

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Institut für Energietechnik
Professur für Technische Thermodynamik

Von der
Fakultät Maschinenwesen
genehmigte

Dissertation

Gleichungsorientierte Modellierung der Wärme- und
Stoffübertragungsprozesse in Verdunstungskühltürmen

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
von

Dipl.-Ing. (FH) Tobias Schulze
geb. am 19.11.1984 in Kiel

Gutachter:

Prof. Dr. rer. nat. habil. Cornelia Bretkopf

Prof. Dr.-Ing. Olaf Strelow

Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Joachim Kretschmar

Vorsitzender der Promotionskommission:

Prof. Dr.-Ing. