zu ziehen, sodass die Lampen weiter betrieben werden können.



Abbildung 9: CAD-Modell des *OptiRec* [Hap12]

Die Verfahrenseinheit für den Wechsel eines Receivers, im Folgenden als Receiverwagen bezeichnet, wurde bei der Planung des *OptiRec* bereits für die Aufrüstung einer zweiten Messposition ausgelegt. Dass die geöffnete Seite der Ellipsenkonstruktion nach unten zeigt bietet außerdem den Vorteil, dass sich kein Staub auf den Spiegelflächen ansammeln kann. Diese Geometrie führt jedoch auch dazu, dass der Receiver hauptsächlich von oben bestrahlt wird, was eine Temperaturschichtung des Wassers im Receiver zusätzlich begünstigt. Dies hat zur Folge, dass sich das bestrahlte Receiverrohr oben stärker ausdehnt als unten und daraus eine Durchbiegung des Receivers entsteht. Dies kann jedoch durch die Verwendung eines Störkörpers, dessen Funktion in Abschnitt 3.3 noch genauer beschrieben wird, in Kombination mit einer Anpassung des Volumenstroms sowie der Durchbiegung aufgrund des Eigengewichts kompensiert werden.

Statt wie zuvor 4 Lampen mit einer Leistung von je 4 kW werden im *OptiRec* nun 6 Lampen mit je 2,5 kW verwendet. Das Spektrum der HMI-Lampen der Firma Koto ist dem der zuvor im *ElliRec* eingesetzten Lampen sehr ähnlich. Die Überwachung der gleichmäßigen Bestrahlungsstärke erfolgt nun nicht mehr über ein Pyranometer, sondern über sechs Photodioden, die jeweils oberhalb einer Lampe angebracht sind und auch kleine Strahlungsschwankungen registrieren können.

Da das im *ElliRec* verwendete Prinzip Leitungswasser durch den Receiver zu pumpen und anschließend dem Abfluss zuzuführen auf Dauer einen ziemlich hohen Wasserverbrauch und damit eine relativ hohe Umweltbelastung darstellt, wurde für den *OptiRec* ein in sich geschlossener Wasserkreislauf realisiert. Hierfür wurde ein Kaltwassersatz der Firma NationalLab angeschafft, der das Wasser durch das Leitungssystem pumpt und den erwärmten Rückfluss anschließend wieder auf die Ausgangstemperatur runterkühlt. Das aktuelle Fließschema des *OptiRec* ist in Abbildung 10 dargestellt.

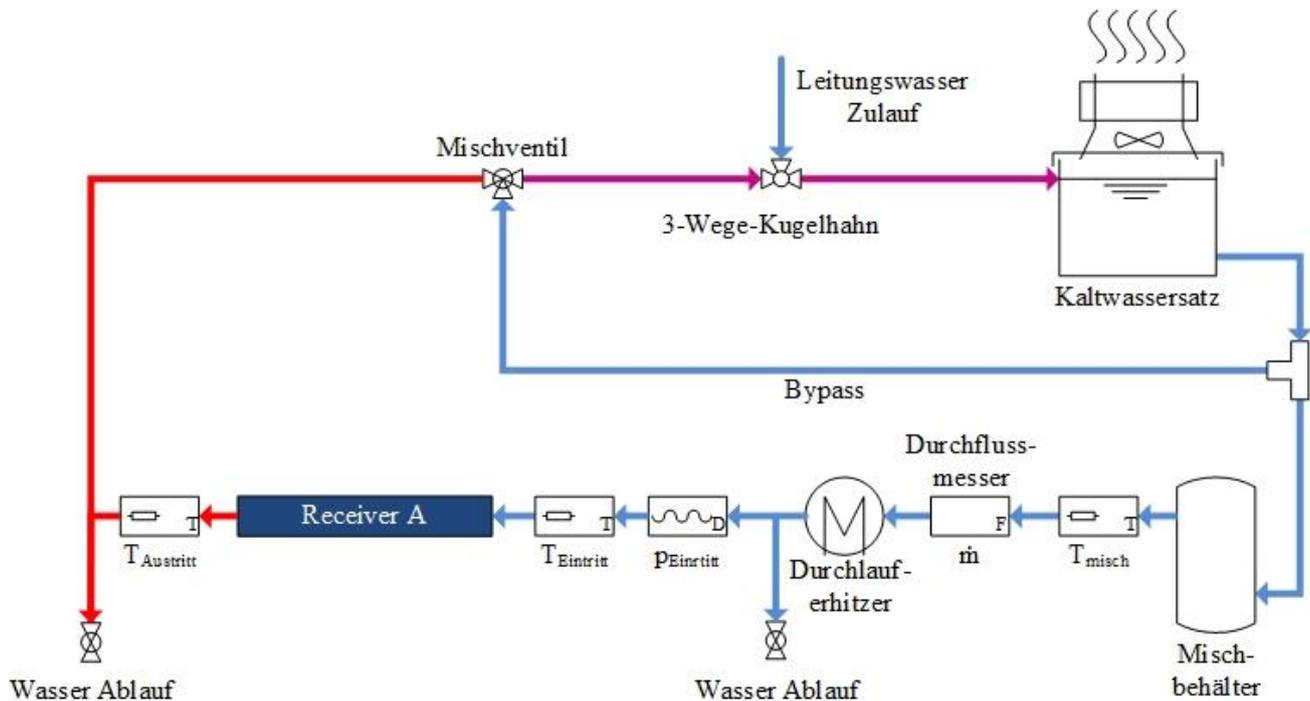


Abbildung 10: Fließschema des *OptiRec* - Stand 30.07.2015

Im Kaltwassersatz wird das Wasser auf eine konstante Temperatur herabgekühlt und von dort aus durch den Wasserkreislauf gepumpt. Da die Temperatur des Wassers danach jedoch noch sehr starke Schwankungen aufweist, ist ein Mischbehälter nachgeschaltet, in dem das Wasser durchmischt wird und so eine homogene Temperatur annehmen soll, da für eine genaue Messung der absorbierten Leistung stationäre Bedingungen erforderlich sind. Um auch kleinste Temperaturschwankungen zu eliminieren, wird die Temperatur hinter dem Mischbehälter noch von einem Strömungserhitzer geregelt. Auf diese Weise kann die Eintrittstemperatur am Receiver nun auf  $\pm 0,05$  K genau eingestellt werden.

Durch einen Bypass, der über ein elektrisch ansteuerbares 3/2-Wege Ventil mit dem Rückfluss verbunden ist, lässt sich der Massenstrom einstellen, der durch den Receiver strömt. Die Genauigkeit der Durchflussmessung im Vergleich zum *ElliRec* wurde durch den Einbau eines Coriolissensors um den Faktor 4 gesteigert [Hap12].

Vor dem Eintritt in den Receiver, sowie am Austritt, wird das Wasser von je drei hochgenauen Pt100 Widerstandstemperatur-Sensoren erfasst und daraus das arithmetische Mittel  $T_{in}$  bzw.  $T_{out}$  gebildet. Der Temperaturhub der Messstrecke, also die Temperaturdifferenz zwischen  $T_{out}$  und  $T_{in}$  beträgt bei aktueller Konfiguration und einem Receiver mit 70 mm Außendurchmesser etwa 4 - 5 K. Zusätzlich wird die Temperatur am Mischbehälteraustritt, der Druck im Leitungssystem, die Ventilstellung sowie die Photodiodenströme von einem Datenlogger erfasst.

Alle aufgenommenen Messwerte werden sekundlich an den Messrechner übertragen. Mit Hilfe einer eigens für den Prüfstand in *LabView* entwickelten Prüfstandssteuerungssoftware, können die Daten in Echtzeit überwacht und schließlich in einer Rohdatei abgespeichert werden. Die Auswertung der Daten sowie die Erstellung eines Prüfberichts für die Kunden einer Industriemessung erfolgt anschließend in Excel.

Um die Arbeitssicherheit zu gewährleisten, wurde ein Strahlenschutz in Form eines lichtundurchlässigen, hitzebeständigen Vorhangs angebracht. Aufgrund der Anforderung, dass der Receivertausch bei eingeschalteten Lampen erfolgen soll, ist dieser zwingend notwendig.

Eine zweite Messposition, in der ein weiterer Receiver als Referenz gemessen werden kann, während der Prüfling ausgetauscht wird, war zwar schon zu Beginn der Planung vorgesehen, bisher aber noch nicht realisiert worden. Die Konstruktion einer weiterentwickelten Receiverhalterung sowie deren Anbindung an den Wasserkreislauf, dessen automatische Regelung und die Anpassung der übrigen Prüfstandskomponenten an die neue Messmethodik, werden Teil dieser Bachelorarbeit sein. Im Folgenden wird die bisher vorhandene Messposition als „Messposition A“, die Neue dementsprechend als „Messposition B“ bezeichnet. Des Weiteren wird mit „Eintrittsseite“ die Seite des Receivers, in welche das Wasser einströmt, bezeichnet, sowie die gegenüberliegende Seite analog dazu als „Austrittsseite“.

### 3.2 Receiverhalterung

Durch die Receiverhalterung wird das Absorberrohr an den Wasserkreislauf angeschlossen. Sie muss daher die Enden dicht verschließen und gleichzeitig lösbar sein, um einen Austausch des Receivers zu ermöglichen. Zusätzlich sorgt sie für die korrekte Positionierung und Lagerung des Receivers in der Fokallinie.

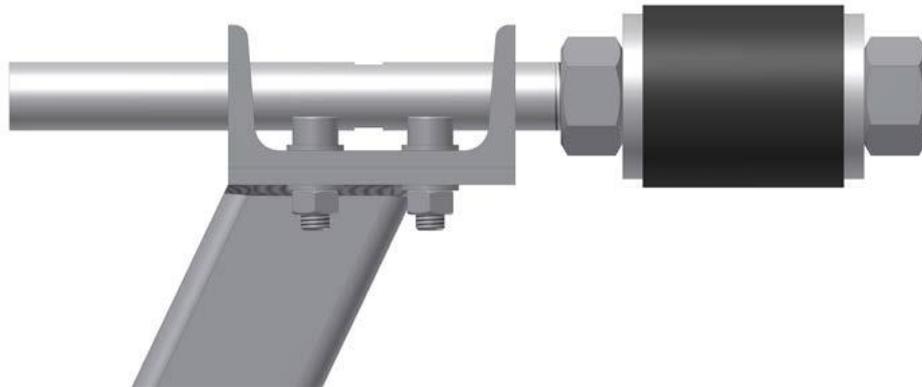


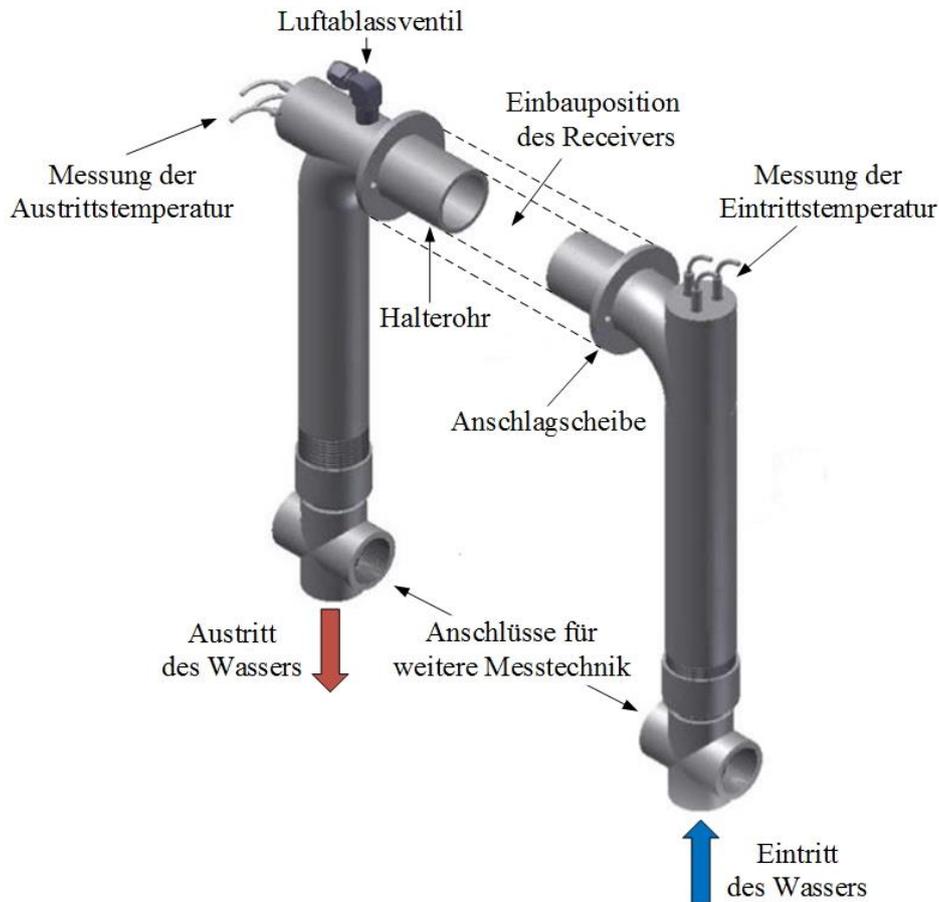
Abbildung 11: Receiverhalterung des *ElliRec* [Ant12]

In einem Kraftwerk werden die Absorberrohre direkt aneinander geschweißt, weshalb es keine verwendbaren Lösungskonzepte aus der Industrie gibt.

In Abbildung 11 ist die Receiverhalterung des *ElliRec* dargestellt. Hierbei wird ein auf einem Edelstahlrohr befindliches Dichtgummi durch das Festziehen der äußeren Muttern gepresst, sodass sich das Gummi radial ausdehnt und dichtend am Absorberrohr anliegt. Dafür muss zuvor jedoch der komplette Receiver aus dem Prüfstand getragen werden, was einen großen Kraft- und Zeitaufwand zur Folge hat. Außerdem ist das metrische Gewinde in der hohlen Edelstahlwelle sehr verschleißanfällig.

Daher wurde für den *OptiRec* eine komplett neue Halterung konzipiert. Ihr Konzept beruht darauf, dass eine fest verschweißte Rohrverbindung, auf zwei Gleitschienen verschiebbar, auf einem MK-Profil gelagert in das Absorberrohr verfahren werden kann. In Abbildung 12 ist ein CAD-Modell der Rohrverbindungen dargestellt. Die beiden Rohrverbindungen sind symmetrisch konstruiert. Lediglich das gebogene T-Stück, in dem die Temperaturmessungen stattfinden, ist an der Austrittsseite um 90° gedreht angeschweißt. Das liegt daran, dass die Temperaturmessfühler entgegen der Strömungsrichtung ausgerichtet sein müssen, um einen besseren Wärmekontakt zu erzeugen. An der Austrittsseite kann außerdem das Leitungssystem entlüftet werden. Dies ist notwendig, da eine Luftblase im Bereich der Temperaturfühler die eigentlich zu messende Erwärmung des Wassers verfälschen würde. Über ein Kreuzstück wird ein Absolutdruckmessgerät an der Eintritts- sowie ein Druckschalter an der Austrittsseite angeschlossen. Zusätzlich kann an

dieser Stelle vor dem Umbau das restliche, sich noch im Receiver befindliche Wasser abgelassen werden.



**Abbildung 12: Rohrverbindung der Receiverhalterung des *OptiRec* [Schm14]**

Die Gesamtansicht der aktuellen Receiverhalterung ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Abdichtung zwischen Rohrverbindung und Receiver erfolgt weiterhin über die Verstauchung eines Gummiringes. Jedoch sorgt nun ein Schnellspanner, der über zwei Zugstangen mit einem, hinter der Dichtung befindlichem, Edelstahlring verbunden ist, für die nötige Pressung. Dadurch ergibt sich jedoch der Nachteil, dass eine stufenlose Kraft nur über aufwendige Justage der Zugstangen herzustellen ist. Diese Methode ist zeitaufwändig und führt obendrein zu einer unsymmetrischen Kraftverteilung. Außerdem mussten die Dichtgummis durchbohrt werden um die Zugstangen hindurch zu führen, wodurch an diesen Stellen Wasser entweichen kann.

Besonders wenn ein Receiver für längere Zeit im Prüfstand eingebaut bleibt, gestaltet sich der Ausbau sehr schwierig, da die Dichtgummis trotz des Lösens der Schnellspanner nicht direkt ihre ursprüngliche Form annehmen und dadurch beim Herausziehen verkanten. Zusätzlich lässt sich die Receiverhalterung aufgrund des hohen Reibwiderstands der verwendeten Gleitschienen nur sehr schwer verschieben. Dies ist besonders problematisch, da bei einem Ausbau der Receiver leicht

angehoben werden und das Verfahren der Halterung dadurch mit einer Hand durchgeführt werden muss. Dies führt dazu, dass der Ausbau oft nur von mindestens zwei Personen und unter hohem Kraftaufwand ausgeführt werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit soll daher ein neues Dichtungskonzept sowie ein einfacher zu handhabendes Verfahrensystem konstruiert werden. Dadurch soll sich der zeitliche und personelle Aufwand eines Receiverwechsels deutlich verringern und zusätzlich das Verletzungsrisiko minimiert werden.

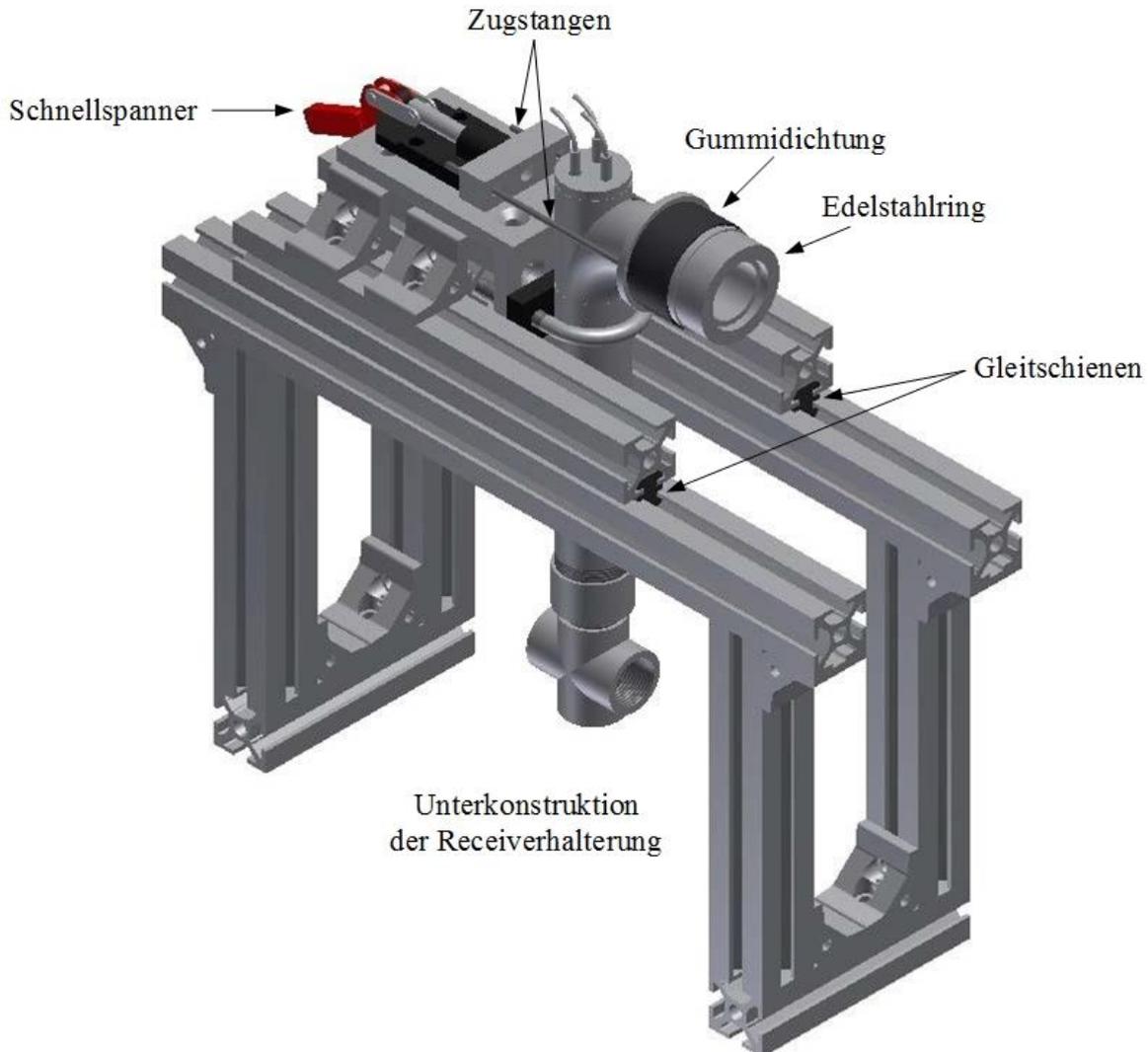


Abbildung 13: Aktuelle Version der Receiverhalterung des *OptiRec* [Schm14]

Zum Schutz der Messtechnik und Kunststoffteile, wird die Receiverhalterung während einer Messung von einem sogenannten Aluminiumschild abgedeckt. Fotos dieser Abdeckung befinden sich im Anhang dieser Arbeit.

### 3.3 Störkörper

Bei der Messung der optischen Eigenschaften eines Parabolrinnenreceivers befindet sich ein sogenannter Störkörper im Absorberrohr. Die ersten Ansätze bei Messungen des optischen Wirkungsgrads einen Störkörper einzusetzen stammen von Karin Wiesemeyer [Wie09]. Ziel war es durch eine Verringerung des Strömungsquerschnitts eine höhere Fließgeschwindigkeit des Wassers durch den Absorber zu erzeugen und damit den Wärmeübergang zu verbessern. Die Idee eines Verdrängungskörpers wurde in der Diplomarbeit von Jan Weinhausen [Wei11] wieder aufgegriffen. Zusätzlich zur Verbesserung des Wärmeübergangs sollte ein Störkörper dafür sorgen, dass sich das Absorberrohr aufgrund von Temperaturschichtungen im Wasser nicht verbiegt. Um eine solche Temperaturschichtung zu vermeiden, empfahl Weinhausen die Strömung möglichst turbulent zu gestalten. Philipp Ant [Ant12] untersuchte daraufhin den Einfluss der Temperaturschichtung innerhalb des Receivers genauer. Es konnte festgestellt werden, dass der Temperaturunterschied zwischen Ober- und Unterseite von 2,7 K am Eintritt bis hin zu 45,3 K am Receiveraustritt reichte, weshalb das Absorberrohr aufgrund der größeren thermisch bedingten Ausdehnung der Oberseite eine Durchbiegung von bis zu 47 mm in vertikaler Richtung nach oben aufwies. Dies ist zum einen problematisch, da sich das Absorberrohr dadurch nicht mehr exakt in der Fokallinie befindet und außerdem eine zu starke Durchbiegung zum Bruch des Glashüllrohrs führt. Weitere Versuche zeigten, dass je geringer der Volumenstrom, desto höher fallen die Temperaturdifferenz und damit auch die vertikale Verbiegung aus. Um aufgrund der Messgenauigkeit einen minimalen Temperaturhub von 4 – 5 K einzuhalten, kann der Volumenstrom jedoch nicht beliebig hoch eingestellt werden. Daher soll eine helixförmig geführte Strömung dafür sorgen, dass sich das Wasser über den gesamten Rohrquerschnitt gleichmäßig erwärmt.

Umgesetzt wurde dies durch einen Vollstab aus Polyethylen, der mit einem Edelstahldrahtseil umwickelt wurde. Durch den verkleinerten Strömungsquerschnitt floss das Wasser um etwa den Faktor 3,4 schneller durch den Receiver, was den Wärmeübergang deutlich verbesserte. Zusätzlich konnte durch die helixförmige Strömungsführung der Temperaturunterschied zwischen Ober- und Unterseite des Absorbers über den gesamten, gemessenen Volumenstrombereich von 200 bis 800 l/h unter 10 K gehalten werden. Aufgrund der hohen Wärmekapazität von Polyethylen dauert es jedoch sehr lange, bis sich diese nach Einschaltung der Lampen vollständig aufgeladen hat.

Im Zuge dieser Bachelorarbeit gilt es, die thermischen Eigenschaften der Störkörper, die im *OptiRec* eingesetzt werden zu verbessern und dadurch eine Verkürzung der Messzeit zu erreichen.

### 3.4 Identifizierung des Verbesserungspotentials

Die Messung der optischen Eigenschaften eines Parabolrinnenreceivers im *OptiRec* dauert nach Einschaltung der Lampen etwa 50 bis 60 Minuten. Zur Minimierung des zeitlichen Aufwands pro Receivermessung empfiehlt es sich die Lampen durchgängig brennen zu lassen, da die Lampeneinbrennzeit, bisher etwa drei Viertel der Messzeit ausmacht.

Durch eine zweite Messposition kann die Zeit zum Austausch eines Receivers verkürzt werden. Es kann ein Referenzreceiver in die neue Messposition B eingebaut und automatisch gemessen werden, während der Prüfreceiver in Messposition A ausgetauscht wird. Des Weiteren kann der Receiverwechsel durch eine verbesserte Receiverhalterung erleichtert werden. Der Gummiring, der bisher für die Abdichtung zwischen Receiver und Halterung sorgt, kann aufgrund des geringen Spiels und der nicht stufenlos einstellbare Klemmkraft beim Ausbau nur sehr schwer aus dem Absorberrohr gelöst werden. Der hohe Reibwiderstand der Gleitschienen auf denen sich die Receiverhalterung bewegt, trägt ebenfalls zum hohen Kraftaufwand und einem damit einhergehenden erhöhtem Verletzungsrisiko beim Ausbau eines Receivers bei. Eine neue Verfahrenheit der Halterung in Kombination mit einem neuen Dichtungskonzept würde daher den körperlichen und personellen Aufwand verringern und zusätzlich die Arbeitssicherheit erhöhen.

Der Störkörper kann weiter optimiert werden indem Materialien mit einer geringeren Wärmekapazität und einem besseren Wärmeübergang verwendet werden. Dadurch würde die absorbierte Leistung eines Receivers nach Veränderung der Prozessbedingungen schneller konvergieren.

Weiteres Verbesserungspotential besteht in der Überwachung des Prüfstandes, der Implementierung zusätzlicher Sicherheitsabschaltungen, sowie der automatischen Auswertung der Messdaten durch die Steuerungssoftware des Prüfstandes in *LabView*.

## 4 Implementierung einer neuen Messmethodik

Durch die Implementierung einer neuen Messmethodik soll die benötigte Zeit einer Receivermessung erheblich verkürzt werden und zusätzlich eine Erhöhung der Arbeitssicherheit sowie des Bedienkomforts des Prüfstands erreicht werden.

Zu diesem Zweck wird eine zweite Messposition errichtet, in der ein weiterer Receiver vermessen werden kann. Die Lampen werden nach einmaliger Einschaltung durchgängig betrieben, wodurch die Einbrennzeit eingespart wird, was eine kontinuierliche Messung der beiden Messpositionen ermöglicht. Da die absorbierte Leistung eines Prüfreceivers relativ zu einem Referenzreceiver gemessen wird, empfiehlt es sich einen Referenzreceiver in der neuen Messposition eingebaut zu lassen. Während einer Referenzmessung kann dann der Prüfling in Messposition A ausgetauscht werden, wodurch eine zusätzliche Zeitersparnis erreicht wird. Außerdem stellt der Wegfall des Einbaus eines Referenzreceivers nach jeder Messung eine Einsparung des Arbeitsaufwandes sowie eine Erhöhung der Arbeitssicherheit, im Vergleich zur bisherigen Messmethodik dar.

Zur Realisierung der zweiten Messposition muss das bestehende Leitungssystem erweitert werden. Hierfür wird der Wasserkreislauf vor den beiden Messpositionen aufgeteilt und das Wasser automatisch durch den Receiver geleitet, der sich aktuell in der Fokallinie befindet. Der Receiver wird durch zwei Halterungen in der Messposition befestigt, die gleichzeitig die Verbindung zum Leitungssystem darstellen. Für die Receiverhalterung der neuen Messposition wird das Verbesserungspotential, das sich aus der Erfahrung mit der bestehenden Halterung ergeben hat, ausgeschöpft. Hierzu gehören die Konstruktion einer Verfahreinheit sowie ein neues Dichtungskonzept. Dadurch soll der Receiverwechsel deutlich beschleunigt und erleichtert sowie das Verletzungsrisiko beim Umbau minimiert werden. Für den kontinuierlichen Betrieb des Prüfstandes und zur Vergleichbarkeit der beiden Messpositionen untereinander werden zukünftig zwei Störkörper mit identischen Eigenschaften benötigt. Daher werden zwei neue Störkörper konstruiert, die das Konzept des bestehenden Störkörpers aufgreifen, eine helixförmige Strömung zu generieren. Jedoch werden diese über verbesserte thermische Eigenschaften verfügen, wodurch die Vorlaufphase einer Messung, also die Zeit bis sich eine konstante Leistung eingestellt hat, erheblich verkürzt werden kann. Zusätzlich wird eine Anpassung an unterschiedliche Absorberrohrinnendurchmesser ermöglicht sowie eine klar definierte Position im Receiver erzeugt. Die Implementierung weiterer Messtechnik dient der besseren Überwachung des Prüfstandes und kann außerdem für zusätzliche Sicherheitsabschaltungen genutzt werden. Die Anpassungen der Prüfstandssoftware an die neue Messmethodik beinhaltet die automatisierte Erfassung und

Verarbeitung der Messdaten derjenigen Messposition, die sich aktuell in der Fokallinie befindet. Eine optimierte Benutzeroberfläche sowie ein Flussdiagramm, in dem alle relevanten Messwerte grafisch dargestellt sind, dienen der besseren Übersicht. Auf diese Weise werden Fehler im Umgang mit der Prüfstandssoftware vermindert und gleichzeitig eine Einarbeitung für neue Mitarbeiter erleichtert.

## 4.1 Erweiterung um eine zweite Messposition

Eine zweite Messposition wurde bereits bei der Planung des *OptiRec* berücksichtigt, ist bisher jedoch nicht umgesetzt worden. Aus diesem Grund ist der Receiverwagen, auf dem der Receiver in die Fokallinie verfahren werden kann, bereits symmetrisch für zwei Messpositionen ausgelegt worden, wie in Abbildung 9 zu erkennen ist. Die Größe des Receiverwagens entspricht dabei dem Abstand zwischen Fokallinie und Prüfstandsumgrenzung. Auf diese Weise befindet sich eine der beiden Messpositionen in der Fokallinie, wenn der Receiverwagen an einer Seite der Prüfstandsumgrenzung anliegt. In dieser sogenannten Endposition des Receiverwagens kann der Receiver der sich dort befindlichen Messposition ausgetauscht werden, während zeitgleich eine Messung in der anderen Messposition durchgeführt wird.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte beschrieben die nötig sind, um die zweite Messposition nutzen zu können. Dazu gehören die Aufteilung und automatische Regelung des Wasserkreislaufs, die Konstruktion einer weiterentwickelten Receiverhaltung, die Einbringung zusätzlicher Messtechnik und derer sicherheitstechnischer Verschaltung ebenso wie Anpassungen in der Prüfstandssoftware.

### 4.1.1 Erweiterung des Wasserkreislaufs

Um die zweite Messposition des *OptiRec* nutzen zu können, muss diese an den bereits vorhandenen Wasserkreislauf angebunden werden. Im Messbetrieb soll später automatisch der Receiver, der sich im Bestrahlungsbereich befindet mit Wasser durchströmt werden.

Um eine Regelung des Massestroms wie bisher mit Hilfe des elektronisch ansteuerbaren 3-Wege-Ventils auch zukünftig nutzen zu können und um den Kauf eines zusätzlichen Strömungsmessgerätes zu vermeiden, darf das Wasser während einer Messung nur durch einen der beiden Receiver fließen. Dies ist ohnehin notwendig, da der Prüfling während der Referenzmessung ausgetauscht werden wird. Zu diesem Zweck wird der Wasserkreislauf hinter dem Strömungserhitzer durch ein T-Stück aufgeteilt und an beiden Abzweigungen je ein elektrisch ansteuerbares Magnetventil angeschlossen. Hinter den Receiverhalterungen der Austrittsseite sorgt

je ein Rückschlagventil dafür, dass beim Ausbau eines Receivers kein Wasser ausströmt. Im Anschluss an die Rückschlagventile wird der Wasserkreislauf, ebenfalls über ein T-Stück, wieder zusammengelegt und dem Kaltwassersatz zugeführt. Des Weiteren kann nun durch eine Drossel vor dem Kaltwassersatz der Druck im Leitungssystem angepasst werden. In Abbildung 14 ist der neue Wasserkreislauf schematisch dargestellt. Die Neuerungen, die im Zuge dieser Arbeit implementiert werden, sind grün hinterlegt.

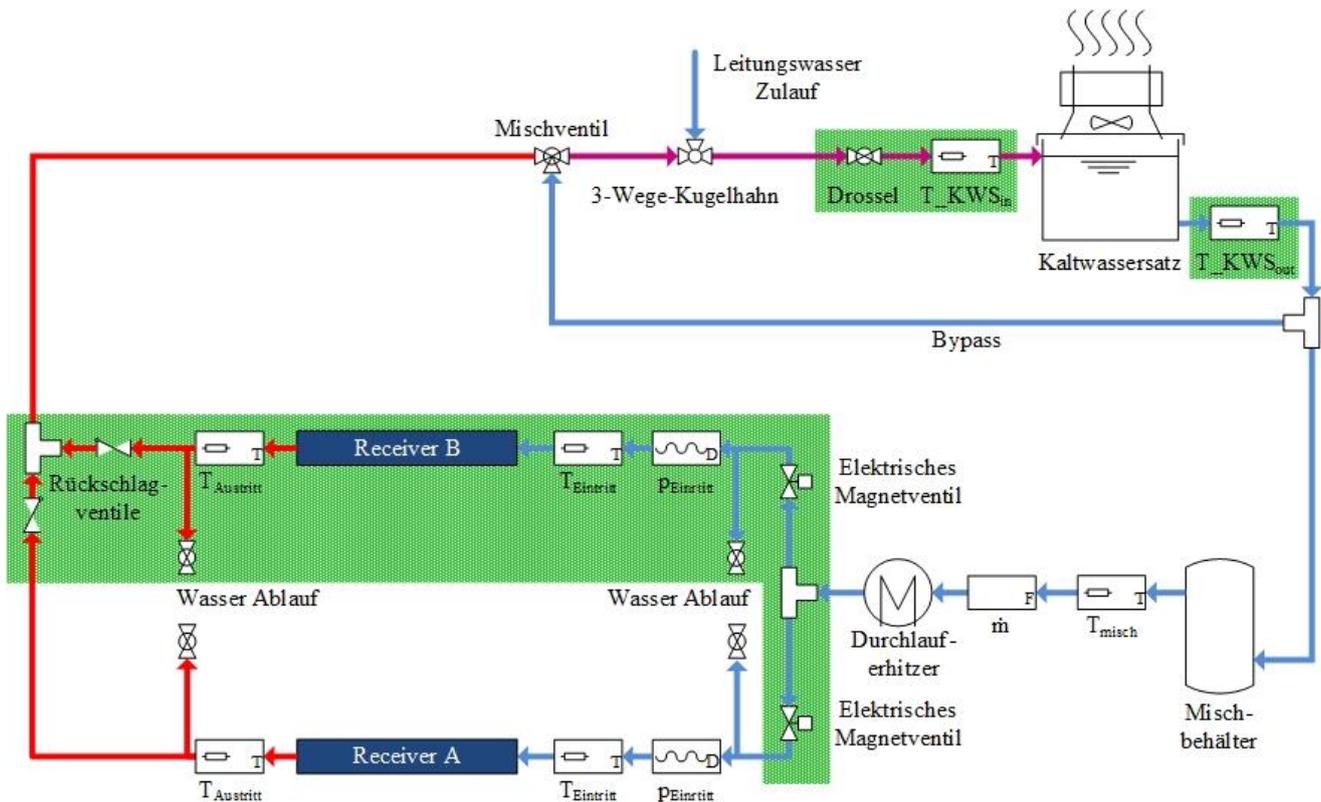


Abbildung 14: Fließschema des *OptiRec* mit zweiter Messposition

Die mit 230 V Spannung versorgten Magnetventile werden in der Ausführung „stromlos geschlossen“ ausgewählt, um zu gewährleisten, dass bei einem möglichen Stromausfall oder im Störfall kein Wasser entweichen kann. Das Ventil der jeweiligen Messposition soll außerdem immer dann geschlossen sein, wenn sich der Receiver in der Ausbauposition befindet. In dieser Position ist der Receiver der jeweils anderen Messposition, aufgrund der dafür ausgelegten Maße des Receiverwagens, exakt in der Fokallinie ausgerichtet. Zur Bestimmung der optischen Eigenschaften muss eine konstante und reproduzierbare Bestrahlung über die gesamte Messung, auch bei leichten Erschütterungen wie beispielsweise dem Austausch des Prüfreceivers, gewährleistet sein. Zur Fixierung dieser Position, sind daher an den Anschlüssen der Prüfstandsungrenzung Kugelschnäpper angebracht, in die der Receiverwagen eingerastet wird.

Zusätzlich zu den Kugelschnäppern werden an den insgesamt vier Anschlagpositionen Endpositionssensoren verbaut. Auf diese Weise kann die automatische Regelung der Magnetventile und damit auch die des Wasserkreislaufs realisiert werden. Befindet sich beispielsweise Messposition A am Anschlag, also in der Ausbauposition, sind die Endpositionssensoren A aktiv und das Magnetventil der Messposition A schließt. Gleichzeitig wird das Signal der Endpositionssensoren an die Prüfstandssoftware in *LabView* weitergegeben, wodurch sich die exakte Ausrichtung der Messposition B in der Fokallinie überwachen lässt. Die Einbindung der neuen Messtechnik an den Schaltschrank und an die Prüfstandssoftware wird in den nachfolgenden Abschnitten noch genauer erläutert.

Zusätzlich zu den bereits existierenden Temperaturmessstellen, an Ein- und Austritt von Messposition A sowie hinter dem Mischbehälter, wird die Temperatur des Wassers nun auch an Ein- und Austritt des Receivers in Messposition B sowie des Kaltwassersatzes gemessen. Da die Temperaturmessstellen am Kaltwassersatz lediglich der Überwachung des Wasserkreislaufs dienen, reicht dort je ein Kabeltemperaturfühler. Die Temperatur in den Receiverhalterungen, aus denen die aufgenommene Leistung berechnen wird, muss hingegen sehr genau sein. Zu diesem Zweck werden dort je drei Temperaturfühler verwendet, aus denen dann der Mittelwert gebildet wird.

Hierfür werden wie bisher hochgenaue Pt100 Kabeltemperaturfühler der Genauigkeitsklasse von 1/10 DIN Klasse B verwendet, die als Messeffekt die Abhängigkeit des elektrischen Widerstands von der Temperatur bei Platin anwenden. Da für die Messung der absorbierten Leistung nur die Temperaturdifferenz, nicht aber die absolute Temperatur entscheidend ist, werden die Pt100 nicht absolut, sondern relativ zueinander kalibriert. Hierfür wird ein Referenz Pt100 definiert, das an derselben Stelle im Wasserkreislauf angebracht ist, wie die zu kalibrierenden Temperaturfühler. Durch die Messung von mindestens drei verschiedenen Temperaturstufen, die die spätere Einsatztemperatur festlegen, lassen sich so Kalibrationsgeraden ermitteln. Diese können direkt in den Steckern der einzelnen Kabeltemperaturfühler hinterlegt werden und so vom Datenlogger bereits kalibriert weiterverarbeitet werden. Die verwendeten Stecker verfügen über eine Auflösung von 1 mK. Die Auswertungen der Kalibrationsmessungen liegen der digitalen Version dieser Arbeit bei.

Die Temperaturmessung eines Pt100 findet in dessen Spitze statt. Daher ist bei der Messung von strömenden Fluiden besonders darauf zu achten, dass die Spitzen immer entgegen der Strömungsrichtung ausgerichtet sind, wie bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben.

## 4.1.2 Konstruktion der Receiverhalterung

Um den Receiver der zweiten Messposition an den Wasserkreislauf anzuschließen und gleichzeitig in der Fokallinie zu halten werden zusätzliche Receiverhalterungen benötigt. Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben weist die bestehende Receiverhalterung allerdings noch Verbesserungspotential auf, weshalb die neuen Receiverhalterungen für die zweite Messposition entsprechend weiterentwickelt werden.

Wesentlicher Kritikpunkt an der bestehenden Halterung ist die Bedienbarkeit. Aus diesem Grund wird eine neue Verfahreinheit für die Halterungen entwickelt, die ohne großen Kraftaufwand und mit nur einer Hand bedient werden kann. Ein neues Konzept der Abdichtung zwischen Receiver und Halterrohr soll außerdem den Austausch eines Receivers erleichtern und zusätzlich die Arbeitssicherheit erhöhen.

Zum Vergleich der Messungen untereinander sollen die Messbedingungen der beiden Messpositionen möglichst identisch sein. Aus diesem Grund wird die Anordnung der Elemente der Rohrverbindungen, durch die der Receiver mit dem Wasserkreislauf verbunden ist und gleichzeitig als Auflagefläche dienen, von den bereits vorhandenen Rohrverbindungen übernommen. Dadurch soll vermieden werden, dass eine abweichende Geometrien der neuen Rohrverbindung Auswirkung auf die Temperaturmessung des Wassers hat, die in der Rohrverbindung stattfindet.

Eine detailliertere Beschreibung sowie eine Zeichnung der Rohrverbindung befinden sich in Abschnitt 3.2.

### 4.1.2.1 Verfahreinheit

Das händische Verfahren der Receiverhalterungen hat sich aufgrund des hohen Reibwiderstandes als sehr kraftintensiv und dadurch unvorteilhaft beim Wechsel eines Receivers herausgestellt. Aus diesem Grund gilt es eine praktischere und funktionellere Alternative für die Lagerung und Verfahrmöglichkeit der bisher verwendeten Gleitschienen zu finden.

Während des Betriebes des Prüfstandes ist aufgrund des beschränkten Bauraums ein Receiverwechsel nur in Messposition A möglich. Die neu implementierte Messmethodik sieht den Austausch des Prüfreceivers, während der Messung eines Referenzreceivers vor. Da der Referenzreceiver dementsprechend seltener ausgetauscht werden muss, wird die Verfahreinheit der bisher vorhandenen Receiverhalterung auf die Messposition B übertragen, in der zukünftig der Referenzreceiver vermessen wird. Die neue Verfahreinheit wird daher für die Receiverhalterung der Messposition A ausgelegt.

Vorgefertigte Gleitsysteme wie beispielsweise ein Führungsschlitten auf einer Linearführung oder auch ein Konzept mit Laufrollen schieben aufgrund zu hoher Anschaffungskosten oder aber des zu großen Bauraums, den sie benötigen, aus.

Ein passendes Lösungskonzept bietet die Verwendung einer Gewindespindel. Die Komponenten von Gewindespindeln sind in verschiedensten Ausführungen und Materialien verfügbar, sodass sie passgenau für die benötigten Abmessungen und zur leichten Montage an den MK-Profilen zusammengestellt werden können.

Um die spätere Ausrichtung der Receiverhalterungen einfacher zu gestalten, wird eine notwendige Synchronisierung bei der Verwendung von zwei Spindeln pro Halterung vermieden. Daher wird nur eine der Gleitschienen durch eine Gewindespindel ersetzt, die wiederum über zwei Gewindemuttern mit dem MK-Profilblock der Receiverhalterung verbunden wird. Die andere Gleitschiene wird durch eine verbesserte Gleitleiste ersetzt, die einen geringeren Reibwiderstand besitzt und auf der die gesamte Konstruktion beim Verfahren mitgeführt wird. In Abbildung 15 ist die Seitenansicht der Verfahrenseinheit dargestellt.

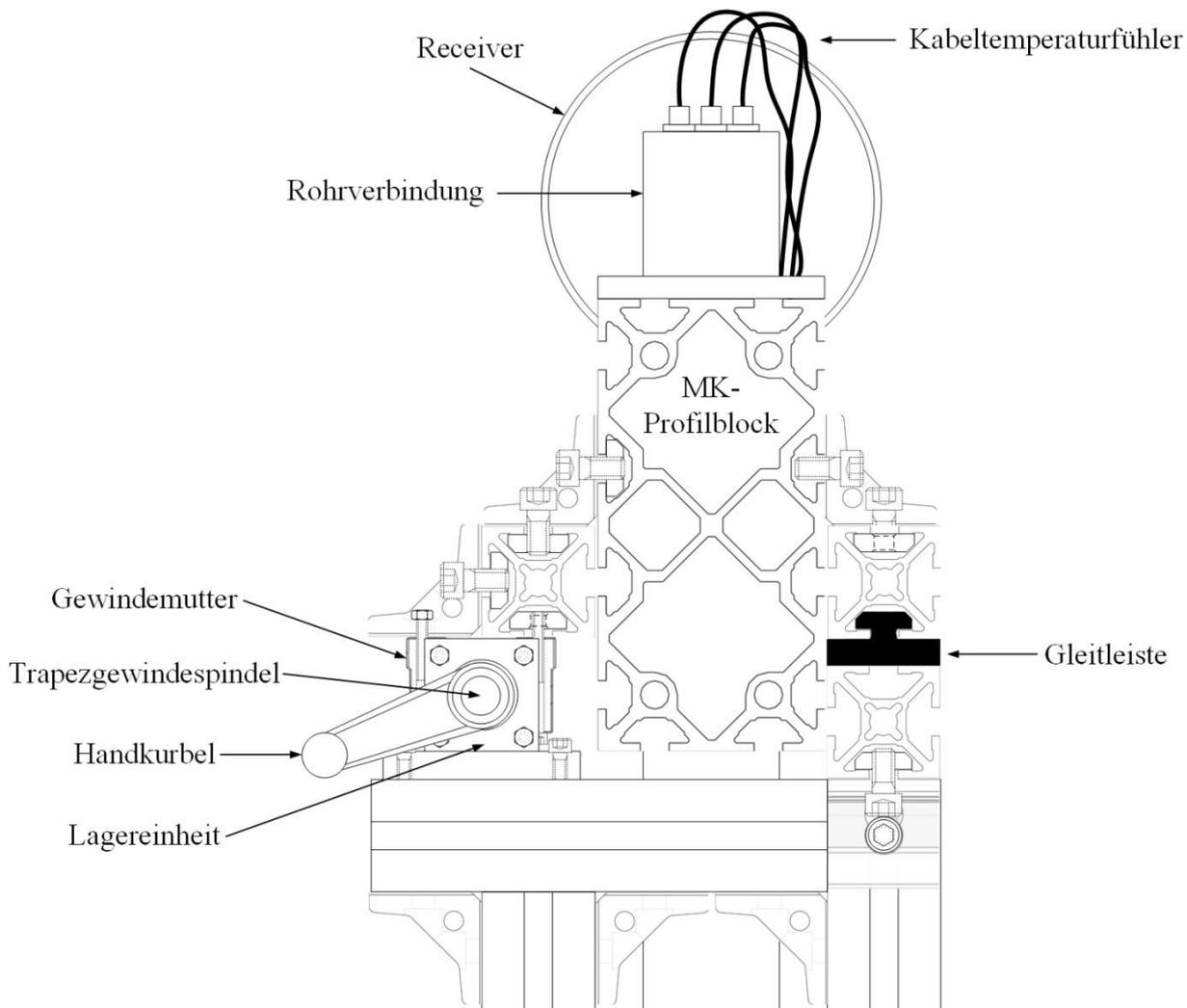
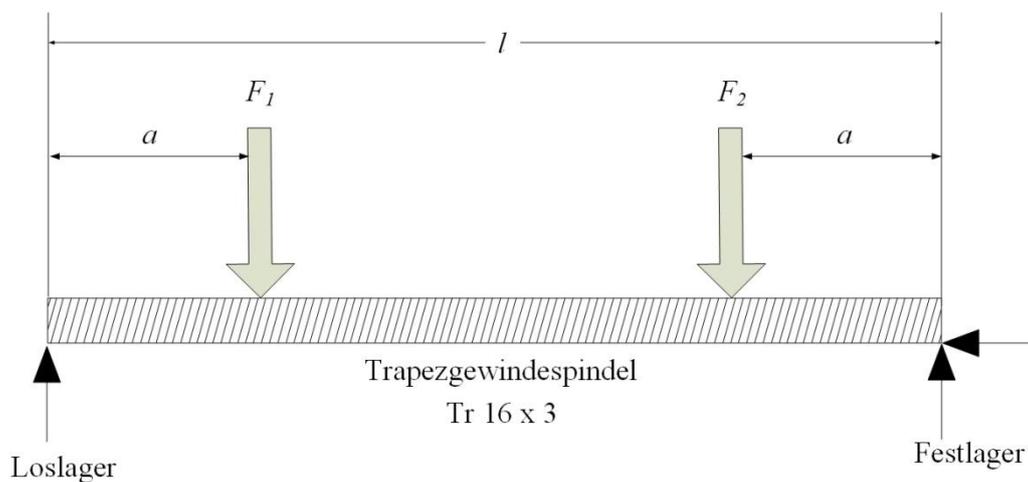


Abbildung 15: Seitenansicht der neuen Verfahrenseinheit der Receiverhalterung

Ähnlich wie bei einem Schraubstock oder der Leitspindel einer Drehmaschine empfiehlt es sich hierbei auf ein Trapezgewinde zurückzugreifen. Denn diese können aufgrund der größeren Steigung und dickeren Gewindegänge größere axiale Kräfte aufnehmen als es metrische- oder auch Kugelgewinde zu leisten vermögen.

Zusätzlich zu den axialen Kräften müssen die Gewindestangen jedoch auch die Gewichtskraft des Receivers und der Halterung aufnehmen. Um eine maximale Durchbiegung und damit ausreichenden Durchmesser der Gewindestange zu berechnen muss zuerst die Art der Lagerung festgelegt werden. Eine Fest-Los-Lagerung eignet sich für diesen Anwendungsfall besonders gut, da hiermit Fertigungstoleranzen der Komponenten sowie eine Längenausdehnung der Welle aufgrund von Erwärmung ausgeglichen werden. Das Loslager besteht aus einem Rillenkugellager, das Festlager aus einem zweireihigen Schrägkugellager, welche beide bereits in einem Gehäuse



**Abbildung 16: Freischnitt der Gewindestpindel**

verbaut sind, sodass die Lagereinheiten nur noch durch zwei Sechskantschrauben mit der Unterkonstruktion verschraubt werden müssen. Zur Verbindung mit der Receiverhalterung werden zwei Gewindemuttern auf die Gewindestange zwischen den Lagern geschraubt. Um die Durchbiegung der Gewindestange möglichst gering zu halten empfiehlt es sich die zwei Krafteingriffspunkte, also die beiden Gewindemuttern, so nah wie möglich an den Lagern zu platzieren. Das Halterrohr der Receiverhalterung fährt etwa 80 mm in den Receiver ein, weshalb der Verfahrweg samt Sicherheitszuschlag mindestens 100 mm betragen sollte. Die Gewindemuttern müssen also jeweils mindestens 50 mm von den Lagern entfernt sein. In Abbildung 16 sind in einem Freischnitt der Gewindestpindel die wirkenden Kräfte dargestellt.

Ein mit Wasser durchströmter Receiver wiegt samt Halterung etwa 60 kg. Damit jedoch die Möglichkeit einer Aufrüstung zur Vermessung von längeren und dickwandigeren Receivern bestehen bleibt, wird ein maximales Gewicht von 100 kg angenommen. Dies entspricht einer Gewichtskraft von ungefähr 1000 N. Da der Receiver an der Ein- und Austrittsseite

spiegelsymmetrisch gelagert ist, verteilt sich die Kraft gleichmäßig zu je 500 N pro Seite. An beiden Seiten wird die Kraft wiederum zu gleichen Teilen auf die Gleitleiste und auf die Gewindestange aufgeteilt. Auf die Gewindestange wirkt damit eine Gesamtkraft von etwa 250 N, wodurch die einzelnen Krafteingriffspunkte  $F_1$  und  $F_2$  je einer Kraft von 125 N entsprechen.

Um eine exakte Ausrichtung der Receiverhalterung zu gewährleisten soll sich die Gewindestange nicht weiter als 1 mm durchbiegen. Mit Hilfe der Gleichung (4.1) [Ett06] lässt sich die Durchbiegung einer Welle mit zwei gleichgroßen Krafteingriffspunkten im Abstand  $a$  zu den Lagern berechnen.

$$f_m = \frac{F \cdot l^3}{8 \cdot E \cdot I_b} \cdot \frac{a}{l} \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^2\right) \quad (4.1)$$

Hierbei sind wie in Abbildung 16 eingezeichnet  $a$  der Abstand vom Kraftangriffspunkt zum Wellenende,  $l$  die Gesamtlänge der Welle,  $F$  die symmetrisch eingeleitete Kraft an jeder Wellenseite,  $E$  der E-Modul der Welle und  $I_b$  das Flächenträgheitsmoment der Welle. Der Durchmesser der Spindel fließt über das Flächenträgheitsmoment in die Gleichung ein. Da die Gleichung jedoch für die Durchbiegung einer Welle ausgelegt ist, wird statt des Nenndurchmessers der Kerndurchmesser der Gewindestange verwendet. Das Flächenträgheitsmoment lässt sich schließlich nach Gleichung 4.2 [Rol11] berechnen.

$$I_b = \frac{\pi \cdot d_{Kern}^4}{64} \quad (4.2)$$

In einem Excel-Dokument welches der digitalen Version dieser Bachelorarbeit beiliegt, können verschiedene Abstände  $a$  für unterschiedliche Spindeldurchmesser und -längen eingegeben werden und die daraus resultierende Durchbiegung berechnet werden.

Die Verwendung genormter, bereits einbaufertiger Spindeln mit abgesetzten Enden stellt eine erhebliche Kosten- sowie Zeitersparnis dar. Aufgrund des begrenzten Bauraums von maximal 500 mm wird daher die nächst kürzere, genormte Spindellänge von 452 mm ausgewählt. Eine Optimierung der Parameter ergibt als zulässige Abmessungen für eine Gewindestange der Länge 452 mm einen Nenndurchmesser von 16 mm, da die maximale Durchbiegung bei einem Abstand  $a$  von 68 mm mit diesen Wellendimensionen 1 mm beträgt. Bei diesem Abstand  $a$  der Gewindemuttern zu den Lagern beträgt der maximale Verfahrweg der Receiverhalterung 108 mm und ist damit ausreichend, um die Rohrverbindung aus dem Receiver zu fahren.

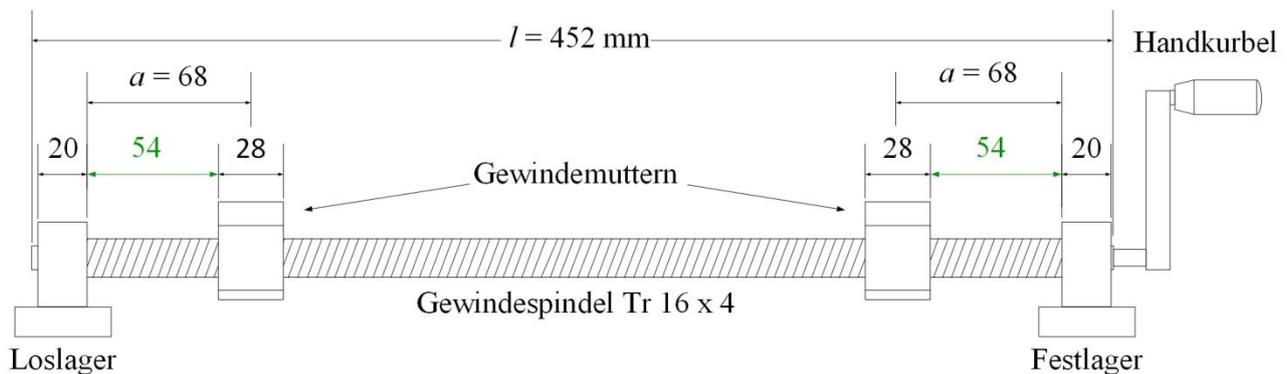


Abbildung 17: Gesamtverfahrweg der Receiverhalterung

Der Verfahrweg ergibt sich vom Anschlag der einen Gewindemutter bis zum Anschlag der zweiten Mutter mit den jeweiligen Lagern, unter der Annahme, dass die beiden Einzellasten in der Mitte der Gewindemuttern wirken. In der maßstabsgerechten Skizze in Abbildung 17 ist dieser Abstand jeweils grün gekennzeichnet. Zur einfacheren Bedienung wird eine Handkurbel an dem abgesetzten Ende der Spindel angebracht. Ein Foto der fertigen Verfahreinheit befindet sich im Anhang dieser Arbeit.

#### 4.1.2.2 Dichtung

Zur Optimierung der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Problematik der bisher verwendeten Dichtungen zwischen Receiverhalterung und Absorberrohr werden zwei Lösungsansätze verfolgt, die ein bedienfreundlicheres und weniger zeitintensives Abdichtungskonzept zum Ziel haben. Der erste Lösungsansatz sieht die Verwendung von aufblasbaren Dichtungen vor. Diese werden vor allem dort eingesetzt, wo Verbindungen oft gelöst und wieder abdichtet werden müssen, etwa bei Industrieöfen, Autoklaven oder auch Abfüllanlagen in der Lebensmittelindustrie. Über ein Ventil, welches meist automatisiert über ein Pneumatiksystem gesteuert wird, kann die Dichtung mit Luft befüllt werden und dehnt sich dadurch, je nach Art des Schlauchprofils, um bis zu 12 mm im Radius aus. Obwohl aufblasbare Gummidichtungen in den meisten Fällen Sonderanfertigungen sind, existieren Grenzen für das Einsatzgebiet. So wird für die verschiedenen Standardprofiltypen ein Mindestbiegeradius angegeben, bei dessen Unterschreitung die Dichtfunktion nicht mehr garantiert werden kann, da sich materialbedingt Falten am inneren Rand bilden können. Der Radius des Halterohrs, worauf die Dichtung gezogen werden soll, der somit dem inneren Radius der aufblasbaren Dichtung entspricht, beträgt 21 mm. Die Silikonprofile, die den nötigen Hub für diesen Anwendungsfall erzeugen, weisen jedoch einen etwa doppelt so großen Biegeradius auf, weshalb die meisten Hersteller von einer Verwendung abraten. Lediglich einer der angefragten

Hersteller bietet die Versendung eines unbearbeiteten Profilschlauchs an, mit dem die Eignung für diesen speziellen Anwendungsfall experimentell ermittelt werden kann. Eine Liste der möglichen Profilquerschnitte befindet sich im Anhang dieser Arbeit.

Aufgrund der Tatsache, dass der Versand mehrere Wochen dauern wird und außerdem die Erfolgchancen relativ gering scheinen, wird simultan ein zweiter Lösungsansatz verfolgt, der auf dem bisherigen Funktionsprinzip beruht, jedoch den Schnellspanner durch eine Gewindespindel ersetzt, sowie die Geometrie und Materialzusammensetzung des Dichtgummis optimiert wird.

In Abbildung 18 ist in einer Teilschnittzeichnung der Receiverhalterung die Anordnung der Dichtelemente skizziert. Die Silikondichtung liegt hierbei direkt an der Anschlagscheibe der Rohrverbindung an, durch die der Luftanschluss hindurchgeführt wird. Auf der anderen Seite der Dichtung wird ein Edelstahlring auf das Halterohr geschoben und durch einen Splint befestigt. Dieser Edelstahlring ist austauschbar und kann je nach Innendurchmesser des Receivers angepasst werden und dient somit als Auflagefläche für das Absorberrohr. Gleichzeitig wird mit Hilfe dieses Rings ein weiterer Freiheitsgrad der aufblasbaren Dichtung eingeschränkt, die sich so nur noch nach außen hin bis zum Absorberrohr ausdehnen kann, was den maximal möglichen Luftdruck der Dichtung und damit die Dichtwirkung erhöht.

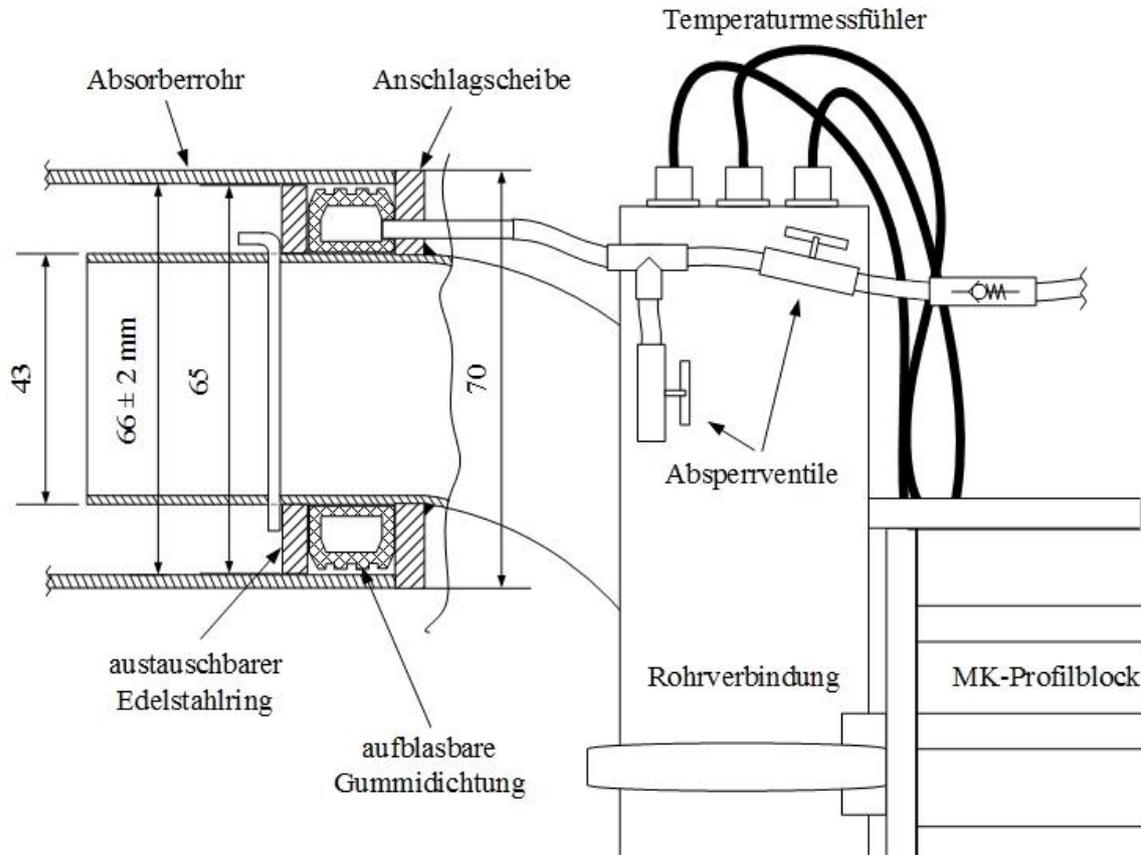
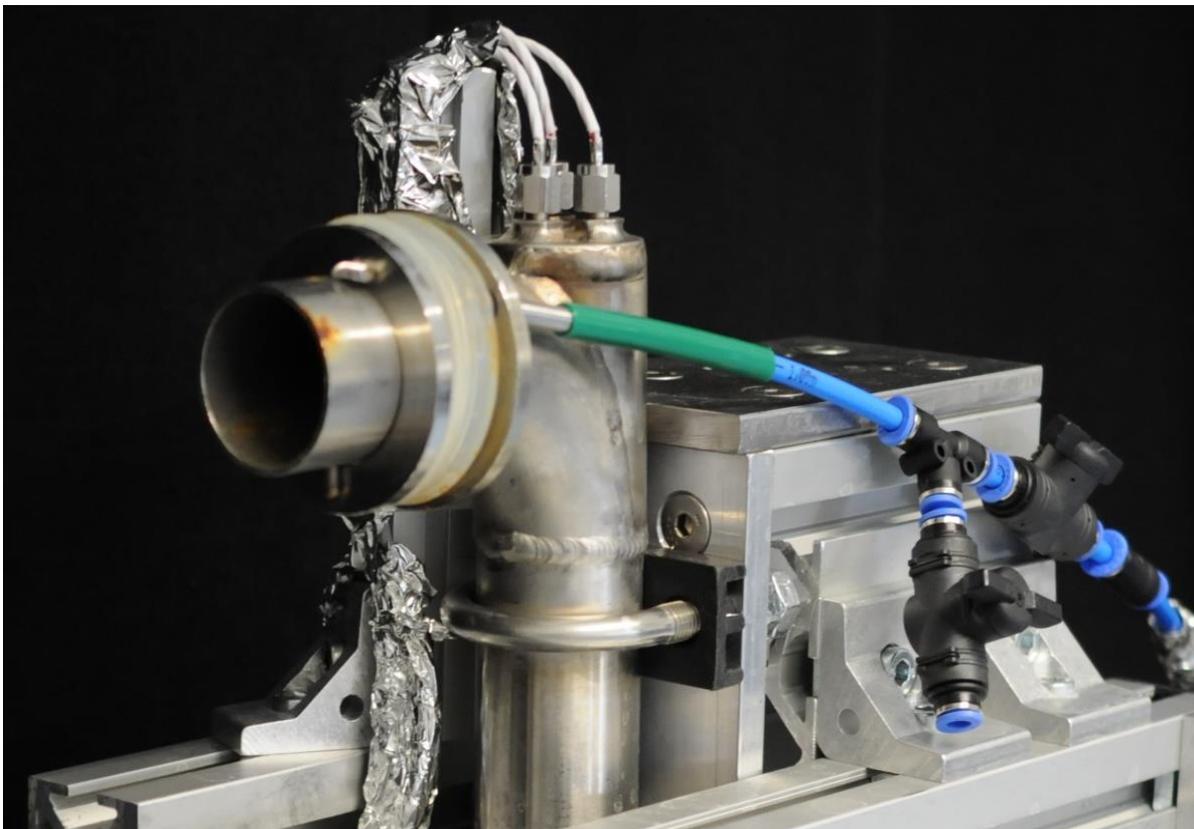


Abbildung 18: Anordnungsskizze der aufblasbaren Gummidichtung

Nach Erhalt der Dichtungen wird experimentell ihre Funktion untersucht, indem sie wie in Abbildung 18 dargestellt montiert werden und der Wasserkreislauf bei typischen Messbedingungen betrieben wird. Laut Hersteller kann die Dichtung mindestens bis zu einem Druck von 2 - 3 bar gegen Atmosphärendruck aufgepumpt werden. Da bei diesem Druck jedoch noch vereinzelt Wassertropfen nach Außen gelangen, wird der Druck weiter erhöht. Ab einem Druck von 4 - 5 bar tritt schließlich kein Wasser mehr hindurch. Bei einem Belastungstest wird die Dichtung mit dem vom Kompressor maximal zu erzeugendem Druck von 8 bar befüllt und kann auch diesem standhalten. In Abbildung 19 ist ein Foto der, auf der Receiverhalterung angebrachten, aufblasbaren Gummidichtung samt der dazugehörigen Pneumatikkomponenten abgebildet.



**Abbildung 19: Aufblasbare Dichtung auf Receiverhalterung samt Pneumatikkomponenten**

Aufgrund der erfolgreichen Tests und der einfacheren Handhabung gegenüber der gestauchten Gummidichtung in Verbindung mit einer Trapezgewindespindel, wird der zweite Lösungsansatz verworfen. Da die benötigten Komponenten bereits hinsichtlich ihrer Belastung ausgelegt, bestellt und montagebereit vorgefertigt sind, sie jedoch keine Verwendung finden werden, wird die Konstruktion samt Zeichnungen und Fotos im Anhang dieser Arbeit beschrieben.

Daraufhin werden zusätzliche Dichtungen nachbestellt, womit auch die ursprüngliche Messposition ausgestattet wird um homogene Messbedingungen innerhalb der beiden Messpositionen zu erzeugen. Um nicht jede Dichtung einzeln aufpumpen zu müssen, werden die Dichtungen über ein Pneumatiksystem, welches in Abbildung 20 schematisch dargestellt ist, direkt mit dem Kompressor verbunden.

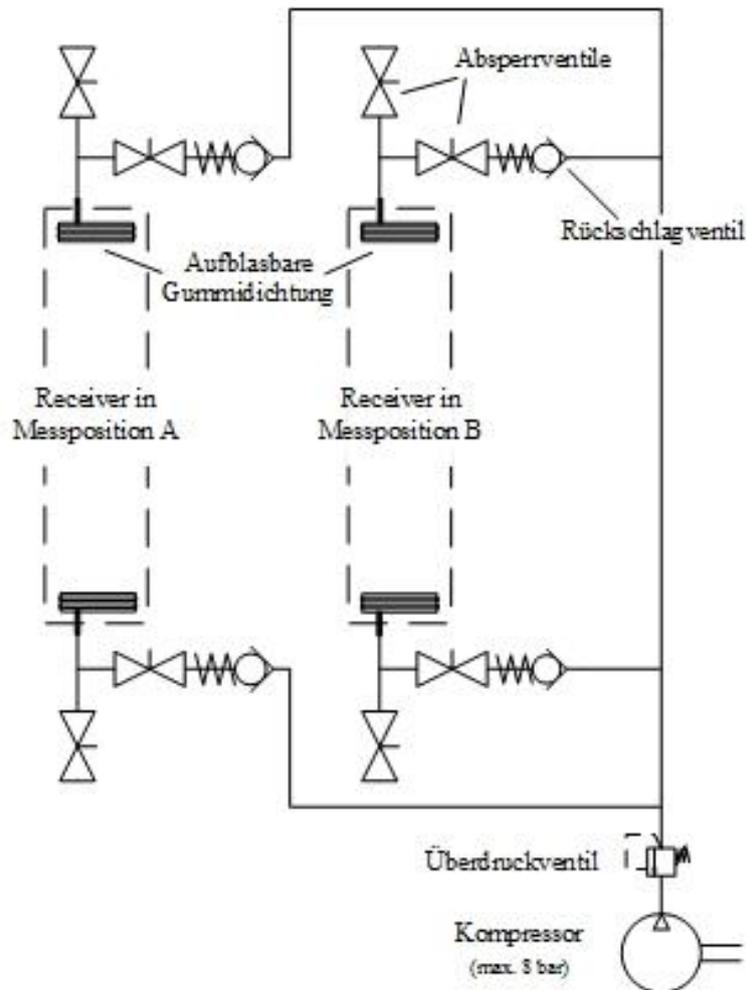


Abbildung 20: Pneumatikschaltbild

Jede Dichtung ist über ein Rückschlagventil gegen Druckabfall im System abgesichert. Das darauf folgende Absperrventil kann geschlossen werden, wenn der Receiver ausgetauscht werden soll. Dafür muss gleichzeitig über das mit einem T-Stück verbundene zweite Absperrventil die Luft aus der Dichtung abgelassen werden. Zusätzlich ist ein Überdruckventil verbaut, das dafür sorgt, dass der Druck innerhalb des Systems einen festgelegten Grenzwert nicht überschreitet.

### 4.1.2.3 Ausrichtung

In beiden Messpositionen soll das Absorberrohr des Receivers von der gleichen Lampenleistung bestrahlt werden, was ein Vergleich der beiden Messpositionen ermöglicht. Für ein und denselben Receiver sollte sich also im Idealfall in beiden Messpositionen die gleiche aufgenommene Leistung messen lassen. Einen wesentlichen Einfluss darauf hat die Ausrichtung des Absorberrohrs in der Fokallinie.

Zur Charakterisierung des Lampenfokus wird ein Target zwischen den Receiverhalterungen aufgebaut. Dieses wird in horizontaler- sowie in vertikaler Ausrichtung von den Lampen angestrahlt. Wie in Abbildung 2 zu erkennen, verläuft der Fokus über die gesamte Länge von 4 m annähernd gerade. Eine genauere Auswertung der Nahaufnahmen, wie sie beispielhaft in Abbildung 22 dargestellt ist, ergab, dass der Fokus sowohl in horizontaler wie auch in vertikaler Ausrichtung eine Breite von etwa 40 bis 50 mm aufweist. Daher ist eine erneute Ausrichtung der Lampen beziehungsweise der Spiegelrinne nicht notwendig.

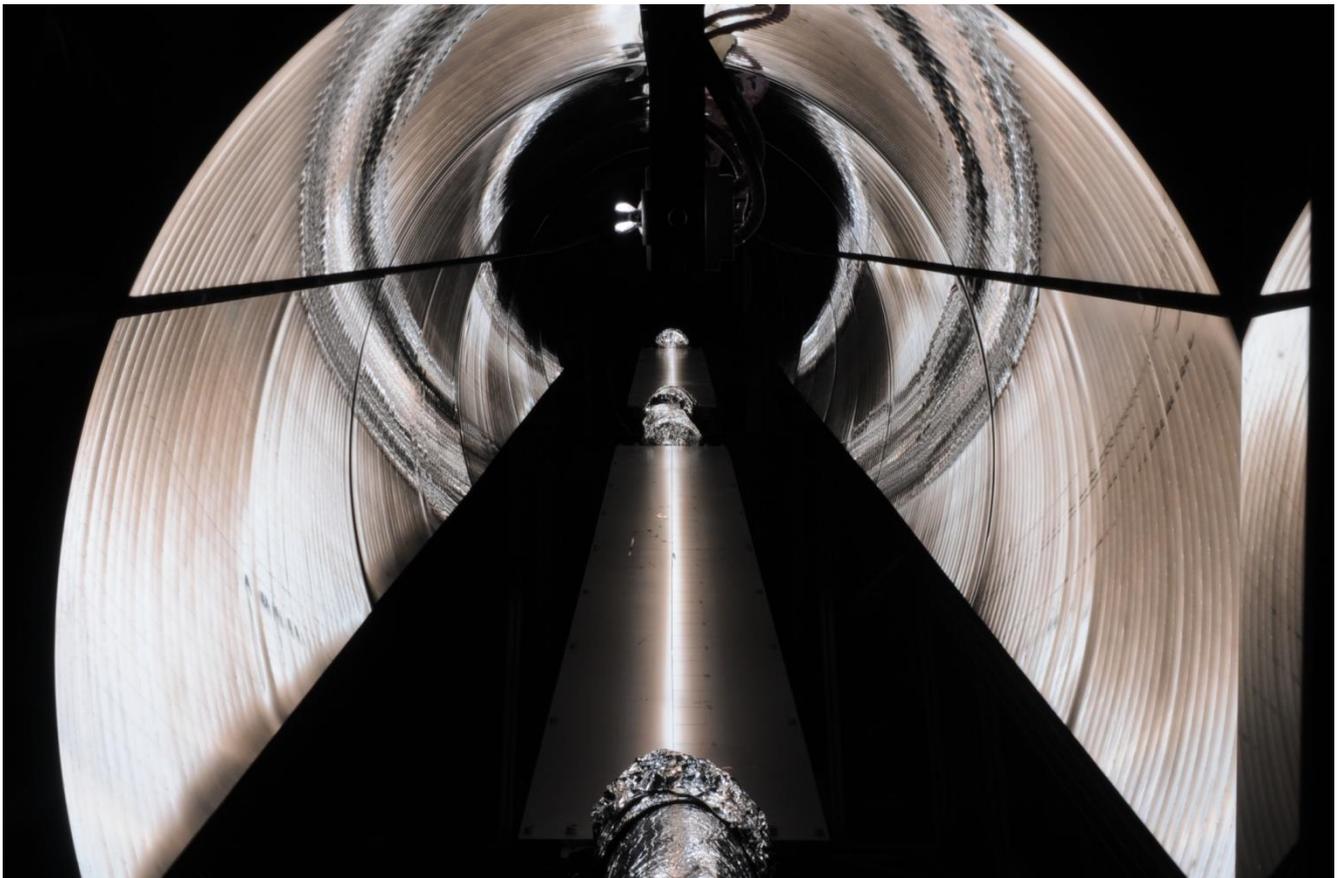
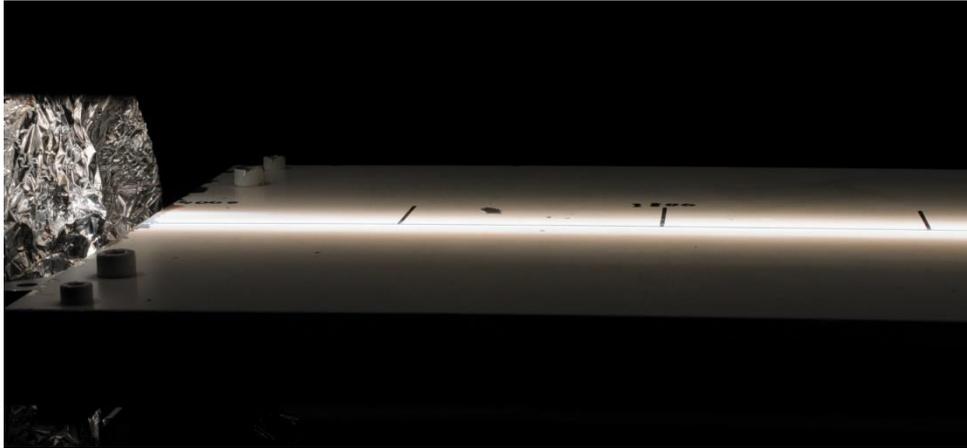


Abbildung 21: Fokustest im *OptiRec* durch Einbau eines Targets zwischen den Receiverhalterungen



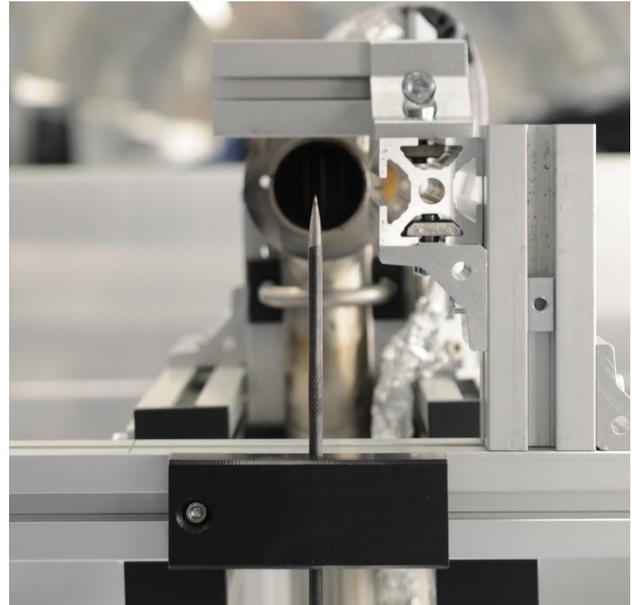
**Abbildung 22: Nahaufnahme des Targets bei horizontalem Fokustests**

Zum Ausrichten der neuen Messposition wird nun eine weitere Targetscheibe orthogonal zur Fokallinie auf einer Querstrebe befestigt, die auf den Außenwänden des Prüfstands aufliegt und damit unabhängig von der Bewegung des Receiverwagens ist. Bei eingeschalteten Lampen kann so der Fokuspunkt auf dem Target markiert werden. Die Spitze einer Anreißnadel, die ebenfalls höhenverstellbar an einer Querstrebe angebracht ist, wird auf den Fokuspunkt ausgerichtet. Anhand dieser Spitze kann dann die Receiverhalterung ausgerichtet werden. Zwei MK-Profile, die im Abstand von einem Radius des Halterohrs, also 21,5 mm über und neben der Nadelspitze angebracht sind, dienen, wie in Abbildung 23 zu erkennen, als Anschlag. Liegt das Halterrohr der Receiverhalterung an den beiden Anschlägen an, befindet sich die Spitze der Anreißnadel und damit auch der Fokus exakt in der Mitte des Halterohres, was ebenfalls der Mitte des Absorberrohres entspricht. Zusätzlich wird die gesamte Receiverhalterung in Waage gebracht, um einen passgenauen Sitz des Absorberrohres auf dem Halterrohr und an dem Anschlagring zu gewährleisten.

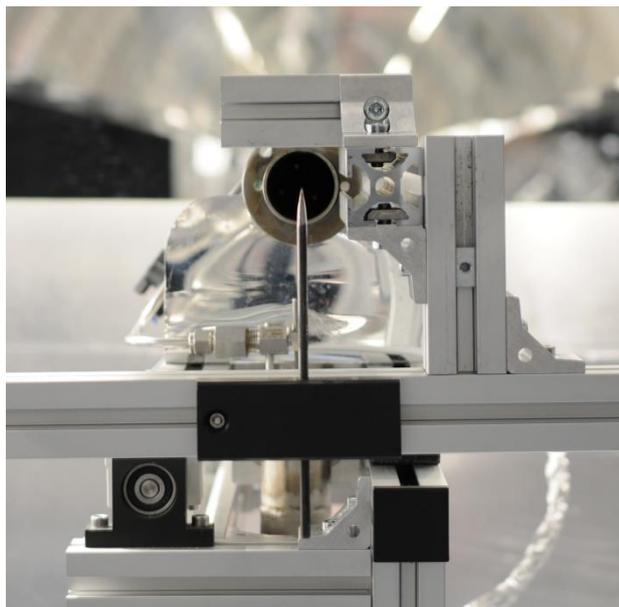
Zur Kontrolle der exakten Ausrichtung beider Messpositionen, wird eine Kamera, die ebenfalls auf einer Querstrebe montiert ist, auf die Spitze der Anreißnadel ausgerichtet. Die Schublade wird in die beiden Endpositionen gefahren und es wird je ein Foto der Halterungen gemacht, ohne dass sich die Position der Kamera und der Anreißnadel verändern. Die Abbildung 23 und 24 zeigen Fotos der Eintrittsseite beider Messpositionen. In Abbildung 25 und 26 sind äquivalent dazu die beiden Receiverhalterungen der Austrittsseite dargestellt.



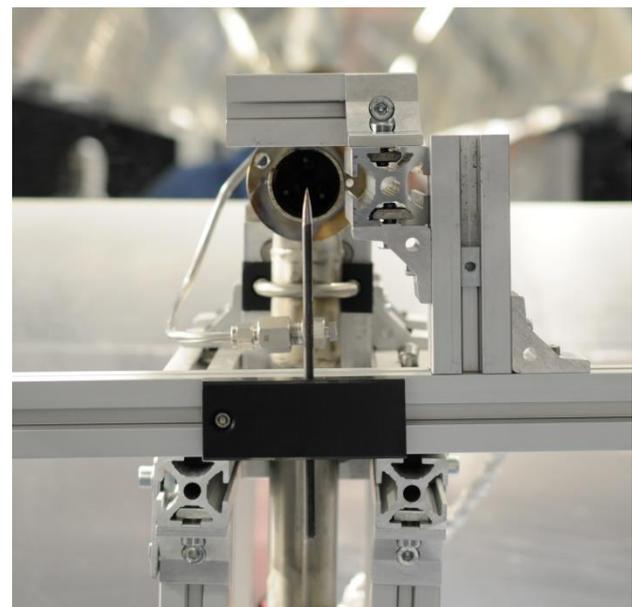
**Abbildung 23: Ausrichtung der Eintrittsseite in Messposition A**



**Abbildung 24: Ausrichtung der Eintrittsseite in Messposition B**



**Abbildung 25: Ausrichtung der Austrittsseite in Messposition A**



**Abbildung 26: Ausrichtung der Austrittsseite in Messposition B**

Besonders gut lässt sich die Konzentrizität der beiden Messpositionen überprüfen, indem die Bilder der jeweiligen Seiten am Computer direkt hintereinander betrachtet werden. Die Abweichung der Mittelpunkte zueinander beträgt demnach nur noch etwa einen Millimeter, was unter Berücksichtigung der Toleranzen der Innendurchmesser von Absorberrohren oder aber der Gleitschiene, die in den alten Receiverhalterungen verbaut sind, ausreichend genau ist.

### 4.1.3 Anbindung der neuen Messtechnik an den Schaltschrank

Der Schaltplan des *OptiRec* besteht aus einem Leistungsstromkreis sowie drei Steuerstromkreisen bei je 12 V, 24 V und 230 V. Der 230 V Steuerstromkreis, der in Abbildung 27 dargestellt ist, steuert die wichtigsten Komponenten des Prüfstands, wie etwa die Lampen, den Kaltwassersatz oder aber den Strömungserhitzer. In diesem sind daher alle relevanten Sicherheitsabschaltungen des Prüfstands integriert. Die vorgenommenen Änderungen sind in der Zuordnungsliste grün markiert. Der bisherige Steuerstromkreis verfügte bereits über zwei Notausschalter, die an den beiden Enden des Prüfstands angebracht sind. Wird einer dieser beiden Schalter im Störfall betätigt, schalten sofort alle elektrischen Komponenten des Prüfstands ab.

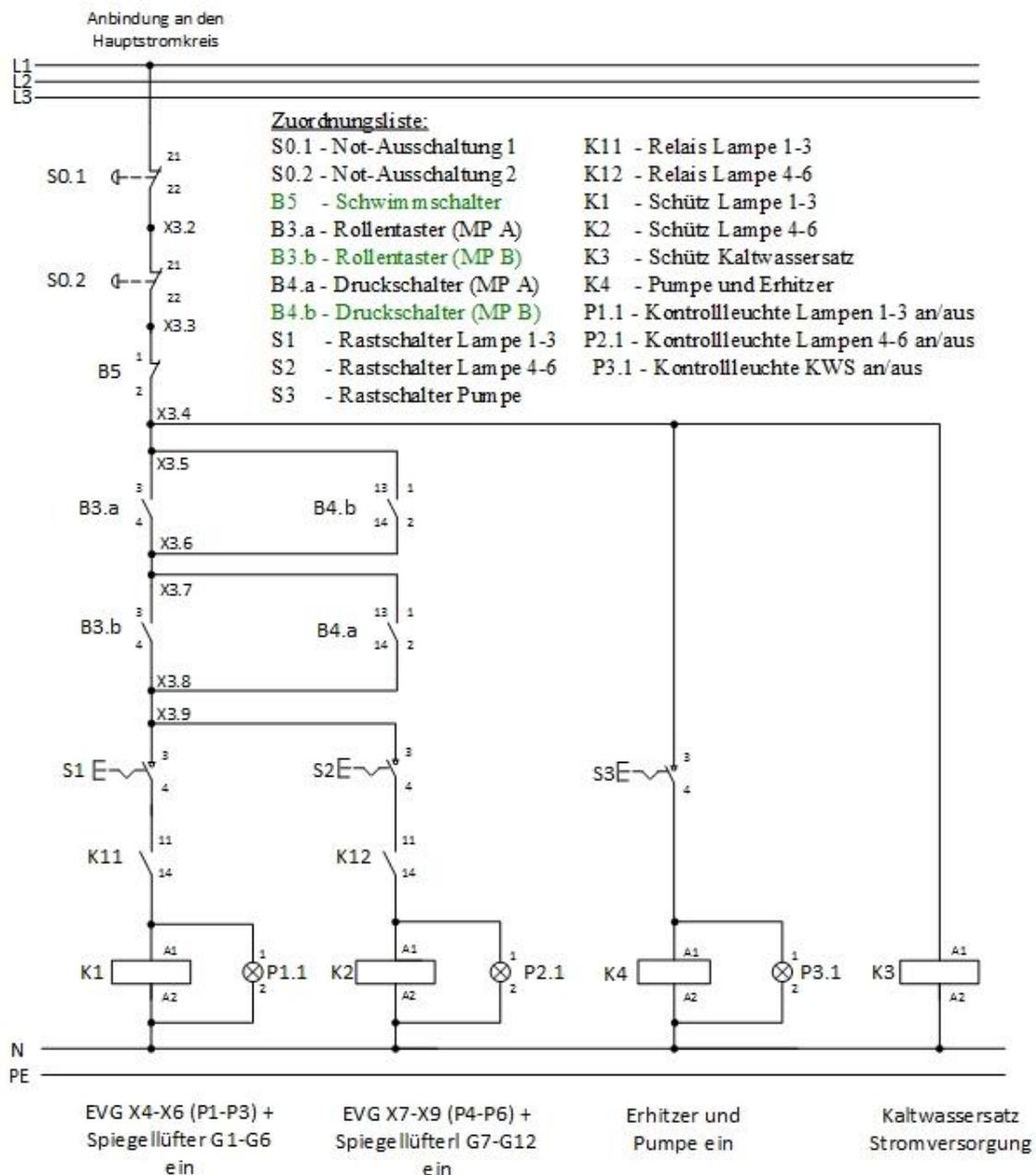


Abbildung 27: 230V Steuerstromkreis des *OptiRec*

Außerdem war aus Sicherheitsgründen bereits eine doppelte Aktivierung der Lampen und des Kaltwassersatzes zum einen durch die Betätigung von Rastschaltern am Schaltschrank und zum anderen durch die Relaissteuerung über die Prüfstandssoftware erforderlich.

Ein im Tank des Kaltwassersatzes angebrachter Schwimmschalter überwacht nun zusätzlich den Wasserstand und schaltet ebenfalls alle elektrischen Komponenten ab, falls nicht mehr genug Wasser vorhanden ist. Dadurch soll verhindert werden, dass die Pumpe beim Fördern von Luft Schaden nimmt, oder aber die Receiver aufgrund unzureichender Kühlung überhitzen und infolgedessen die Durchbiegung des Absorberrohres zur Zerstörung des Glashüllrohres führt.

Zur Vorbeugung dieses zweiten Falles, dient außerdem die parallel angeordnete Verschaltung der Druckschalter und Rollentaster. Die Druckschalter, die sich jeweils an der Austrittsseite der beiden Messpositionen befindet, schließen einen Stromkreis, wenn ein zuvor eingestellter Druck erreicht ist. Hierdurch kann also überprüft werden, ob der Receiver von Wasser durchströmt wird. Die Rollentaster sind in einem Abstand zur Fokallinie angebracht, dass diese auslösen, sobald der jeweilige Receiver in den Strahlungsbereich geschoben wird.

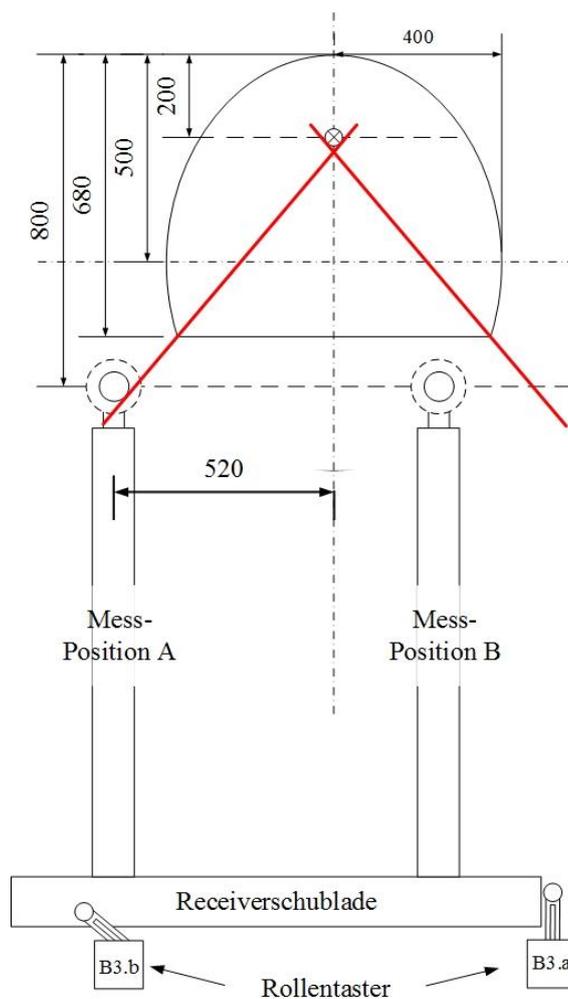


Abbildung 28: Maßstabsgetreue Skizze des Bestrahlungsbereiches der beiden Messpositionen

In Abbildung 28 ist eine maßstabsgetreue Skizze des Receiverwagens abgebildet, bei der der Bestrahlungsbereich, der sich aus dem Abstand der Lampen zur Spiegelrinne ergibt, durch zwei rote Striche verdeutlicht ist.

Auf diese Weise kann die exakte Positionierung der Rollentaster geometrisch ermittelt werden. Der Abstand der beiden Rollentaster zur Mitte des Prüfstandes beträgt demnach je 520 mm.

Ziel der parallelen Verschaltung ist eine Abschaltung der Lampen, sobald sich ein Receiver im Bestrahlungsbereich befindet, dieser zu dem Zeitpunkt jedoch nicht mit Wasser durchströmt wird.

Die Steuerung der Magnetventile erfolgt über den 12 V Steuerstromkreis. Zur Erhöhung der Sicherheit soll ein Ventil erst schließen, wenn sich der dazugehörige Receiver in der Ausbauposition befindet und nicht schon, sobald der Bestrahlungsbereich verlassen wurde. Hierfür können die Endpositionssensoren, die sich an den Anschlägen des Receiverwagens befinden, verwendet werden. Ein Ventil schließt bereits, wenn nur einer der beiden Endpositionssensoren pro Messposition aktiviert ist. Dadurch soll verhindert werden, dass bei einem ungewollten Kontaktverlust des Receiverwagens oder aber eines technischen Defekts einer der Sensoren, während eines Receiverwechsels, unkontrolliert Wasser entweichen kann.

## 4.2 Anpassungen der Prüfstandssoftware

Die vom Datenlogger gesammelten Rohdaten werden sekundlich an den Messrechner übertragen und dort von der Prüfstandssoftware *OptiLive* weiter verarbeitet. Die eigens für den Prüfstand programmierte Software wurde in *LabView*, einem grafischem Programmiersystem, entwickelt. Dieses bietet den Vorteil, dass kleine Anpassungen schon nach kurzer Einarbeitungszeit selbstständig durchführbar sind. Des Weiteren sind verschiedene Möglichkeiten einer Visualisierung der Messdaten in Echtzeit gegeben.

Um die Prüfstandssoftware auch mit der neu implementierten Messmethodik nutzen zu können, müssen einige Anpassungen vorgenommen werden. Diese beinhalten die Änderung des Messablaufs, die Eingabe der dazugehörigen Receiverinformationen sowie die automatische Erkennung des Receivers, der sich aktuell in der Fokallinie befindet und die dementsprechende Weiterverarbeitung der Messdaten. Im Zuge dieser Änderungen soll außerdem die Übersichtlichkeit verbessert werden, was in Kombination mit einer neu gestalteten Ablauflogik die Einarbeitungszeit deutlich verkürzen. Zusätzlich wird eine Überwachung der Lampenbrenndauer und –zündzahl eingefügt.

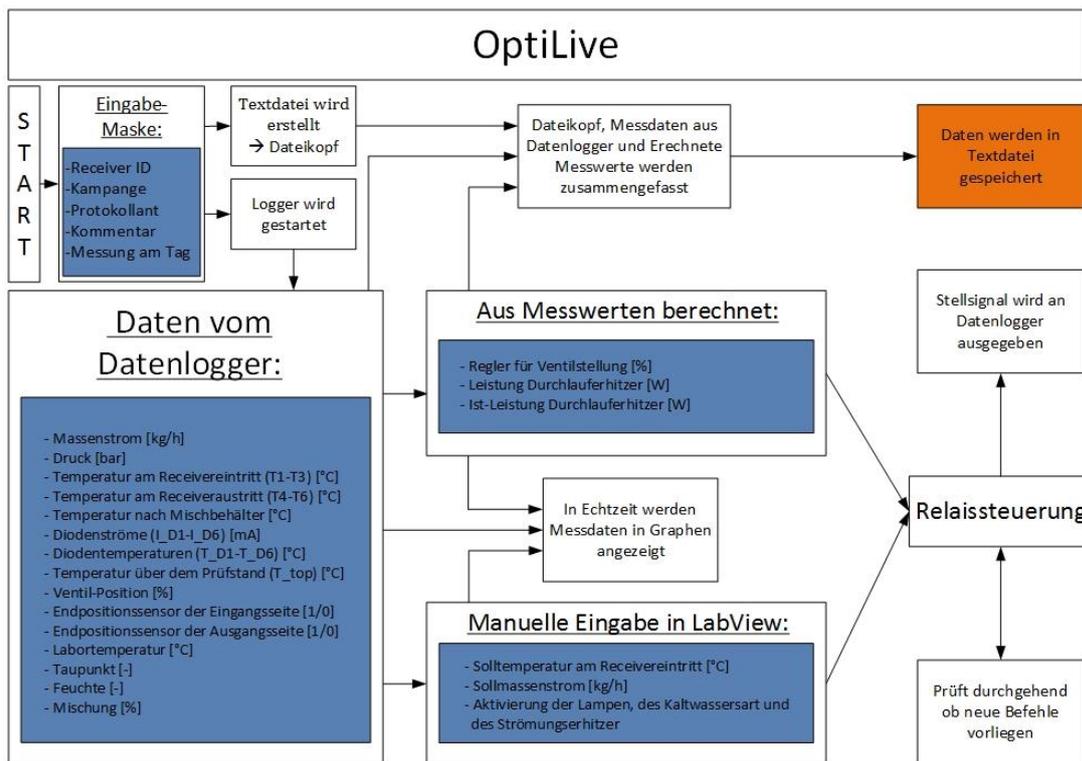


Abbildung 29: Ablaufschema der ursprünglichen Prüfstandssoftware

In Abbildung 29 ist das Ablaufschema der ursprünglichen Prüfstandssoftware veranschaulicht. Nach Start des Programms werden die Messparameter wie Receiver ID und der Name der Messkampagne über eine Maske eingegeben und daraufhin der Dateikopf der späteren Textdatei, die alle Rohdaten enthält, erstellt. Die vom Datenlogger gesammelten Messwerte werden mit den in *LabView* manuell eingegebenen Daten und den errechneten Parametern zusammengefasst und fortlaufend der Rohdatendatei hinzugefügt. Gleichzeitig werden die wichtigsten Messwerte zur Überwachung der Messung grafisch angezeigt. Mittels einer Relaissteuerung, die durchgehend prüft, ob neue Befehle vorliegen, werden manuelle Eingaben wie etwa die Aktivierung der Prüfstandskomponenten oder die Ventilstellung zur Regelung des Massenstroms zurück an den Datenlogger bzw. an den Schaltschrank übertragen.

Da zukünftig pro Programmablauf mehrere Receiver gemessen werden, kann die aktuelle Eingabemaske, bei der nur ein Receiver abgefragt wird, nicht mehr verwendet werden. Des Weiteren ist es im Vorhinein notwendig den Messablauf sinnvoll zu gliedern und einheitliche Begriffe zu definieren, um Missverständnissen vorzubeugen. Somit wird jeder Tag, an dem mindestens eine Messung stattfindet als Messtag bezeichnet. Mit jeder Zündung der Lampen beginnt eine neue Messsequenz, die sich wiederum aus mehreren Messungen zusammensetzt. Diese können sowohl Referenzmessungen als auch die Messung eines Prüfreceivers sein. Eine Messung lässt sich weiter in Vorlaufphase und Messphase unterteilen. Die Vorlaufphase entspricht dabei der

Zeit, bis sich homogene Messbedingungen eingestellt haben, nachdem ein Receiver zur Vermessung in die Fokallinie geschoben wird. Nur die Messdaten der Messphase werden schließlich in der Auswertung zur Berechnung der absorbierten Leistung verwendet. In Abbildung 30 ist die zuvor definierte Unterteilung der Messabläufe in einem Schaubild dargestellt.

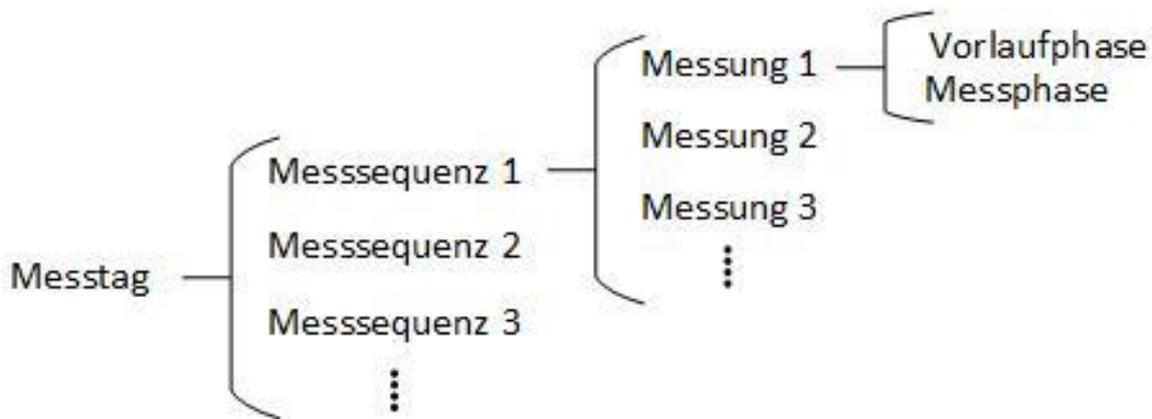


Abbildung 30: Systematische Unterteilung der Messabläufe

Zur Verbesserung der Übersicht befinden sich nun alle Schalter zum Aktivieren von Prüfstandskomponenten am oberen Rand des Bildschirms. Diese sind in der Reihenfolge angeordnet, in der sie bei einem typischen Messverlauf betätigt werden, wodurch sich eine intuitive Bedienoberfläche ergibt. Neben der Aktivierung einer neuen Messesequenz befindet sich die Aktivierung des Kaltwassersatzes, gefolgt von den Aktivierungen für den Strömungserhitzer und dessen Regler. Erst wenn die Wasserversorgung gewährleistet ist, können schließlich die Lampen eingeschaltet werden. Auf einer neuen Registerkarte werden die aktuellen und anstehenden Messungen der beiden Messpositionen, sowie deren wichtigsten Messwerte angezeigt. An dieser Stelle kann die Eingabe der Receiver-ID sowie eines Kommentars zu der als nächstes anstehenden Messung erfolgen. Über die Endpositionssensoren wird automatisch erkannt, wenn eine der Messpositionen in die Fokallinie gefahren wird. Daraufhin wird automatisch die Messungen gestartet und die Messdaten dabei kontinuierlich in eine Rohdatei geschrieben, die als Namen einen Zeitstempel des Messbeginns gefolgt von der Receiver-ID besitzt. Gleichzeitig werden alle Rohdaten der gesamten Messesequenz in einer großen Textdatei gesammelt, um eine Analyse der Messdaten über mehrere Messungen hinweg zu ermöglichen. Der Übersicht halber werden die Rohdatendateien in einem Ordnersystem abgelegt, das der Systematik der zuvor festgelegten Terminologie entspricht. Ein Screenshot dieser Registerkarte befindet sich im Anhang dieser Arbeit.

Ein in *LabView* geschriebenes Programm wird als Virtual Instrument (VI) bezeichnet und ist aus mehreren logisch verknüpften Unterprogrammen, den sogenannten SubVIs aufgebaut. Um den Programmieraufwand möglichst gering zu halten und so eine Duplizierung der Regler oder auch

Graphen für die zweite Messposition zu vermeiden, erkennt ein neu entwickeltes SubVI anhand der Endpositionssensoren, welcher Receiver sich in der Fokallinie befindet und leitet dementsprechend die Messdaten dieses Receivers an die SubVIs weiter, die etwa für die Berechnung der Regelleistung zuständig sind.

Zur besseren Kontrolle des Prüfstands sind außerdem alle relevanten Systemkomponenten samt Messdaten in korrekter Reihenfolge in einem Flussdiagramm veranschaulicht. Auf diese Weise lassen sich etwaige Fehlfunktionen leichter ausmachen. Des Weiteren ist eine Lampenüberwachung hinzugefügt worden, die sowohl die Anzahl der Zündungen als auch die absoluten Brenndauer der einzelnen Lampen dokumentiert. Screenshots dieser beiden Neuerungen befinden sich ebenfalls im Anhang dieser Arbeit. Zu den direkt im Schaltschrank implementierten Sicherheitsabschaltungen kommen zusätzlich softwareinterne Überwachungs- und Abschaltfunktionen hinzu. Zum einen werden die Lampen abgeschaltet, wenn das zweiminütige Mittel der Durchschnittstemperatur am Receiver Ein- oder Austritt höher als 45 °C ist und zum anderen, wenn der Volumenstrom unter den Wert von 200 l/h fällt. Diese beiden Kriterien sollen einer Zerstörung des Receivers aufgrund der Durchbiegung des Absorberrohrs infolge einer Überhitzung vorbeugen. Außerdem ist ein Hochpassfilter für das Steuersignal der Ventilstellung hinzugefügt worden, wodurch dieses sich nicht weiter als 50 % schließen kann, was die Bereitstellung eines gewissen Mindestmassenstroms zur Kühlung des Absorberrohres garantiert. In Abbildung 31 ist das Ablaufschema der überarbeiteten Prüfstandssoftware dargestellt. Die Änderungen zur vorherigen Version sind grün, die Ausgabe der Rohdaten in orange gekennzeichnet.

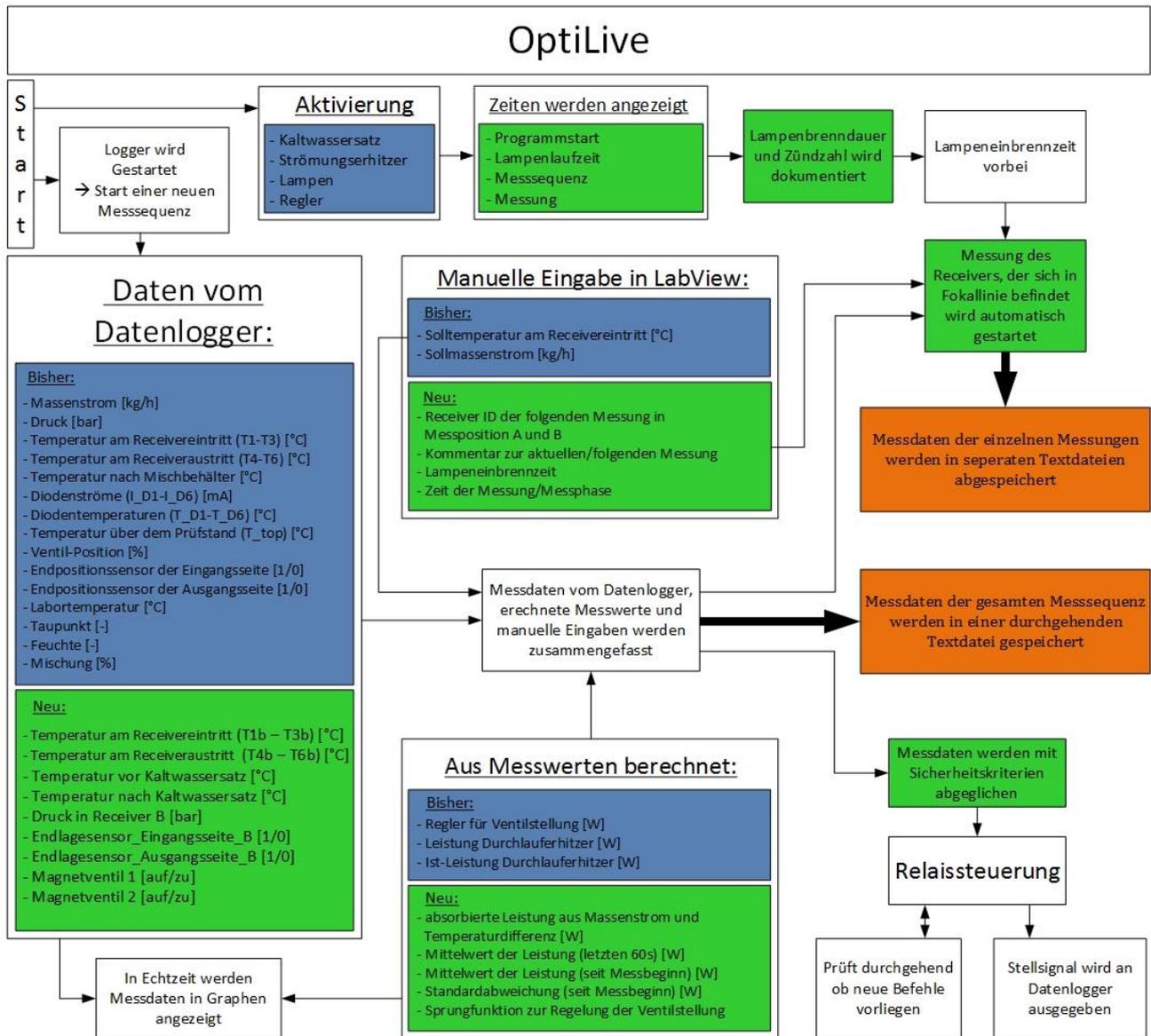


Abbildung 31: Ablaufschema der überarbeiteten Prüfstandssoftware

## 4.3 Weiterentwicklung des Störkörpers

Im Zuge der Prüfstandserweiterung werden zur Vergleichbarkeit der beiden Messpositionen nun zwei Störkörper mit identischen Eigenschaften benötigt. Daher empfiehlt es sich zwei neue Störkörper zu entwerfen, bei denen das Verbesserungspotential, das sich aus den Messungen mit dem bisherigen Störkörper ergab und in Abschnitt 3.4 zusammengefasst ist, umgesetzt wird. Eine geringere Wärmekapazität sowie ein verbesserter Wärmeübergang sollen die Zeit verkürzen, bis sich eine homogene Leistung eingependelt hat, nachdem ein Receiver in die Fokallinie geschoben wird. Außerdem soll eine Anpassbarkeit an verschiedene Absorberrohrinnendurchmesser möglich sein sowie eine eindeutige Position im Receiver definiert werden.

### 4.3.1 Anforderungen

Polyethylen, das Material des bisher eingesetzten Störkörpers, besitzt eine Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von nur 0,33 - 0,57 W/(m·K) [Czi00], jedoch eine sehr hohen spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  von 2100 J/(kg·K). Daher benötigt der Störkörper sehr viel Zeit, bis er die Temperatur seiner Umgebung angenommen hat. Für Messungen bedeutet das, dass die Wärmekapazität des Störkörpers sich erst nach etwa 20 bis 30 Minuten nach dem Einschalten der Lampen vollständig aufgeladen hat. Erst ab dann kann eine genaue Messung der Temperaturänderung des Wassers zwischen Ein- und Austritt erfolgen. Andernfalls würde ein Teil der Energie die von den Lampen emittiert wird, zur Erwärmung des Störkörpers beitragen und nicht bilanziert werden. Die resultierende Temperaturerhöhung des Wassers würde daher geringer ausfallen als sie eigentlich ist und somit würde letztendlich auch die daraus errechnete, absorbierte Leistung des Receivers unterhalb der tatsächlich aufgenommenen Leistung liegen.

Bei dem Absorberrohr hat sich ein Außendurchmesser von 70 mm weitestgehend durchgesetzt. Mit einer Wandstärke von 2 mm liegt der Innendurchmesser damit bei ca. 66 mm. Da der PE Vollstab lediglich in Abstufungen von 5 mm im Durchmesser erhältlich war, entschied man sich für einen 55 mm Stab, um den ein 3 mm starkes Drahtseil gewickelt wurde. Somit erhielt man im Radius einen Spalt von 2,5 mm. Da die Innendurchmesser leicht variieren können und Receiver sich leicht durchbiegen ist etwas Spiel notwendig um einen Störkörper leichtgängig einführen zu können. Zusätzlich wird der Störkörper in zwei Teilen ausgeführt.

Durch eine möglichst turbulente Strömung im Receiver wird die Temperaturverteilung im Strömungsquerschnitt homogenisiert. Zu diesem Zweck bietet es sich an, die helixförmige Strömungsführung hinsichtlich Steigung und Höhe variabel auszulegen.

### 4.3.2 Auslegung

Ein Excel-Tool, zur Berechnung der thermischen Eigenschaften eines Störkörpers wurde im Verlauf der Dissertation von Johannes Pernpeintner [Pern15] erstellt und gibt die Wärmekapazität für verschiedene Störkörpermaterialien und –abmaße an. Außerdem wird die Zeit berechnet, die benötigt wird, bis sich die Wärmekapazität bei aktueller Prüfstandskonfiguration aufgeladen hat. Das Berechnungstool in Excel ist der digitalen Version dieser Bachelorarbeit beigelegt.

Um eine möglichst geringe Wärmekapazität zu erreichen, würde es sich daher anbieten einen hohlen Störkörper zu entwerfen, da Luft zwar eine relativ hohe spezifische Wärmekapazität von  $1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  besitzt, dafür jedoch nur eine sehr geringe Dichte von  $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$  aufweist. Die Wärmekapazität eines Störkörpers aus reiner Luft wäre mit gerade einmal  $12 \text{ J}/\text{K}$  um den Faktor 1500 kleiner als die Wärmekapazität des Störkörpers aus Polyethylen. Als Außenhülle der Luft bietet sich Edelstahl an, da es eine gute Wärmeleitfähigkeit besitzt und es aufgrund des ständigen Kontakts mit Wasser ein korrosionsbeständiges Material sein muss. Außerdem ist Edelstahl stabil genug um eine möglichst geringe Wandstärken und damit ein möglichst geringes Eigengewicht des Störkörpers zu generieren.

### 4.3.3 Konstruktion

Um ein reproduzierbares Design zu erhalten wird zuerst recherchiert, ob es bereits vorhandene Lösungskonzepte aus der Industrie gibt, an die ähnliche Anwendungsanforderungen gestellt sind. Statische Mischer, wie sie beispielsweise in der chemischen Industrie eingesetzt werden, generieren zwar eine turbulente Strömung, verdrängen jedoch nicht genug Wasser, sodass sich der resultierende Wärmeübergang aufgrund der langsameren Strömungsgeschwindigkeit verschlechtern würde.

Einen weiteren Lösungsansatz stellt die Verwendung einer Förderschnecke, wie sie vorrangig in der Nahrungsmittelindustrie zum Einsatz kommen, dar. Diese verfügen über eine helixförmige Schraubenführung und sind individuell herstellbar. Eine bereits erhaltene Angebotsskizze befindet sich im Anhang dieser Arbeit. Das Konzept musste jedoch aufgrund zu hoher Kosten verworfen werden. Außerdem wäre aufgrund der dicken Materialstärke des Edelstahls, das eine spezifische Wärmekapazität von  $\sim 480 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  bei einer Dichte von  $7850 \text{ kg}/\text{m}^3$  besitzt, die gesamte Wärmekapazität des Störkörpers nicht wesentlich verbessert worden.

Ein möglichst dünnwandiges Edelstahlrohr mit verschlossenen Enden, welches zur Generierung einer turbulenten Strömung mit einem Edelstahldrahtseil umwickelt wird, erweist sich daher als erfolgversprechendster Lösungsansatz. Als geeignetes Rohmaterial erweisen sich unbearbeitete PKW Auspuffrohre. Diese Edelstahlrohre verfügen über eine Wandstärke von nur 1,25 mm und

können obendrein in 2 m Zuschnitten geliefert werden, wohingegen die Rohre großer Stahlproduzenten mit einer Mindestwandstärke von 3 mm und Längen von 7 - 8 m deutlich teurer ausfallen.

Da der Störkörper zur leichteren Entnahme aus dem Receiver in zwei Teilen ausgeführt werden soll, bietet es sich an, zwei identische Teilstücke herzustellen. Auf das äußere Ende wird eine Halbkugel aus Edelstahl geschweißt, wodurch sich eine bessere Anströmung im Vergleich zu einer flachen Stirnseite ergibt. Außerdem kann darauf eine Drahtseilklemme befestigt werden, ohne dass diese über den äußeren Durchmesser des Störkörpers hinausragt. Die Befestigung durch eine Drahtseilklemme bietet den Vorteil, dass das Drahtseil hinsichtlich seiner Stärke leicht ausgetauscht werden kann. Dadurch ist kann das Spaltmaß zwischen Störkörper und verschiedenen Innendurchmesser der Absorberrohre leicht variiert bzw. optimiert werden. Zur Entnahme aus dem Receiver eine Augennutter angeschweißt. Das äußere Ende eines Störkörperteilstücks ist in Abbildung 33 dargestellt.



Abbildung 33: Äußeres Ende einer Störkörperhälfte

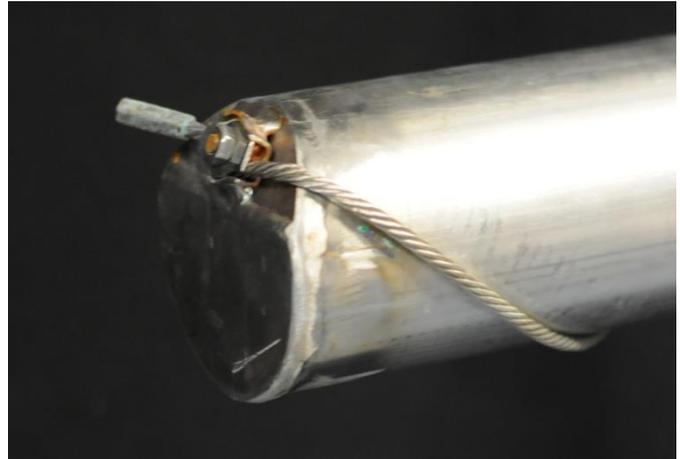


Abbildung 32: Inneres Ende einer Störkörperhälfte



Abbildung 34: Gesamtansicht eines weiterentwickelten Störkörperteilstücks

Um eine durchgehende Strömung zu erhalten und das Volumen an Wasser im Receiver klein zu halten, soll der Abstand zwischen den beiden Störkörperteilstücken in der Mitte des Receivers möglichst gering ausfallen. Daher werden die inneren Enden durch eine flache Ronde verschlossen. Damit jedoch auch eine Drahtseilklemme aufgeschweißt werden kann, ohne den Außendurchmesser des Störkörpers zu vergrößern, wird zuerst ein etwa 20 x 20 mm Stück des Edelstahlrohres in einem Winkel von 45° abgesägt. Durch das Anschweißen zweier Rondenteile entsteht so eine Abschrägung auf der die Drahtseilklemme, wie in Abbildung 32 dargestellt, angebracht werden. In Abbildung 34 ist ein fertiges Störkörperteilstück abgebildet.

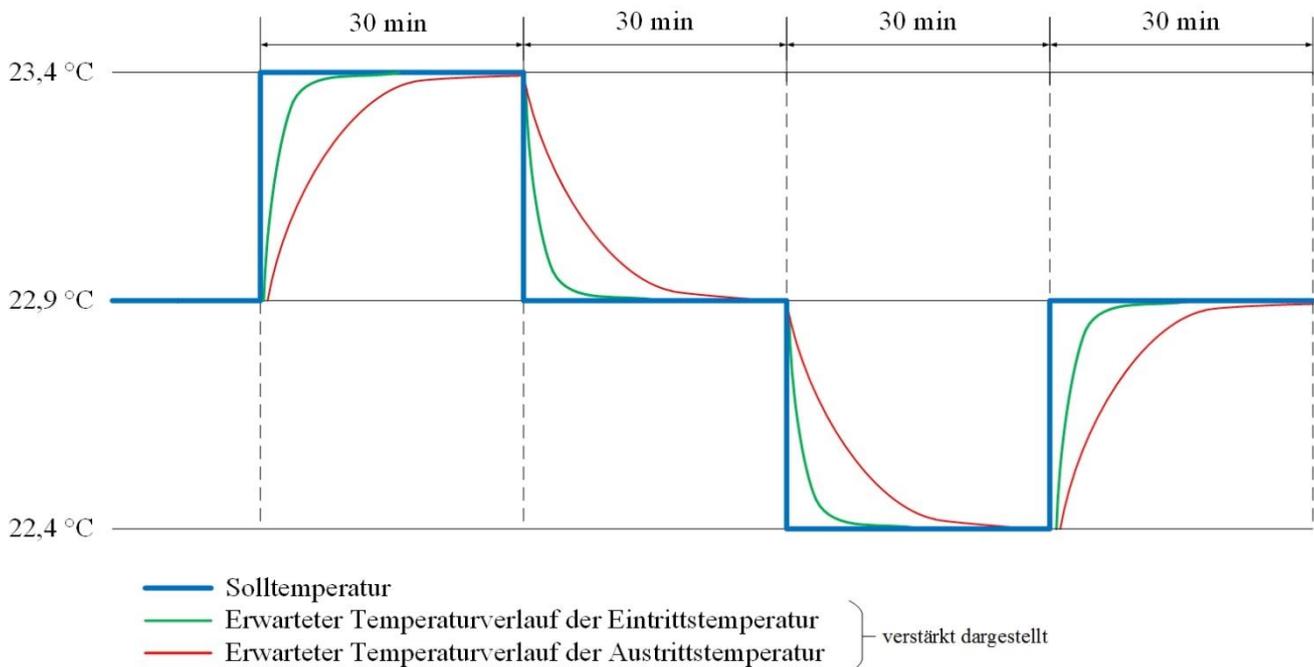
#### **4.3.4 Charakterisierung des neuen Störkörpers**

Um festzustellen, ob der neu entwickelte Störkörper auch in der Praxis die zuvor theoretisch errechnete Verbesserung der Wärmeeigenschaften besitzt, wird eine Validierungsmessung durchgeführt.

##### **4.3.4.1 Ablauf der Charakterisierungsmessung**

Hierfür wird zuerst der alte Störkörper aus Polyethylen in einen Receiver eingesetzt und an den Wasserkreislauf mit einem Massenstrom von 850 kg/h angeschlossen. Das Wasser am Receivereintritt wird auf eine Temperatur von 22,9°C eingestellt, was in etwa der Umgebungstemperatur im Labor entspricht. Außerdem erfolgt die Messung ohne Einschaltung der Lampen sodass möglichst adiabate Bedingungen für den Receiver herrschen. Bei der Validierungsmessung wird die Eintrittstemperatur des Wassers bei konstantem Massenstrom variiert. Es wird gemessen wie lange es dauert, bis die Austrittstemperatur näherungsweise konstant ist, da ein Teil der Erhöhung der thermischen Energie am Eintritt für die Aufladung der Wärmekapazität des Störkörpers gebraucht wird. Erst wenn die Wärmekapazität des Störkörpers vollständig aufgeladen ist, stellt sich auch am Austritt die am Receivereintritt herrschende Temperatur ein. Je höher die Wärmekapazität eines Störkörpers also ist, desto mehr Zeit wird benötigt, bis die Temperatur am Austritt konstant ist.

Um eine Temperaturschwankung aufgrund des Kaltwassersatzes zu vermeiden, wird der Temperatursprung ausschließlich durch den Durchlauferhitzer erzeugt. Wie in Abbildung 35 zu erkennen, ist die Messung in vier Intervalle von jeweils 30 Minuten aufgeteilt. Es wird bei einer Temperatur von 22,9°C gestartet und gewartet bis die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt ein Minimum erreicht hat. Dann wird die Temperatur um 0,5 K auf 23,4°C erhöht. Nach einer Wartezeit von 30 Minuten wird wieder die Ausgangstemperatur eingestellt, die dann nach weiteren 30 Minuten erst um 0,5 K auf 22,4°C gesenkt und schließlich wieder zurück auf 22,9°C erhöht wird. Auf diese Weise lässt sich an vier Stellen die verzögerte Veränderung der Austrittstemperatur feststellen. Dabei pendeln sich die Temperaturen zweimal nach einem Temperaturanstieg sowie zweimal nach einer Temperaturabsenkung ein, was verhindern soll, dass ein möglicher Offset, also ein systematischer Fehler, Einfluss auf die Messergebnisse hat.



**Abbildung 35: Ablaufschema der Charakterisierungsmessung**

Anschließend wird die gesamte Messreihe mit dem neuen Störkörper wiederholt. Aufgrund seiner geringeren Wärmekapazität sowie verbesserter Wärmeleitfähigkeit, wird erwartet, dass sich die Austrittstemperatur schneller an eine veränderte Eintrittstemperatur anpasst, als es mit dem alten Störkörper der Fall war.

#### 4.3.4.2 Auswertung und Ergebnisse

Da die Leistung des Receivers unmittelbar von der Temperaturdifferenz zwischen Reivereintritt und –austritt abhängt, kann die Zeit bis sich die Temperaturen angeglichen haben, durch das Erreichen einer minimalen Leistung ermittelt werden. Aufgrund von Reibungsverlusten oder einer unzureichend genauen Kalibration der Temperaturmessfühler, wird eine geringe Temperaturdifferenz jedoch bestehen bleiben, weshalb auch die errechnete Leistung einen Offset, also einen systematischen Messfehler, aufweist. Zusätzlich sorgen unter anderem Schwankungen der Strömung oder auch der eingesetzten Messtechnik dafür, dass ein leichtes Rauschen der Messwerte selbst im eingependelten Zustand erhalten bleibt. Daher wird ein Leistungsband definiert, welches  $\pm 3 \text{ W}$  um den Näherungswert der Leistung gelegt wird. Zur Bestimmung der Aufladezeit der Wärmekapazität wird nun die Zeit gemessen, bis nach Einstellung einer neuen Eintrittstemperatur, die Leistung das zuvor definierte Leistungsband nicht mehr verlässt. Das Leistungsband um die angenäherte Leistung ist in den nachfolgenden Diagrammen in orange dargestellt. In Abbildung 36 bis 38 sind die ersten drei Temperatursprünge beim alten Störkörper aus Polyethylen abgebildet. Der vierte Sprung von  $22,4 \text{ C}$  zurück auf  $22,9 \text{ C}$  wurde beendet, bevor sich ein konstantes Leistungsniveau eingependelt hat, wodurch dieser Sprung nicht für die Auswertung herangezogen werden kann. Grundsätzlich weisen die Sprünge jedoch einen sehr ähnlichen Verlauf auf.

In den Diagrammen ist die Eintrittstemperatur in grün, sowie die Austrittstemperatur des Wassers in rot aufgetragen. Das zweiminütige, gleitende Mittel der absorbierten Leistung ist in blau dargestellt. Zur Ermittlung der konvergierenden Leistung, die für die Positionierung des Leistungsbandes erforderlich ist, wird außerdem der Mittelwert über die letzten 5 Minuten der Messung gebildet.

Dass dieser Wert wie etwa beim ersten Sprung mit  $-9,81 \text{ W}$  negativ ausfällt, liegt an den zuvor beschriebenen Messungenauigkeiten. Für den ersten Sprung wird das definierte Leistungsband nach einer Verzögerungszeit von  $t_{v,1} = 13,3$  Minuten nach der ersten Änderung der Austrittstemperatur nicht mehr verlassen. Für die Sprünge zwei und drei ergeben sich Verzögerungszeiten von  $t_{v,2} = 10,7$  Minuten und  $t_{v,3} = 11,2$  Minuten. Somit ergibt sich eine mittlere Verzögerungszeit von  $11,7$  Minuten. Es fällt jedoch auf, dass fast über die gesamte Messzeit von 30 Minuten eine geringe, konstante Leistungsänderung und damit eine geringe Änderung der Temperaturdifferenz bestehen bleibt.

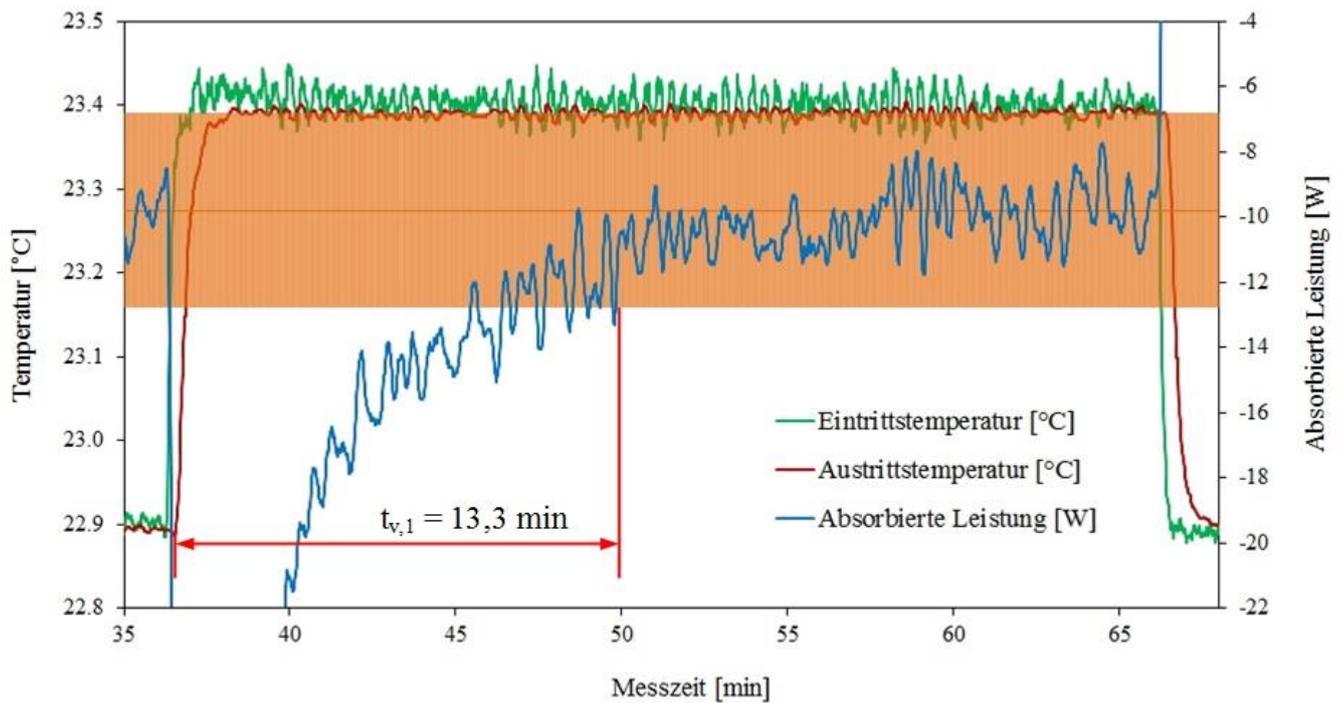


Abbildung 36: Störkörper aus Polyethylen – 1. Temperatursprung von 22,8°C auf 23,4°C

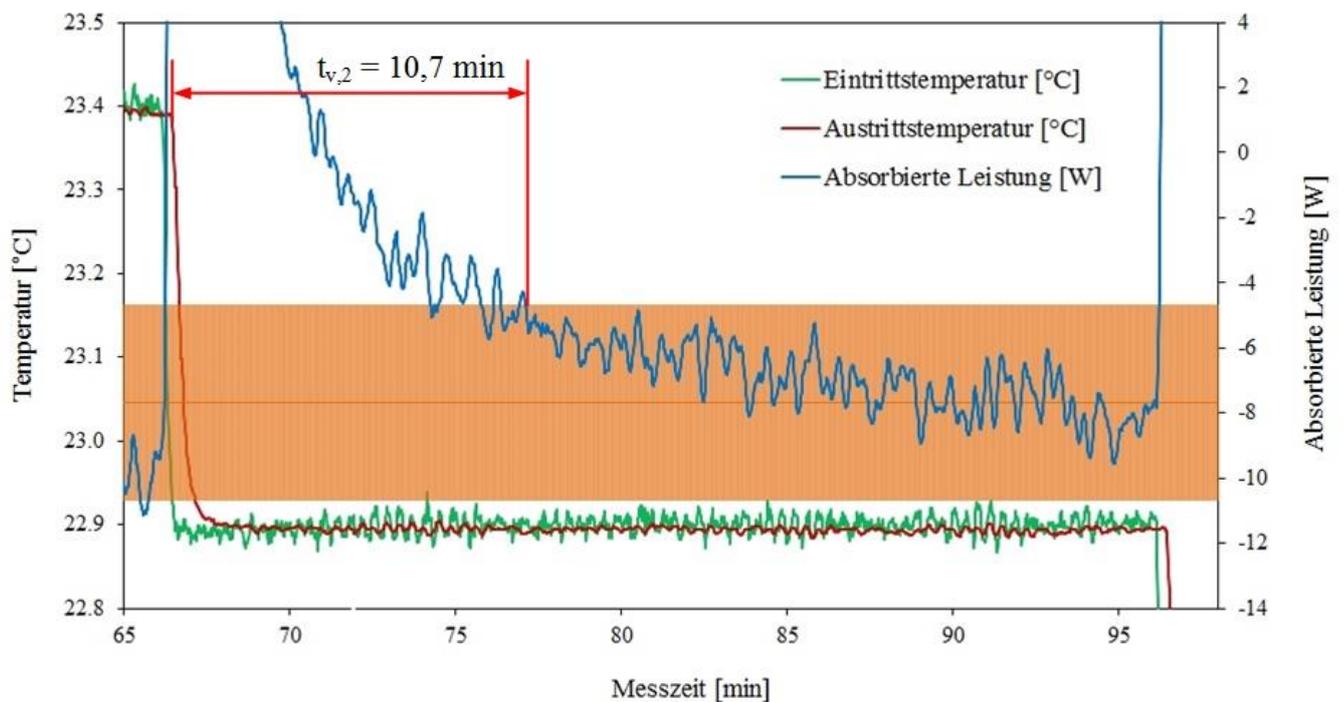


Abbildung 37: Störkörper aus Polyethylen – 2. Temperatursprung von 23,4°C auf 22,9°C

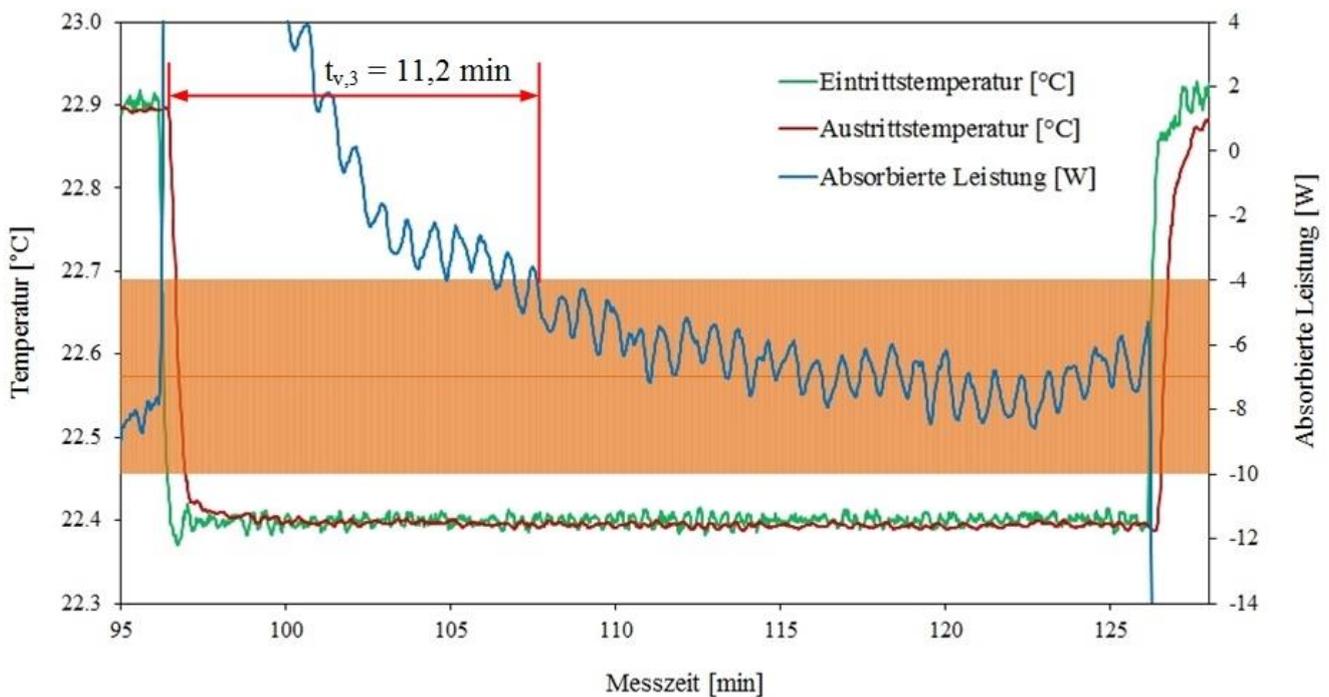


Abbildung 38: Störkörper aus Polyethylen – 3. Temperatursprung von 23,9°C auf 22,4°C

Die vier Temperatursprünge der Messungen mit dem neuen Störkörper aus Edelstahl sind auf den folgenden Seiten in Abbildung 39 bis 42 dargestellt. Der Leistungsverlauf folgt hierbei dem Temperatursprung deutlich schneller. Das  $\pm 3$  W um den Mittelwert gelegene Leistungsband wird demnach schon nach einer Zeit von nur noch  $t_{v,1} = 3,2$  Minuten,  $t_{v,2} = 2,9$  Minuten,  $t_{v,3} = 2,8$  Minuten und  $t_{v,4} = 3,0$  Minuten erreicht. Somit ergibt sich eine mittlere Verzögerungszeit von etwa 3 Minuten. Außerdem fällt auf, dass bereits nach kurzer Zeit die Leistung konstant um einen Mittelwert schwankt und keine anhaltende, monotone Änderung bestehen bleibt, wie es bei dem alten Störkörper aus Polyethylen zu beobachten war. Durch die Charakterisierungsmessung konnte also gezeigt werden, dass der neue Störkörper aus Edelstahl die zuvor berechneten, verbesserten thermischen Eigenschaften auch in der Praxis besitzt. Die Vorlaufzeit einer Messung kann demnach etwa um den Faktor 4 verringert werden, wodurch sich der Zeitaufwand für zukünftige Receivermessungen erheblich verkürzt.

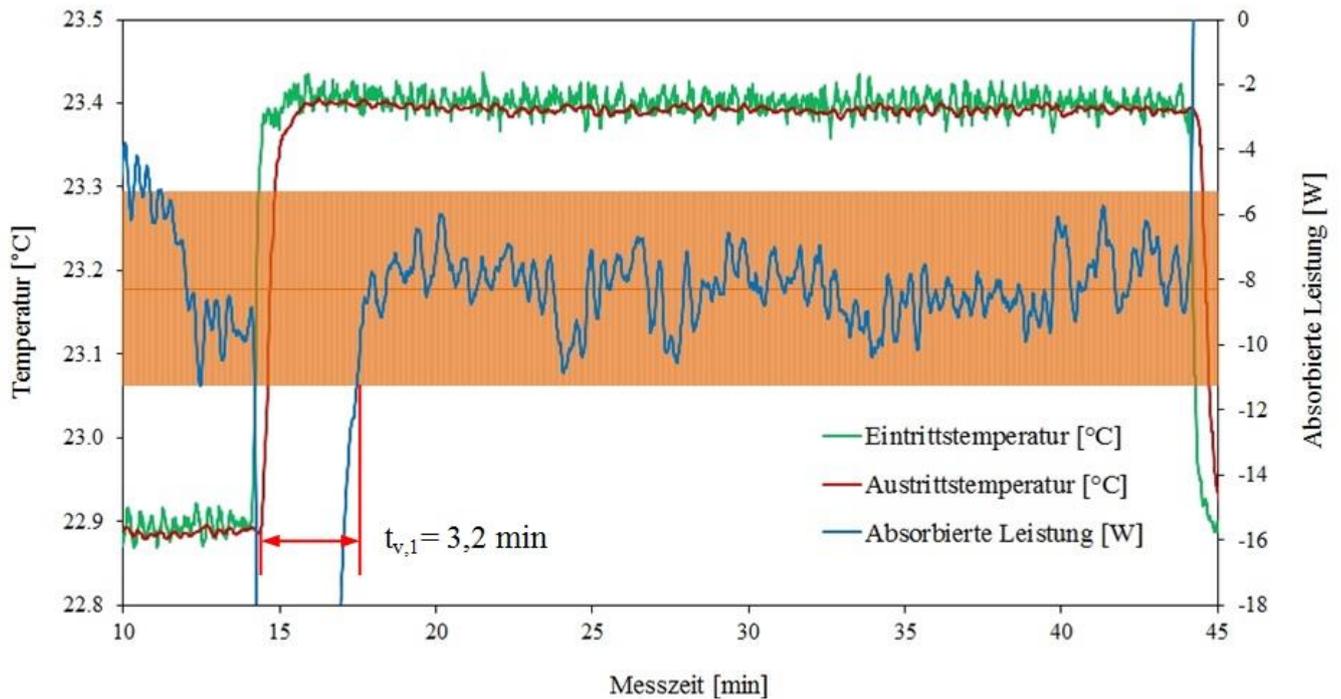


Abbildung 39: Störkörper aus Edelstahl – 1. Temperatursprung von 22,9°C auf 23,4°C

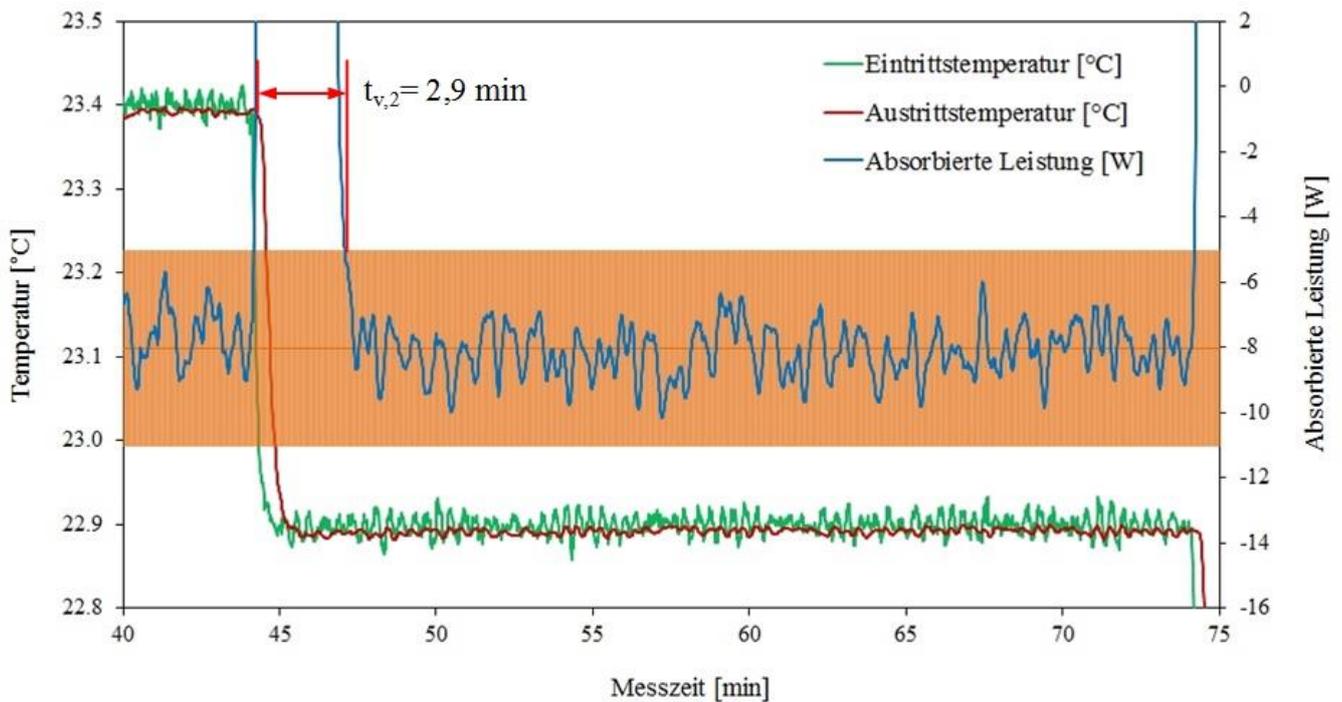


Abbildung 40: Störkörper aus Edelstahl – 2. Temperatursprung von 23,4°C auf 22,9°C

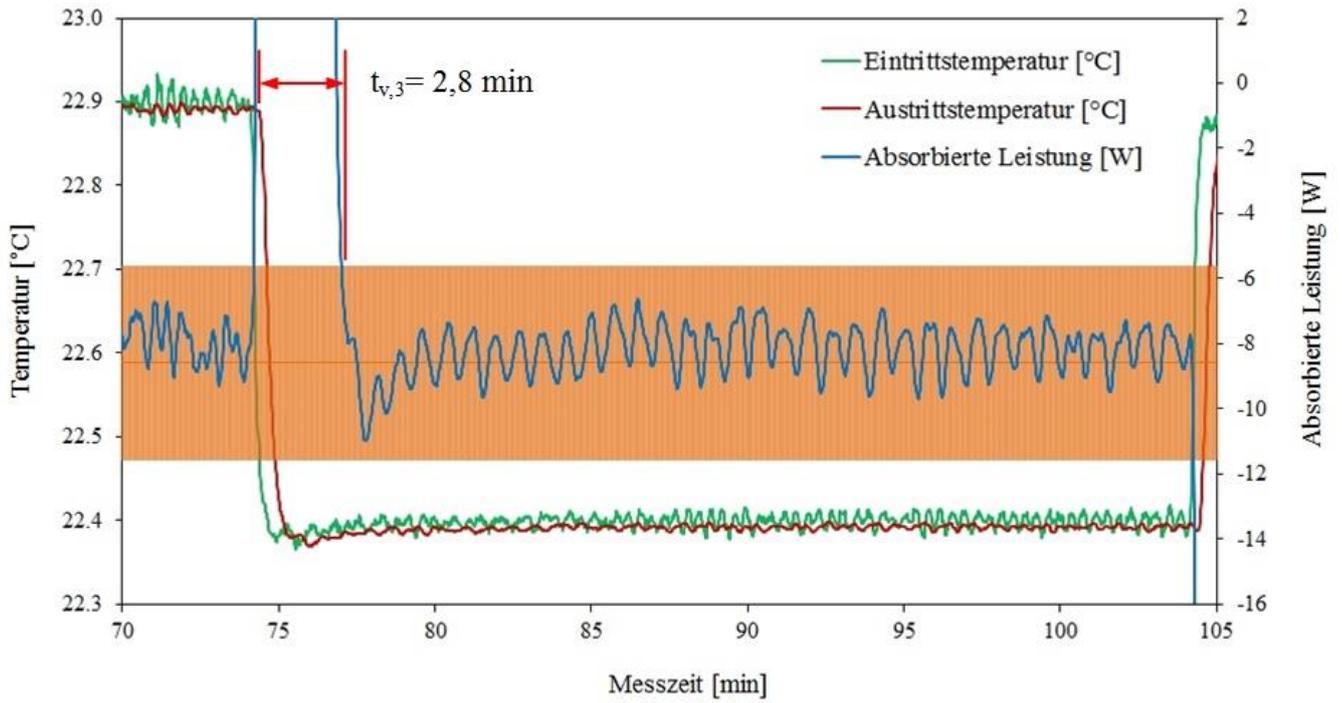


Abbildung 41: Störkörper aus Edelstahl – 3. Temperatursprung von 22,9°C auf 22,4°C

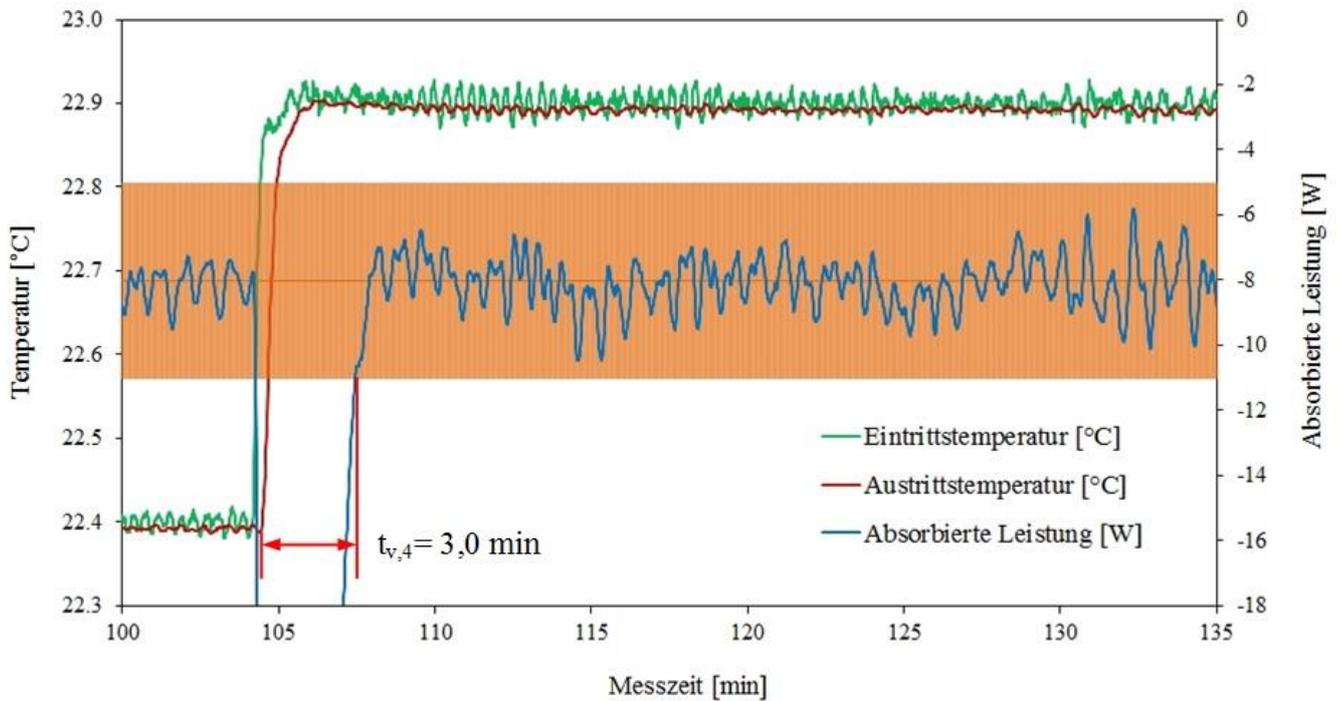


Abbildung 42: Störkörper aus Edelstahl – 4. Temperatursprung von 22,4°C auf 22,9°C

## 4.4 Charakterisierung der Prüfstandserweiterung

Nach der Erweiterung des Sonnensimulatorprüfstands *OptiRec* sollen die aktuellen Messbedingungen abschließend durch eine Reihe von Messungen charakterisiert werden. Zu aller erst wird hierfür die Reproduzierbarkeit einer Receivermessung ohne Receiverwechsel in der neuen Messposition untersucht. Zu diesem Zweck wird ein Receiver mehrfach hintereinander vermessen, wobei dieser zur Abkühlung zwischen den Messungen aus der Fokallinie gezogen wird, jedoch in der Messposition eingebaut bleibt. Des Weiteren wird der Einfluss eines Receiverwechsels in Messposition A auf eine zeitgleich in Messposition B durchgeführte Receivermessung untersucht. Entscheidend ist hierbei, ob leichte Erschütterungen, die beim Ausbau des Receivers in Messposition A entstehen können, in der Leistungsmessung von Messposition B erkennbar sind. Während der darauffolgenden Messungen wird der Receiver zwischen jeder Messung aus- und wieder eingebaut, um den Einfluss eines Receiverwechsels auf die gemessene Leistung bewerten zu können. Abschließend wird die Reproduzierbarkeit einer relativen Messung untersucht, indem die unmittelbar aufeinander folgenden Messungen in Messposition A und B in Relation zueinander ausgewertet werden, da dies dem späteren Messbetrieb am nächsten kommt.

Zur Bewertung der Güte einer Receivermessung sind bereits einige Kriterien definiert worden. So darf die mittlere Leistung der ersten Referenzmessung nicht mehr als 0,3 % von der zweiten Referenzmessung, der letzten Messung des Tages abweichen. Eine höhere Abweichung ist ein Indiz für inhomogene Messbedingungen und die an dem Tag durchgeführten Messungen müssen verworfen werden. Des Weiteren gilt eine Messung als ungültig, wenn der durchschnittliche Massenstrom während der Messphase um mehr als 5 kg/h vom Sollwert abweicht, oder aber die Eintrittstemperatur am Receiver in diesem Zeitraum mehr als 0,1 K um die mittlere Eintrittstemperatur schwankt.

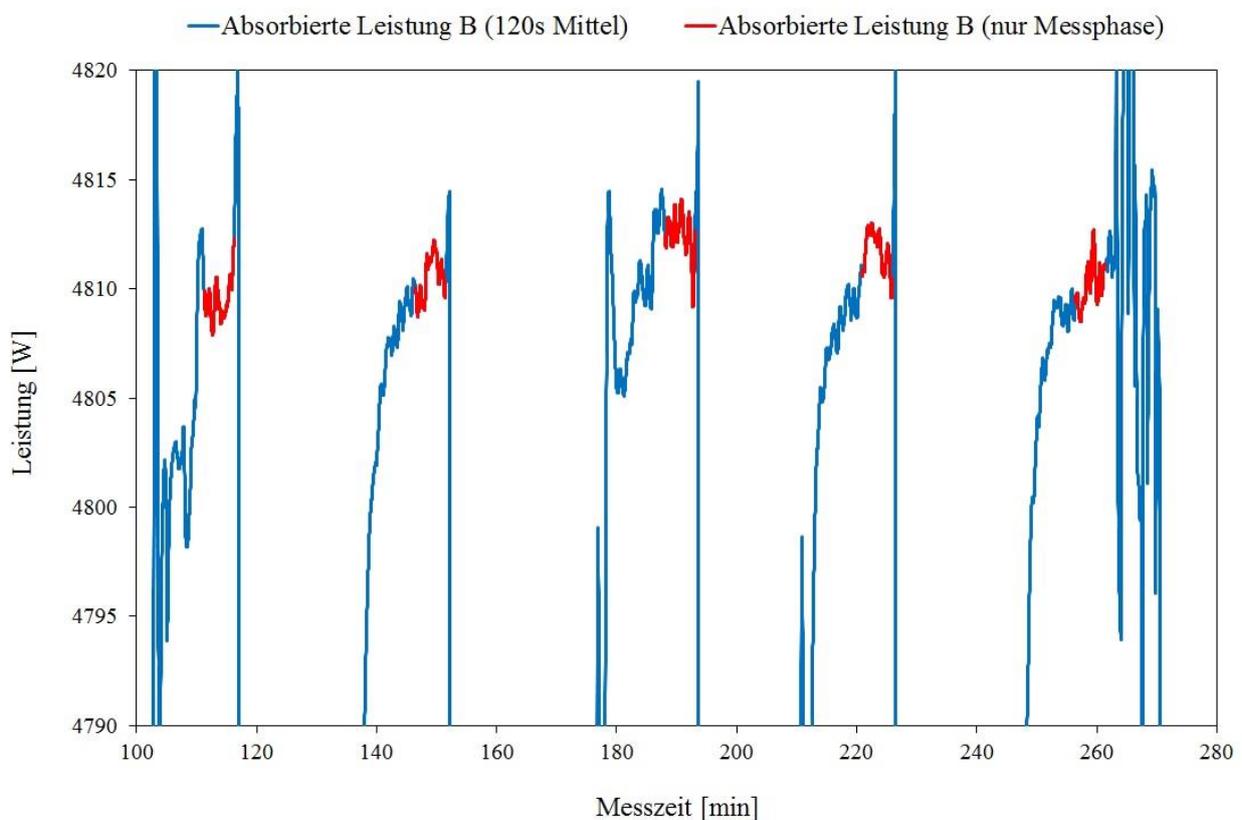
### 4.4.1 Reproduzierbarkeit einer absoluten Messung ohne Receiverwechsel

Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit der neuen Messposition wird ein Receiver wiederholt gemessen ohne ausgebaut zu werden. Zudem wird der Receiver nach jeder Messung aus der Fokallinie geschoben während die Lampen eingeschaltet bleiben. Für die Messung wird eine Messzeit von 15 Minuten festgelegt. Diese teilt sich in eine 10 minütige Vorlaufzeit sowie eine 5 minütige Messphase auf.

In Abbildung 43 ist der gesamte Verlauf der gemittelten, absorbierten Leistung des Receivers in Position B in blau dargestellt. Rot markiert sind die Abschnitte der Messphasen, aus denen schließlich der Mittelwert der Leistung als Ergebnis der Messung gebildet wird. Für die Darstellung

der Leistung wurde das gleitende Mittel der vergangenen zwei Minuten gewählt. Die vereinzelt starken Ausschläge der gemittelten Leistung sind Folge der Regelung des Massenstroms. Da die Regelung des Stellventils keine kleinschrittigen Änderungen umsetzen kann, wird das Ventil kurzzeitig weit geöffnet um schließlich die errechnete Ventilstellung einzunehmen.

Die gemittelten Leistungen der fünf Messungen sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Standardabweichung der Messreihe beträgt 1,6 W, was einer relativen Standardabweichung von 0,034%, bezogen auf die gemittelte Leistung über alle Messphasen hinweg, entspricht. Im Vergleich dazu beträgt die Standardabweichung der Reproduzierbarkeit im *ElliRec* 0,16 % bei  $1\sigma$  [Ant12], was bei einer durchschnittlich absorbierten Leistung von 6500 W einer absoluten Standardabweichung von etwa 10 W entspricht.



**Abbildung 43: Reproduzierbarkeit der absorbierten Leistung in Messposition B bei wiederholtem Verschieben des Receiverwagens ohne Receiverwechsel**

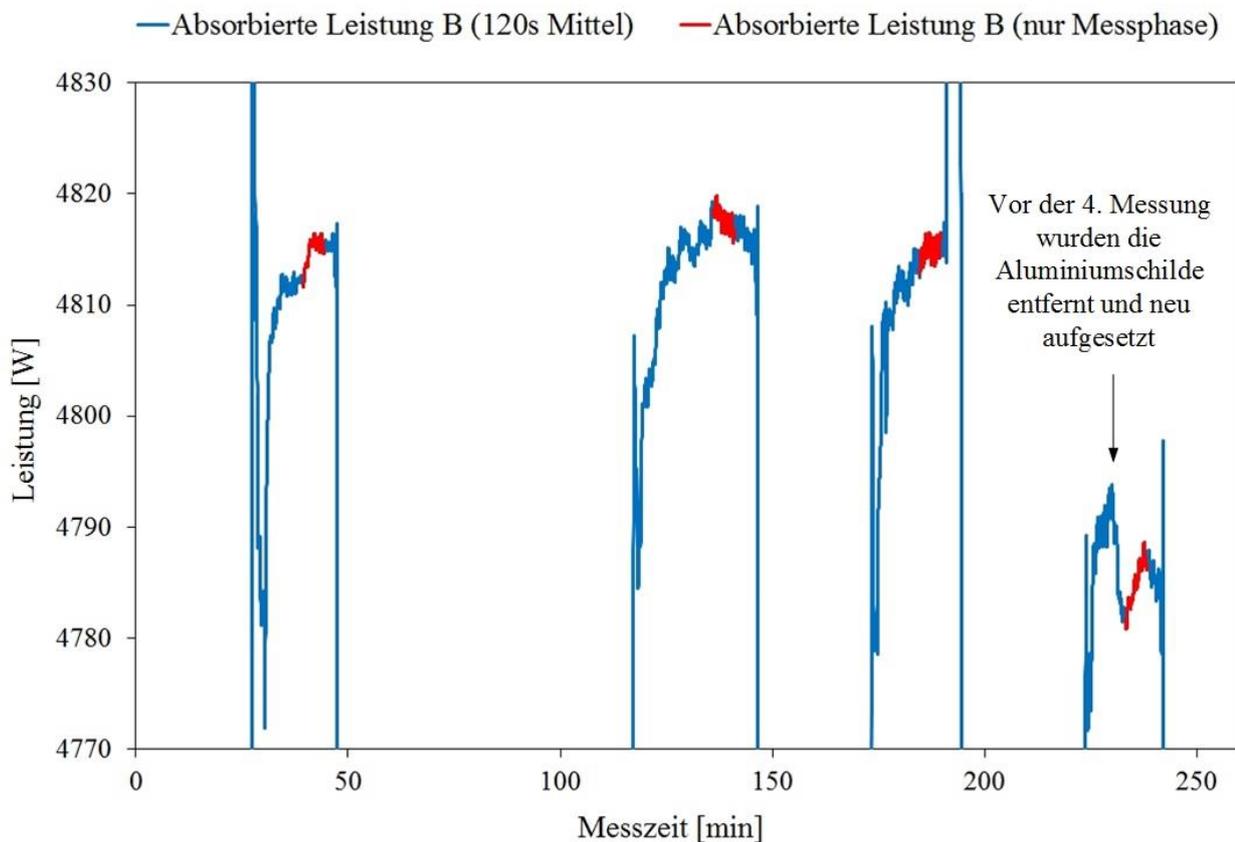
**Tabelle 1: Mittlere Leistung bei wiederholter Messung ohne Receiverwechsel**

Nummer der Messung [-]	1	2	3	4	5
Mittlere Leistung [W]	4810,1	4810,6	4812,4	4811,7	4810,2

Während der darauf folgenden vier Messungen wurde der Receiver in Messposition A ausgetauscht, um den Einfluss auf die parallel durchgeführte Receivermessung in Messposition B zu untersuchen. Vor der vierten Messung wurden außerdem die Aluminiumschilde, die die Messtechnik in den Receiverhalterungen vor der Hitze der Lampen schützt, abgenommen und erneut aufgesetzt um den Einfluss dieses Umbaus zu untersuchen. Der Verlauf der absorbierten Leistung weist dabei für die ersten drei Messungen keine auffällige Änderung zu den vorherigen Messungen auf, wie in Abbildung 44 zu erkennen ist.

Die mittleren Leistungen fallen mit 4814,9 W; 4817,7 W und 4815,0 W geringfügig höher aus als der zuvor errechnete Mittelwert. Dies könnte dadurch zu erklären sein, dass während eines Receiverwechsels ein lichtundurchlässiger Vorhang zwischen den beiden Messpositionen vor der Strahlung der Lampen schützt. Die dadurch verminderte Luftzirkulation könnte eine höhere Temperatur im Prüfstand und damit eine stärkere Erwärmung des Wassers zur Folge haben, weshalb der Einfluss im Anschluss an diese Arbeit noch genauer untersucht werden sollte.

Die Standardabweichung der drei Messungen beträgt jedoch ebenfalls nur 1,6 W oder 0,033 %.



**Abbildung 44: Validierungsmessung - Messgenauigkeit der Messposition B während Receivertausch in Messposition A**

Für die verwendeten Aluminiumschilde gibt es noch keine fest definierte Form oder Position, wodurch die Verschattung und Reflexion, die sie hervorrufen, bei jeder Messung anders ausfallen kann. Bei diesem einmaligen Versuch sank die mittlere Leistung um etwa 30 W auf 4784,9 W, weshalb der Einfluss durch weitere Messungen noch genauer untersucht werden sollte.

#### 4.4.2 Reproduzierbarkeit mit Receiverwechsel

Um die Reproduzierbarkeit mit Receiverwechsel zu bestimmen wird der Receiver in der nächsten Messreihe zwischen den Messungen ausgebaut. Während dem Betrieb des Prüfstands ist ein Receiverwechsel nur in Messposition A möglich. Aus diesem Grund wird die Messung in dieser Messposition durchgeführt.

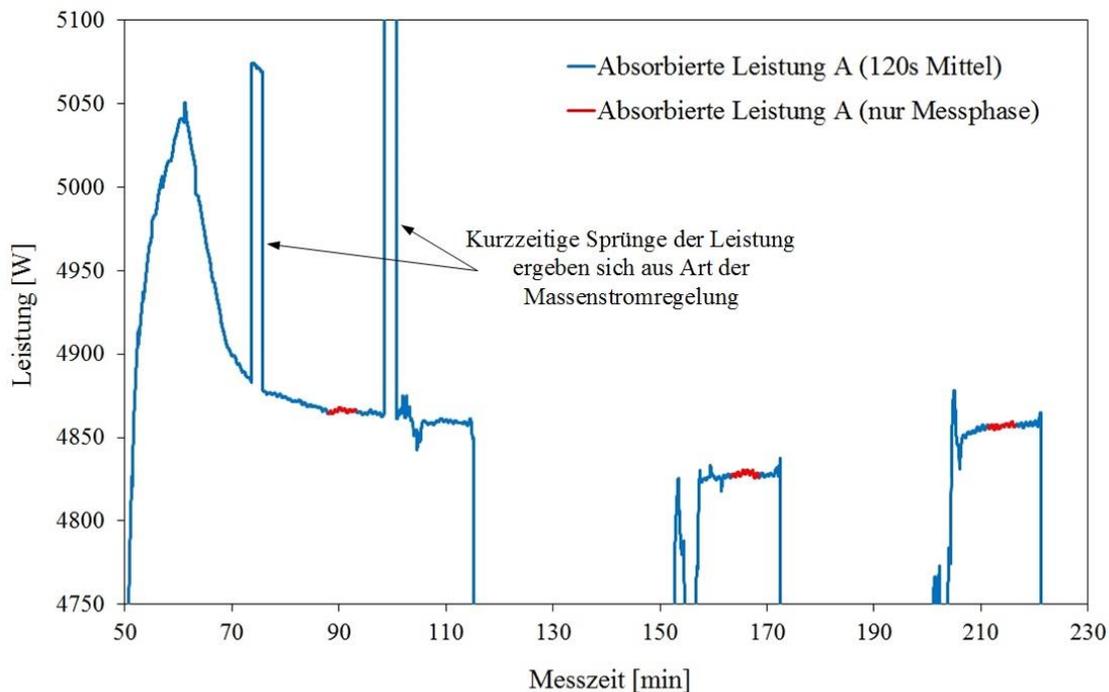
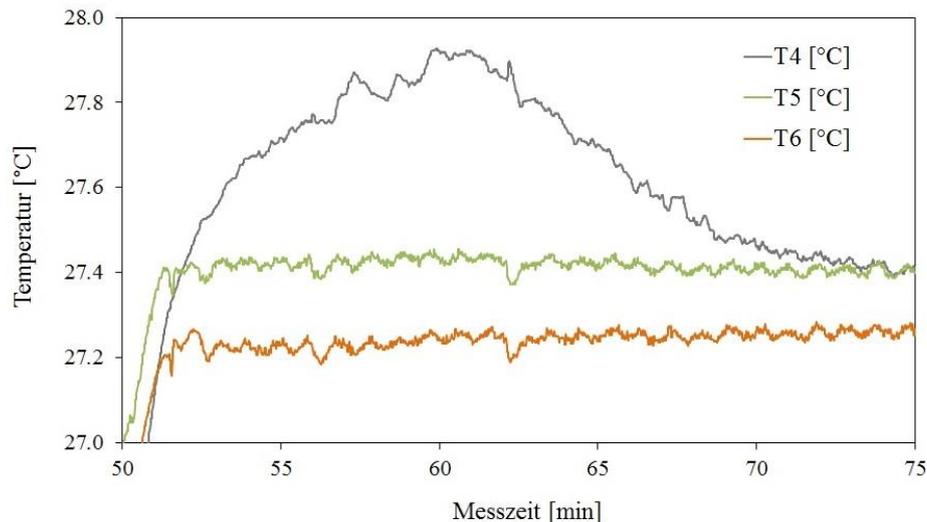


Abbildung 45: Reproduzierbarkeit mit Receiverausbau zwischen den Messungen

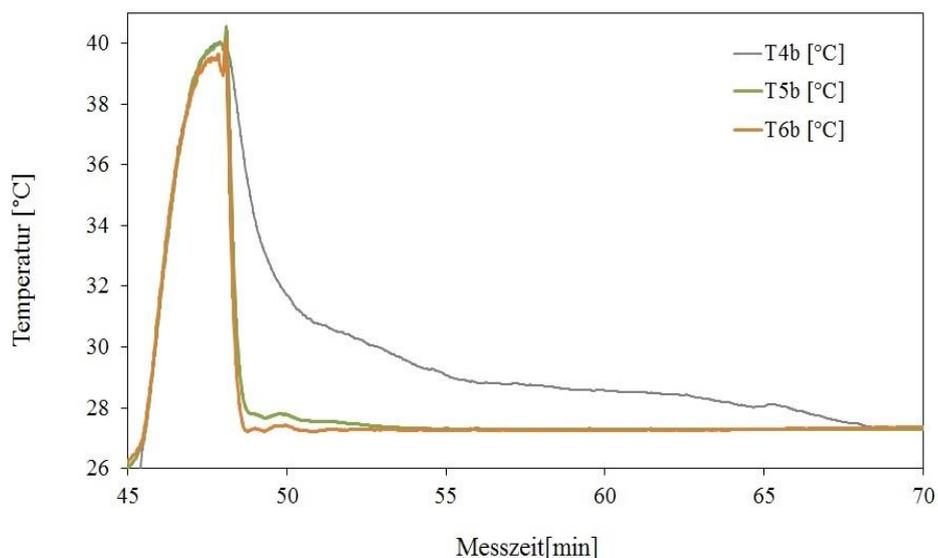
Die drei Messungen zwischen denen je ein Aus- und Einbau des Receivers stattgefunden hat, ergaben eine mittlere Leistung von 4866 W; 4828 W und 4857 W, was einer Standardabweichung von 20 W oder auch 0,41 % entspricht. Diese Leistungsabweichungen liegen im Rahmen des zuvor untersuchten Einflusses der Aluminiumschilde, die bei einem Receiverausbau ebenfalls entfernt und neu aufgesetzt werden müssen. Ob ein Receiver nach einem Ausbau also noch das Kriterium für eine gültige Messung von 0,3 % erfüllt, kann erst festgestellt werden, nachdem der Einfluss der Aluminiumschilde durch Optimierung von Geometrie und Oberflächeneigenschaften minimiert wurde. Da die Abweichungen aber in etwa dieselbe Größenordnung aufweisen, ist davon auszugehen, dass die Aluminiumschilde einen größeren Einfluss auf die Reproduzierbarkeit haben, als der übrige Umbauprozess.

Wie in Abbildung 46 zu sehen steigt die mittlere Leistung zwischen Minute 50 und 60 der Messsequenz erst stark an und fällt dann über einen Zeitraum von 40 bis 50 Minuten langsam ab. Nach genauerer Betrachtung der Austrittstemperaturen, die in Abbildung 47 dargestellt sind, wird ersichtlich, dass der Kabeltemperaturfühler T4, über diesen Zeitraum eine deutlich höhere Temperatur gemessen hat als die Kabeltemperaturfühler T5 und T6. Dies führt zu einer höheren, gemittelten Austrittstemperatur und damit auch zu einer zu hohen Leistung.



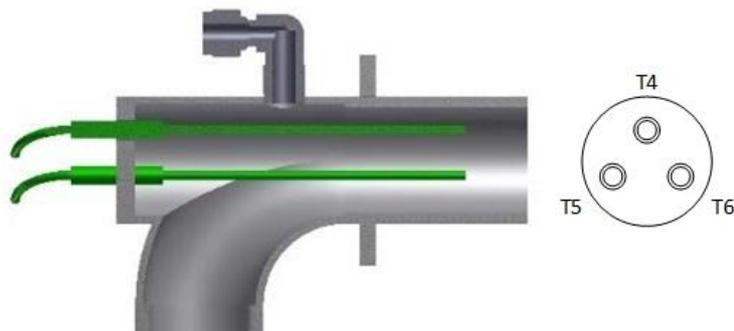
**Abbildung 46: Temperaturverlauf der einzelnen Temperaturmessfühler der Austrittsseite von Messposition A**

Ein ähnlicher Verlauf konnte bei einigen Probemessungen auch in Messposition B beobachtet werden. In Abbildung 47 ist ein solcher Verlauf der Austrittstemperaturen beispielhaft dargestellt. Auch hier wird die abweichende Temperatur vom Kabeltemperaturfühler Nummer 4 erfasst.



**Abbildung 47: Temperaturverlauf der einzelnen Temperaturmessfühler der Austrittsseite von Messposition B**

Nach Betrachtung der Positionen der einzelnen Kabeltemperaturfühler in der Receiverhalterung, wie sie in Abbildung 48 dargestellt sind, fällt auf, dass die Temperaturabweichungen von dem oberen Temperaturfühlern erfasst wurde. Dies lässt darauf schließen, dass sich Luft in der Receiverhalterung befand, die aufgrund unterschiedlicher thermischer Eigenschaften gegenüber dem Wasser für die verzögerte Abkühlung verantwortlich ist. Da die Luft aus den Receivern nach einem Wechsel über die Luftablassventile abgelassen wird, ist anzunehmen, dass sich irgendwo im Leitungssystem Luft ansammelt. Diese löst sich im Laufe des Prüfstandbetriebs und sammelt sich an der höchsten Stelle des Wasserkreislaufs.



**Abbildung 48: Position der Kabeltemperaturfühler in der Receiverhalterung der Austrittsseite**

Eine Möglichkeit dieses Problem zu beheben ist die Installation eines oder mehrerer Steigrohre im Leitungssystem, die über den bisher höchsten Punkt hinausragen, in denen sich die Luft dann ansammeln kann. Auf diese Weise kann Luft im Wasserkreislauf erkannt und bei Bedarf, auch während des Betriebs des Prüfstands, abgelassen werden.

### 4.4.3 Reproduzierbarkeit einer relativen Messung ohne Receiverwechsel

Da im späteren Messbetrieb die Leistung eines Prüflings immer auf die Leistung eines Referenzreceivers bezogen wird, soll im Folgenden die Abweichung der einzelnen Referenzmessungen untersucht werden.

Hierfür wird in jede der beiden Messpositionen ein Receiver eingebaut und dessen Leistung im Wechsel gemessen. Der Ablauf einer einzelnen Messung entspricht denen der zuvor durchgeführten Charakterisierungsmessungen. Der Receiver in Messposition B wird als Referenzreceiver festgelegt. Die mittleren Leistungen sind in der Reihenfolge, in der sie gemessen wurden, in Diagramm Abbildung 49 dargestellt. Die mittleren Leistungen des Referenzreceivers sind blau, die des Prüfreceivers grün.

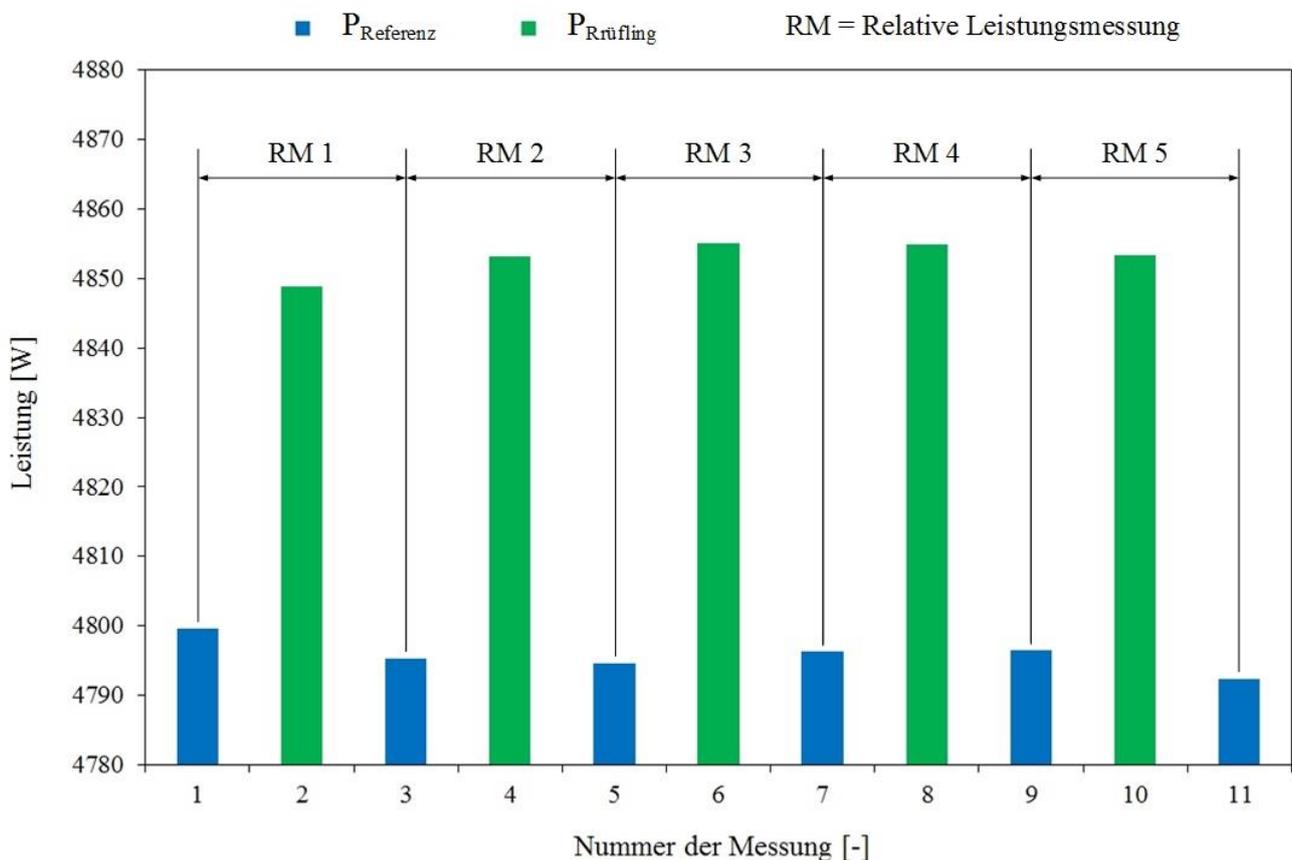


Abbildung 49: Übersicht der relativen Leistungsmessungen

Eine relative Leistungsmessung setzt sich aus einer Messung des Prüfreceivers, sowie der zuvor und im Anschluss durchgeführten Referenzmessungen zusammen. Zur Auswertung wird der Mittelwert der beiden Referenzmessungen gebildet und der Quotient mit der Leistung des Prüflings berechnet. Die Ergebnisse der fünf relativen Messungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2: Differenz der Leistungen des Prüflings zum Mittelwert der zuvor und im Anschluss durchgeführten Referenzmessungen**

Nr. [-]	$P_{\text{Referenz}}$ [W]	$P_{\text{Prüfling}}$ [W]	Mittelwert der Referenzmessungen [W]	Quotient aus $P_{\text{Prüfling}}$ und gemittelter $P_{\text{Referenz}}$ [W]
1	4799,6			
2		4848,9	4797,4	1.01073
3	4795,2			
4		4853,2	4794,9	1.01217
5	4794,5			
6		4855,1	4795,4	1.01244
7	4796,3			
8		4854,9	4796,4	1.01220
9	4796,5			
10		4853,4	4794,4	1.01230
11	4792,4			
	4795,8	4853,1	4795,7	1.01197

Über alle fünf relativen Leistungsmessungen hinweg ergibt sich so ein mittlerer Quotient von 1,01197, was einer relativen Standardabweichung von 0,07 % entspricht.

Die erste Messung des Prüfreceivers fiel etwas geringer aus als die darauf folgenden. Bei genauerer Betrachtung des Leistungsverlaufs, dessen Diagramm sich im Anhang dieser Arbeit befindet, fällt auf, dass die Leistung über die gesamte Messphase hinweg angestiegen ist. Dies spricht für noch nicht vollständig homogene Messbedingungen, wodurch die Standardabweichung unter Ausschluss dieser Messung sogar nur noch 0,012 % beträgt.

Die Quotienten der beiden Referenzmessungen einer relativen Leistungsmessung sind in Tabelle 3 aufgelistet. Die maximale relative Abweichung beträgt bei dieser Messreihe 0,091 %. Damit wird das bisher im *ElliRec* angewandte Kriterium für eine gültige Messung, das eine maximale Abweichung von 0,3 % erlaubt, eingehalten. Über alle fünf relativen Leistungsmessungen hinweg ergibt sich eine mittlere relativen Abweichungen von 0,047 % und liegt damit in etwa im Bereich des 6-fachen unter dem bisherigen Kriterium von 0,3 %.

**Tabelle 3: Differenz der beiden Referenzmessungen einer relativen Leistungsmessung**

Nr. [-]	$P_{\text{Referenz}}$ [W]	$P_{\text{Prüfling}}$ [W]	Quotient der Referenzmessungen	
			[-]	[%]
1	4799,6			
2		4848,9	1.00091	0.092
3	4795,2			
4		4853,2	1.00015	0.015
5	4794,5			
6		4855,1	0.99963	-0.037
7	4796,3			
8		4854,9	0.99996	-0.004
9	4796,5			
10		4853,4	1.00086	0.086
11	4792,4			
			0.047	

Damit kann gezeigt werden, dass der Prüfstand nach der Erweiterung um eine zweite Messposition bei einer Messung ohne Receiverwechsel, das bisherige Kriterium für eine gültige Messung einhält. Bevor die neu implementierte Messmethodik zur Bestimmung der optischen Eigenschaften von Parabolrinnenreceivern jedoch zukünftig angewandt werden kann, muss zuvor noch die Reproduzierbarkeit nach einem Receiverwechsel untersucht werden. Insbesondere der Einfluss der Aluminiumschilde scheint dabei ein wichtiger Faktor zu sein.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit ist am Sonnensimulatorprüfstand *OptiRec* eine neue Messmethodik implementiert worden. Bei dieser werden die Leistungen des Prüf- und Referenzreceivers nun bei kontinuierlichem Lampenbetrieb in einer durchgängigen Messsequenz bestimmt. Dadurch kann die Lampeneinbrennzeit eingespart werden, die bisher etwa drei Viertel der Messzeit ausmachte.

Zu diesem Zweck wurde dem Prüfstand eine zweite Messposition hinzugefügt, in die ein Referenzreceiver eingebaut wird. Dadurch fällt der Einbau des Referenzreceivers vor und nach jeder Messung weg, woraus eine zusätzliche Zeitersparnis sowie eine Erhöhung des Bedienkomforts und der Arbeitssicherheit resultieren. Der Prüfling kann zukünftig während der Messung des Referenzreceivers ausgewechselt werden, wodurch eine fortlaufende Leistungsmessung ohne Zeitverlust erreicht wird.

Bei der Konstruktion der neuen Receiverhalterungen wurden die wesentlichen Verbesserungspotentiale, die sich aus dem vorherigen Betrieb ergaben umgesetzt. Die neue Verfahrenheit der Halterung ist nun mit einer Hand und unter deutlich geringerem Kraftaufwand zu bedienen. Die zum Verkanten neigenden Gummiringe wurden durch aufblasbare Dichtungen, die über ein Pneumatiksystem verschaltet sind, ersetzt. In Kombination ist so ein Receiverwechsel erheblich einfacher und bei vermindertem Verletzungsrisiko durchführbar.

Durch die Einbringung zusätzlicher Sensorik konnten eine automatische Regelung des Wasserkreislaufs erreicht, sowie zusätzliche Sicherheitsabschaltungen im Schaltschrank umgesetzt werden, die den Umgang mit dem Prüfstand sicherer gestalten und gleichzeitig die Fehleranfälligkeit vermindern. Die überarbeitete Prüfstandssoftware verfügt nun über eine automatische Erkennung und Verarbeitung von Messungen sowie deren Messdaten. Zusätzlich konnte durch die Neugestaltung der Benutzeroberfläche nach einer konsequenten Ablauflogik die Übersicht erheblich verbessert werden, was eine intuitivere Benutzung ermöglicht.

Durch die Weiterentwicklung der verwendeten Störkörper konnten die thermischen Eigenschaften deutlich verbessert werden, wodurch sich die Vorlaufzeit einer Messung um etwa den Faktor 4 verringert. Außerdem sind die neuen Störkörper in ihrem Durchmesser an unterschiedliche Absorberrohrdurchmesser anpassbar und die Position im Receiver während einer Messung ist nun klar definiert.

Eine abschließende Charakterisierung der Prüfstandserweiterung hat gezeigt, dass bei einer Messung ohne Receiverwechsel eine hohe Reproduzierbarkeit mit einer Standardabweichung von

nur noch 0,034 % erreicht werden kann. Dadurch kann ebenfalls das bisherige Kriterium für eine gültige Messung von 0,3 % Abweichung zwischen den Referenzmessungen eingehalten werden. Ob die Reproduzierbarkeit auch nach einem Receiverwechsel erreicht wird, kann erst nach einer ausgiebigen Untersuchung des Einflusses von Position, Form und Oberfläche der Strahlenschutzschilde aus Aluminium festgestellt werden, da diese bei einem einmalig durchgeführten Versuch Abweichung der absorbierten Leistung in der Größenordnung eines Receiverwechsels verursachen.

Weiteres Verbesserungspotential besteht im Zusammenhang mit dem wiederholt aufgetretenen Effekt der Luftansammlung in den Receiverhalterungen der Austrittsseite. Eine Möglichkeit zur Behebung dieses Effekts ist das Einbringen eines oder mehrerer durchsichtiger Steigrohre im Leitungssystem, die sich außerhalb des Bestrahlungsbereichs befinden. Dadurch kann eine Ansammlung von Luft im System erkannt und auch während des Betriebs des Prüfstands entfernt werden.

## 6 Literaturverzeichnis

- [Ant12]** Philipp Ant: Absorberverbiegung und Strömungsbedingungen in einem Sonnensimulator-Prüfstand zur Messung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern (Köln, 2012).
- [Asb09]** Frank Asbeck: Eine solare Welt: Sonne was sonst? (Köln/Berlin, 2009).
- [Ben11]** N. Benz: SCHOTT Absorberrohr und das DLR als Entwicklungspartner (Jülich: 14. Sonnenkolloquium, 2011).
- [BSc11]** B. Schiricke, N. Lichtenthäler, J. Pernpeintner: Sonnensimulationsprüfstand zur Charakterisierung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern (Köln, 2011).
- [CJu11]** C. Julian Chen: Physics of solar energy (Columbia University, 2011).
- [Czi00]** Horst Czichos: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften (Deutschland, 2000).
- [Del13]** Uwe DR.-Ing. Delfs: VDI-Wärmeatlas (Düsseldorf, 2013).
- [Ett06]** Andreas Prof. Dr. -Ing. Etemeyer, Oskar Prof. Dr. -Ing. Wallrapp, Bernd Dr. Schäfer: Technische Mechanik Teil II, Manuskript der Fachhochschule München (München, 2006).
- [Hap12]** Christoph Happich: Konstruktive Auslegung und messtechnische Analyse eines Sonnensimulator-Prüfstandes zur Bewertung der optischen Eigenschaften von Parabolrinnen-Receivern (Köln, 2012).
- [Kni111]** Gerhard Knies, Hartmut Graßl, Franz Trieb: Der Desertec-Atlas (Leipzig, 2011).
- [Lüp04]** Eckhard Lüpfer: Towards standard performance analysis for parabolic trough collector fields (Oxaca, Solarpaces Conference, 2004).
- [Mac08]** Ansgar Macke: Entwicklung und Konstruktion eines Sonnensimulator-Prüfstandes zur Bestimmung des Wirkungsgrades von Parabolrinnen-Receivern (Köln, 2009).
- [Mar12]** Marius Dannenberg, Admir Duracak, Matthias Hafner, Steffen Kitzing: Energie der Zukunft (Darmstadt, 2012).
- [Min10]** Waldemar Minich: Untersuchung von Messmethoden zur Bestimmung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern (Köln, 2010).
- [Pap09]** Lothar Papula: Mathematische Formelsammlung (Wiesbaden, 2009).
- [QUA13]** Volker Quaschnig: Regenerative Energiesysteme - Technologie - Berechnung - Simulation (München, 2013).
- [Rol11]** Herbert Wittel, Dieter Muhs, Dieter Jannasch, Joachim Voßiek: Roloff/Matek Maschinenelemente: Tabellenbuch (Trossingen, 2011).
- [Sch04]** W. Schröder: Fluidmechanik (Aachen, 2004).

**[Sch09]** Schott Solar CSP: Parabolrinnenreceiver "Schott PTR70" (Die Beschriftung wurde manuell hinzugefügt) (Mitterteich, 2009).

**[Schm14]** Fabian Schmitz: Auslegung und Inbetriebnahme des Wasserkreislaufs eines Sonnensimulatorprüfstandes zum Vergleich des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern (Köln, 2014).

**[Ste15]** Spiralförderanlagen Steiner: Angebotsskizze eines Störkörpers als Variante einer Förderschnecke (Kirchdorf am Inn, 2015).

**[Sti12]** Robert Stieglitz, Volker Heinzel: Thermische Solarenergie: Grundlage, Technologie, Anwendung (2012).

**[Wei11]** Jan Weinhausen: Entwicklung und Konstruktion eines Prüfstandes zur Bewertung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern in solarthermischen Kraftwerken (Köln, 2011).

**[Wie09]** Karin Wiesemeyer: Entwicklung eines Messsystems zur Bestimmung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern (Köln, 2009).

## ANHANG

### Anhang A: Fotos der Strahlenschilde aus Aluminium

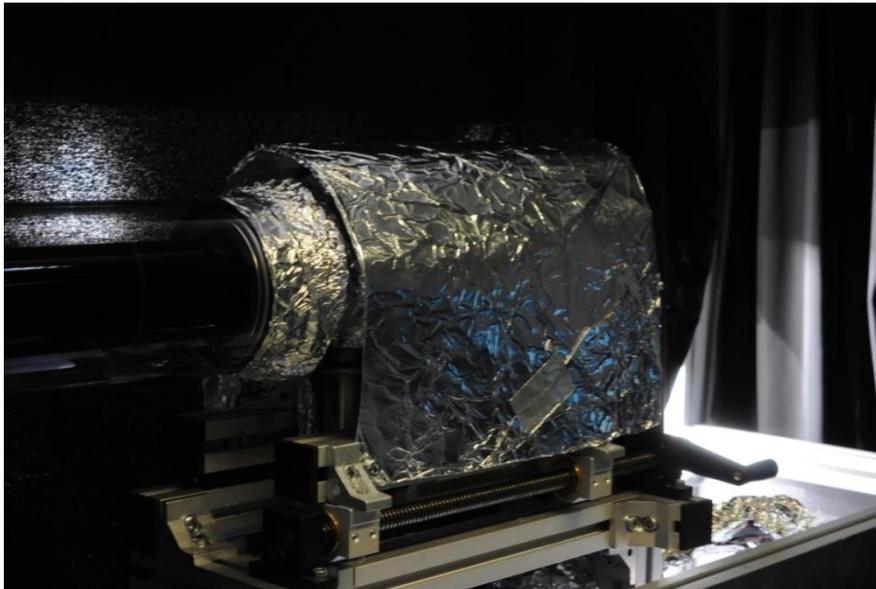


Abbildung 50: Aluminiumschild zum Schutz der Messtechnik in der Receiverhalterung

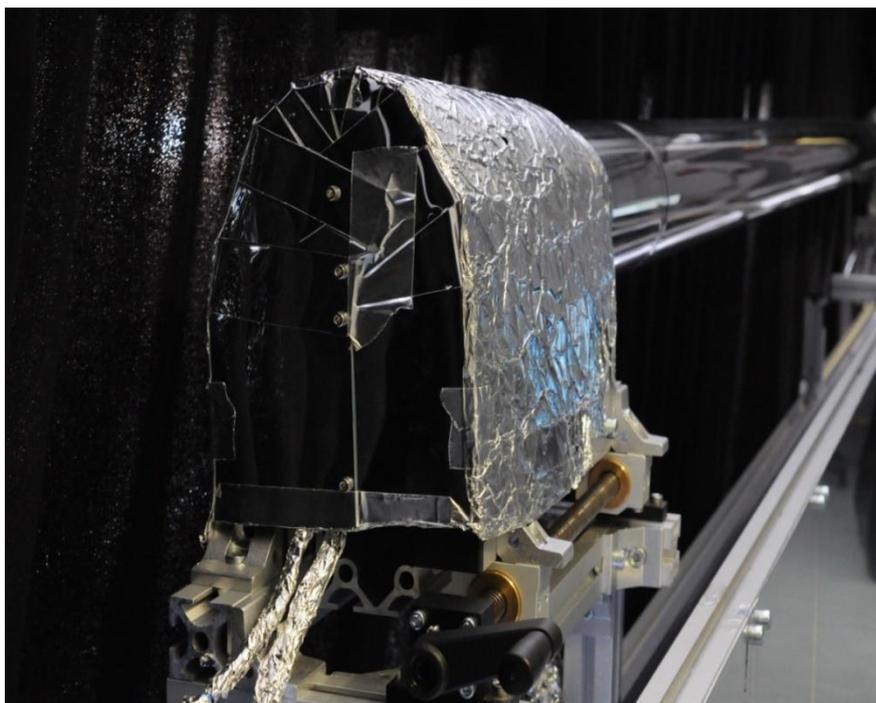


Abbildung 51: Hinteransicht eines Aluminiumschildes zum Schutz der Messtechnik der Receiverhalterung

## Anhang B: Foto der Verfahreinheit der neuen Receiverhalterung

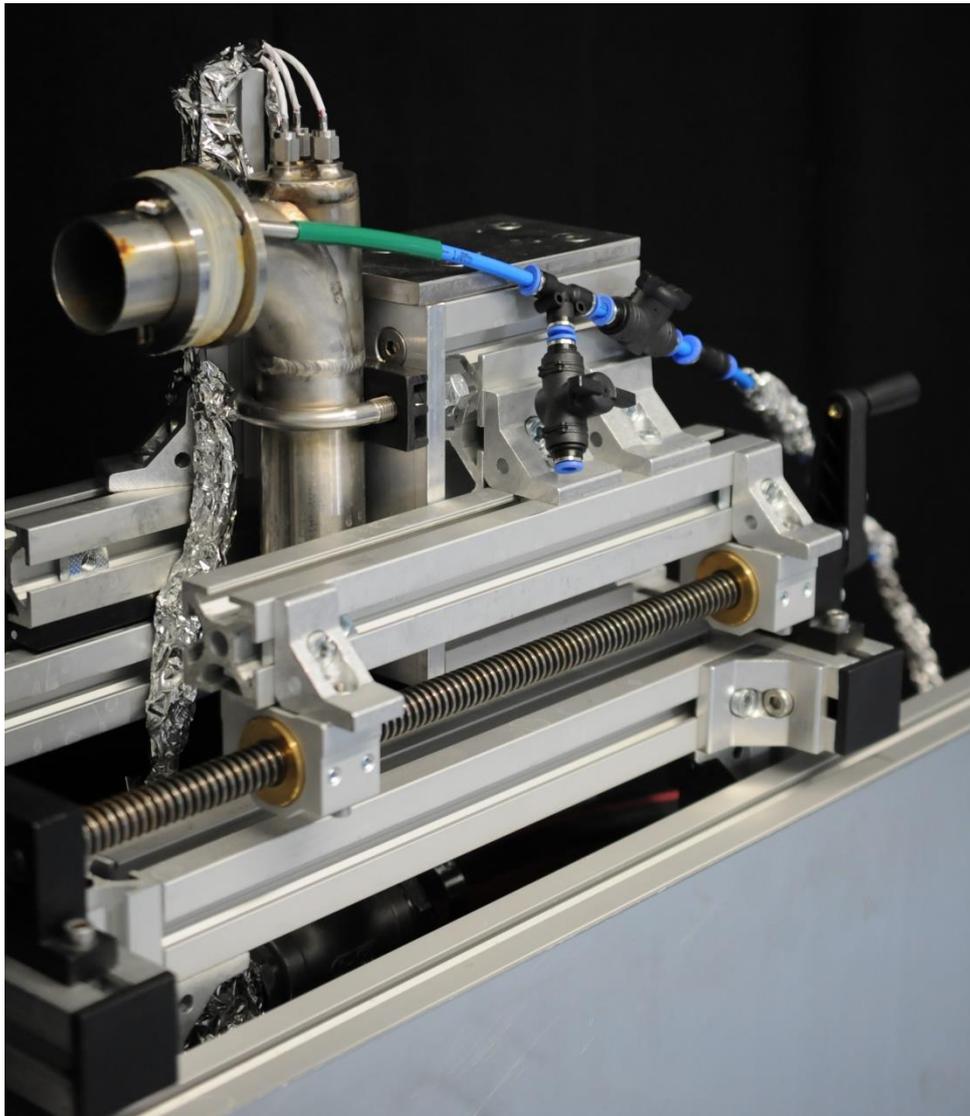


Abbildung 52: Verfahreinheit der neuen Receiverhalterung

## Anhang C: Zweiter Lösungsansatz zur Abdichtung zwischen Receiver und Halterung

Der zweite Lösungsansatz besteht darin, den Schnellspanner durch eine Gewindespindel zu ersetzen sowie die Gummidichtung hinsichtlich Form und Härtegrad anzupassen. Dazu wurde die Breite des Dichtungsringes von 30 mm auf 20 mm reduziert, um einem Verkanten beim Herausziehen entgegen zu wirken. Gleichzeitig wurde ein Material ausgewählt, das statt den bisher verwendeten 50° Shore-A nur noch eine Härte von 40° Shore-A aufweist. Dadurch sollte erreicht werden, dass sich die Gummidichtung schon bei geringerer Stauchkraft nach Außen ausdehnt, sowie beim Entspannen der Kraft schneller wieder seine Ausgangsform annimmt. In Abbildung 53 und 54 sind Fotos der vormontierten Spannvorrichtungen abgebildet. Auf der folgenden Seite ist außerdem in Abbildung 55 eine maßstabsgetreue Skizze der Spannvorrichtung dargestellt.



Abbildung 53: Vormontierte Spannvorrichtung - Einzelansicht

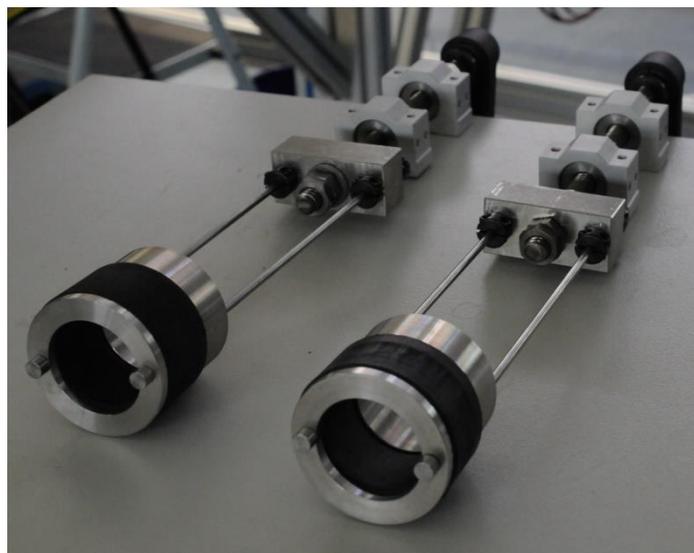


Abbildung 54: Vormontierte Spannvorrichtung

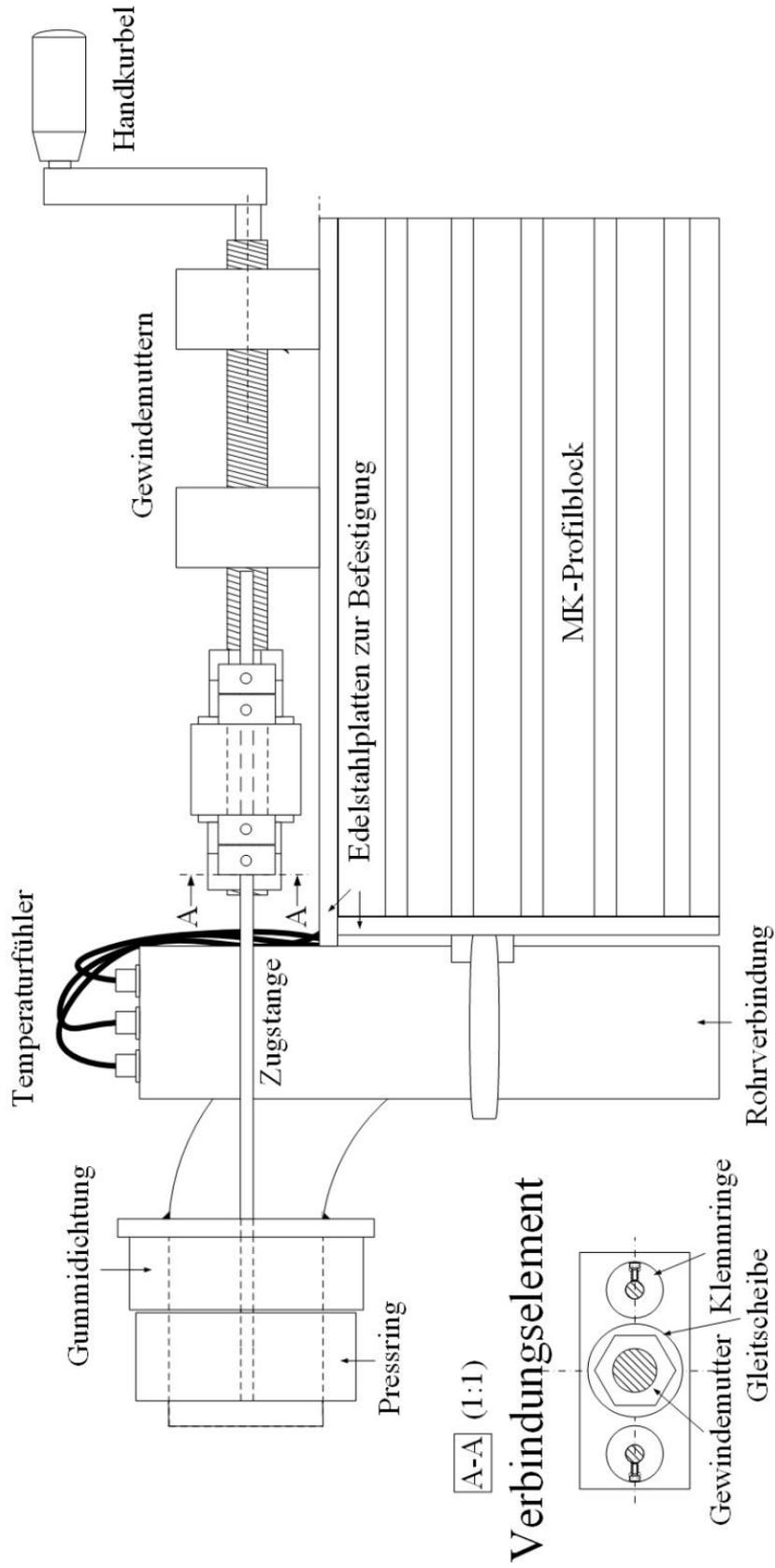
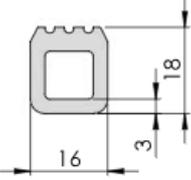
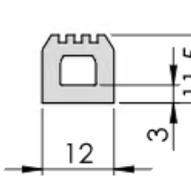
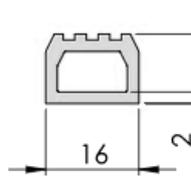
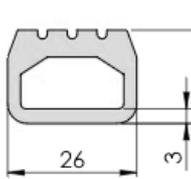
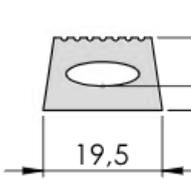
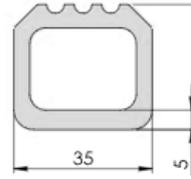
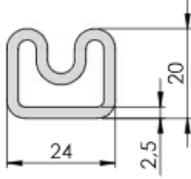
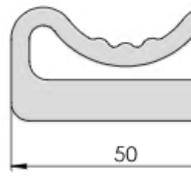
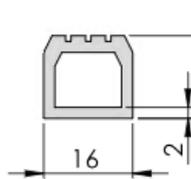


Abbildung 55: Skizze der Spannvorrichtung

## Anhang D: Übersicht einer Auswahl möglicher Profilquerschnitte



 <p><b>Profil S1</b>                      Artikelnummer: 610 025                      Material: Silikon, transparent                      Hub: 3 mm                      Mindestbiegeradius                      Axial: R 64 mm                      Radial Innen: R 72 mm                      Radial Außen: R 72 mm</p>	 <p><b>Profil S2</b>                      Artikelnummer: 610 292                      Material: Silikon, transparent                      Hub: 2 mm                      Mindestbiegeradius                      Axial: R 48 mm                      Radial Innen: R 46 mm                      Radial Außen: R 46 mm</p>	 <p><b>Profil S3</b>                      Artikelnummer: 610 232                      Material: Silikon, transparent                      Hub: 4 mm                      Mindestbiegeradius                      Axial: R 64 mm                      Radial Innen: R 48 mm                      Radial Außen: R 48 mm</p>
 <p><b>Profil S4</b>                      Artikelnummer: 610 024                      Material: Silikon, transparent                      Hub: 4 mm                      Mindestbiegeradius                      Axial: R 104 mm                      Radial Innen: R 76 mm                      Radial Außen: R 76 mm</p>	 <p><b>Profil S5</b>                      Artikelnummer:                      Material: Silikon, rotbraun                      Hub: 1 mm                      Mindestbiegeradius                      Axial: R 78 mm                      Radial Innen: R 48 mm                      Radial Außen: R 48 mm</p>	 <p><b>Profil S6</b>                      Artikelnummer: 610 234                      Material: Silikon, transparent                      Hub: 6 mm                      Mindestbiegeradius                      Axial: R 140 mm                      Radial Innen: R 128 mm                      Radial Außen: R 128 mm</p>
 <p><b>Profil S7</b>                      Artikelnummer: 610 023                      Material: Silikon, transparent                      Hub: 10 mm                      Mindestbiegeradius                      Axial: R 96 mm                      Radial Innen: R 80 mm                      Radial Außen: R 80 mm</p>	 <p><b>Profil S8</b>                      Artikelnummer: 610 079                      Material: Silikon, transparent                      Hub: 10 mm                      Mindestbiegeradius                      Axial: R 200 mm                      Radial Innen: R 100 mm                      Radial Außen: R 100 mm</p>	 <p><b>Profil S9</b>                      Artikelnummer: 610 420                      Material: Silikon, transparent                      Hub: 3 mm                      Mindestbiegeradius                      Axial: R 64 mm                      Radial Innen: R 60 mm                      Radial Außen: R 60 mm</p>

Zeichnungen sind nicht maßstabsgetreu.

AL Gummi + Kunststofftechnik GmbH  
 Kruppstraße 13 | 41540 Dormagen | Telefon 02133 6968 + 6969  
 Telefax 02133 63536 | www.algummi.de | post@algummi.de

Stand: 24.07.2014

Abbildung 56: Übersicht möglicher Profilquerschnitte einer aufblasbaren Gummidichtung

Anhang E: Bildschirmfotos der überarbeiteten Prüfstandssoftware *OptiLive*

**OptiLive v2.5**

Front | Messungsablaufsteuerung | Flussdiagramm | Diagramme | Prüfstandssteuerung | Datenlogger | Lampenlaufzeit

**Messesequenz Starten** | **Messesequenz Stoppen**

**Programm**  
Uhrzeit: 14:16:22 | Startzeit: 13:04:52 | Laufzeit: 01:11:30

**Messesequenz**  
Startzeit: 13:06:45 | Laufzeit: 01:10:48

**KWS + Erhitzer**  
KWS: 13:07:22 | Laufzeit: 01:09:34  
Erhitzer: 01:09:34

**Lampen**  
Lampen 1-3: Startzeit 13:08:12, Laufzeit 01:08:56  
Lampen 4-6: Startzeit 13:08:12, Laufzeit 01:08:56

**Photodiode > 1mA**  
L1, L2, L3, L4, L5, L6: Green LEDs  
Prüfstand: Green LED  
Messbereit: Red LED

**Positionsschalter**  
Einstritt A: Green LED  
Einstritt B: Red LED  
Ausritt A: Green LED  
Ausritt B: Red LED

---

**Algemein**  
850.3 m [kg/h] | 73.51 V [st] [%] | Spring!  
28.516 T KWS in [°C] | 24.156 T KWS out [°C] | 24.356 T Tank aus [°C] | 24 P Durchlauferhitzer [W] | 100 Leistung Zeitspanne [s]

---

**Aktuelle Messung in A:** Nr. 4 | Messung Läuft

Receivername: 60271355  
Startzeit Messung: 14:03:31 | Vorlaufzeit [EAT]: 00:00:00  
Messungsende: 14:18:31 | Laufzeit Messung: 00:02:09

Mean Leistung A seit Messbeginn [W]: 4806  
stabw Leistung A seit Messbeginn [%]: 0,07

**Nächste Messung in A:**  
Receivername: 60271356  
Kommentar: -  
Nummer der Messung: -

---

**Aktuelle Messung in B:** Nr. 3 | Messung Läuft

Receivername: DLR-70  
Startzeit Messung: 00:00:00 | Vorlaufzeit [EAT]: 00:00:00  
Messungsende: 00:00:00 | Laufzeit Messung: 00:00:00

Mean Leistung A seit Messbeginn [W]: 4812  
stabw Leistung A seit Messbeginn [%]: 0,05

**Nächste Messung in B:**  
Receivername: DLR-70  
Kommentar: 4. Referenzmessung  
Nummer der Messung: -

---

**Receiver A (Prüfling)** in FL  
24.388 T Receiver A ein [°C] | 28.465 T Receiver A aus [°C] | 4804 P Receiver A [W] | 4805 P Receiver A, mittel 60s [W] | 0 P Receiver A, stabw 60s [%] | 4806 Mean Leistung A seit Messbeginn [W] | 4806 P Receiver A, Mittel manuell [W]

**Receiver B (Referenz)** in FL  
28.456 T Receiver B ein [°C] | 30.516 T Receiver B aus [°C] | 0 P Receiver B [W] | 0 P Receiver B, mittel 60s [W] | 0 P Receiver B, stabw 60s [%] | 0 Mean Leistung B seit Messbeginn [W] | 0 P Receiver B, Mittel manuell [W]

Abbildung 58: Ansicht der Messablaufssteuerung der überarbeiteten Prüfstandssteuerungssoftware *OptiLive*

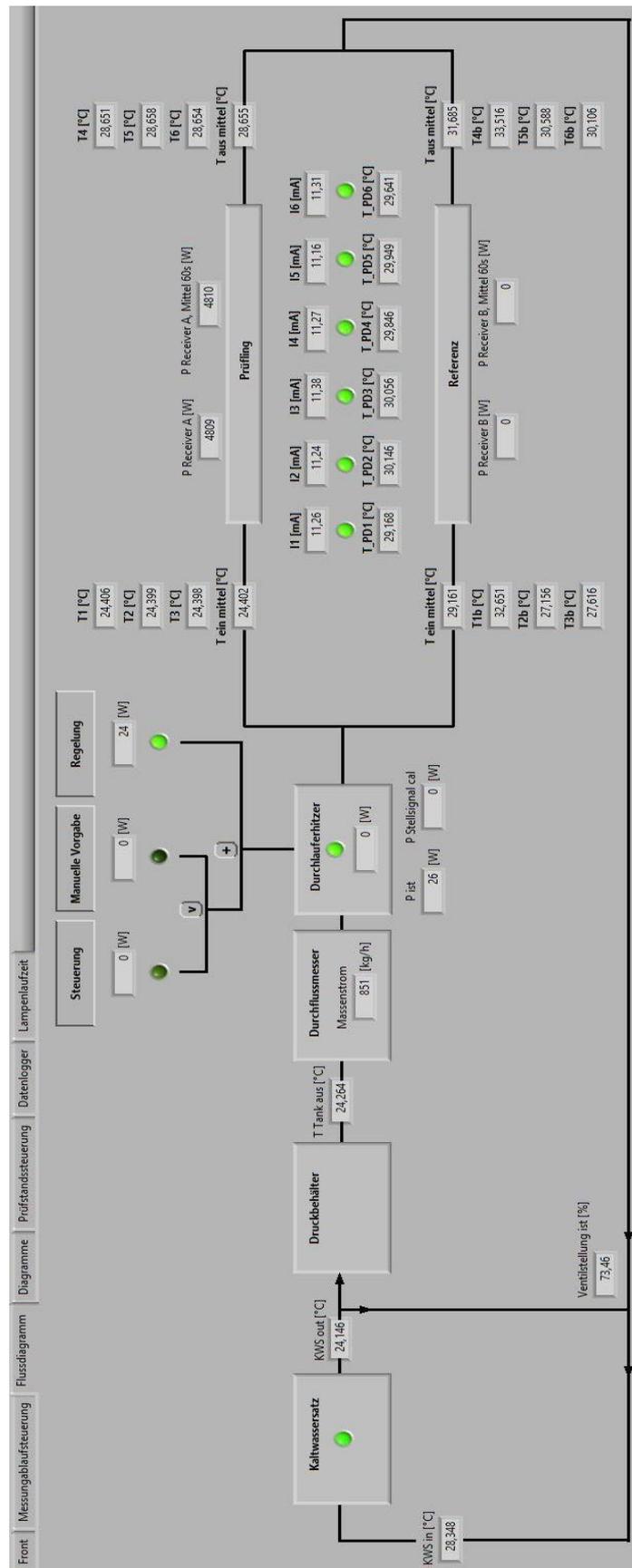


Abbildung 59: Ansicht des neu implementierter Flussdiagramms zur besseren Übersicht der Prüfstands-komponenten in der Prüfstandssteuerungssoftware *OptiLive*

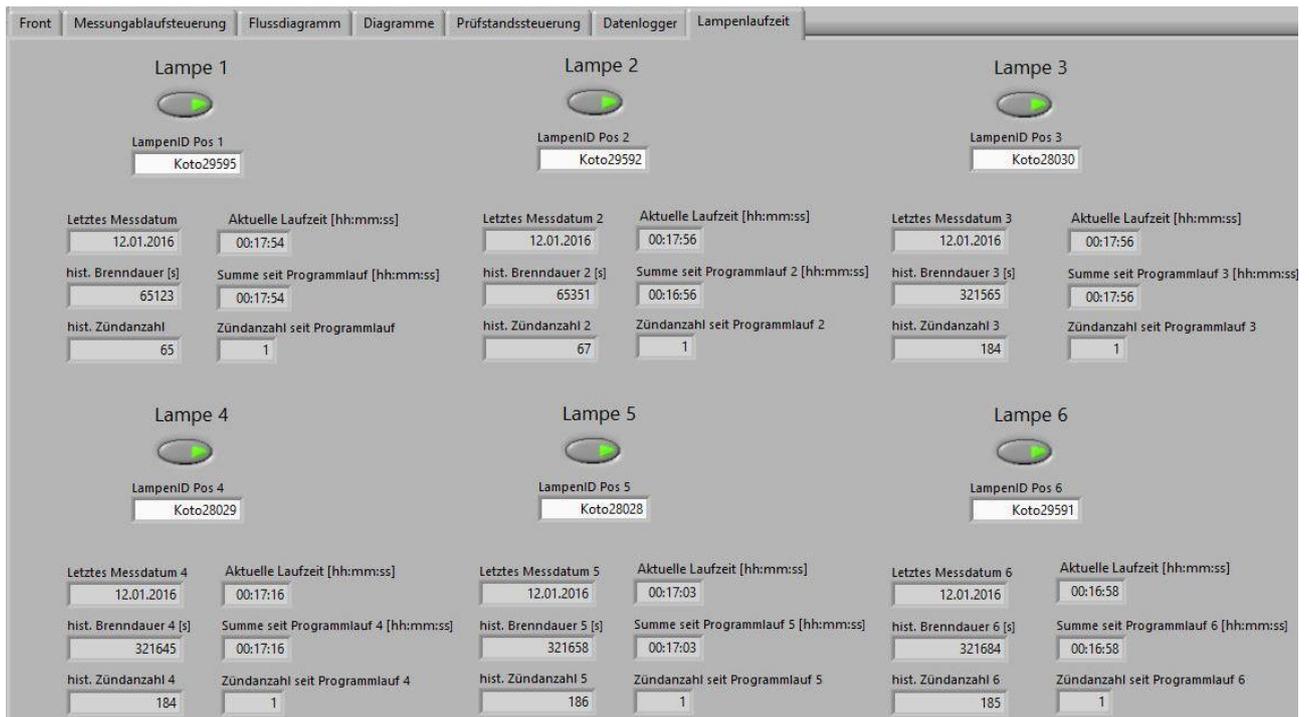


Abbildung 60: Ansicht der neu implementierten Lampenüberwachung in der Prüfstandssteuerung *OptiLive*

## Anhang F: Angebotsskizze eines Störkörpers als Förderschnecke

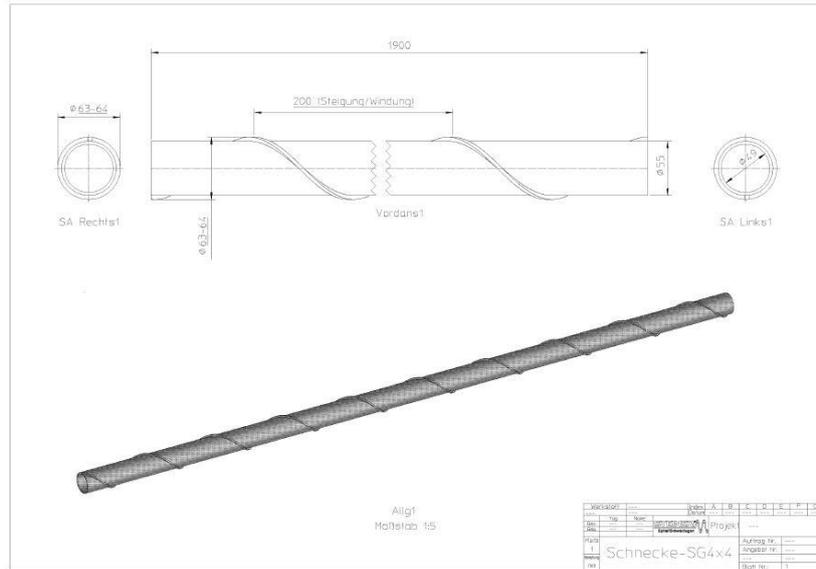


Abbildung 61: Angebotsskizze eines Herstellers – Störkörper als Variante einer Förderschnecke [Ste15]

## Anhang G: Leistungsverlauf der relativen Leistungsmessung in MP A

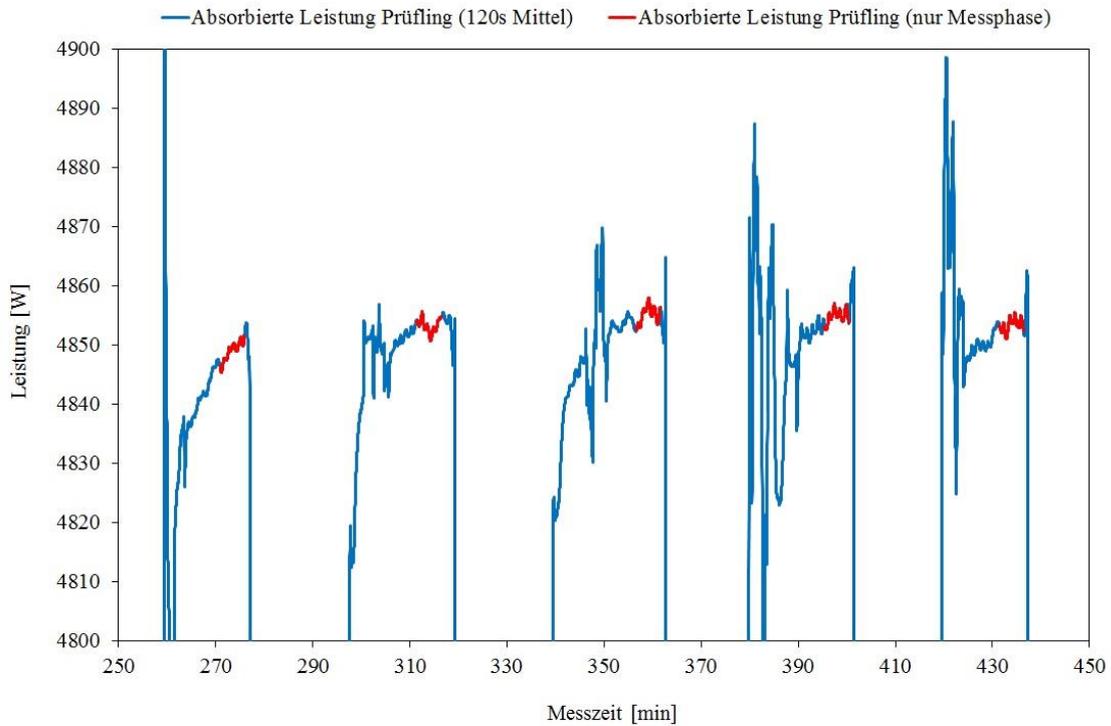


Abbildung 62: Leistungsverlauf der relativen Leistungsmessung in Messposition A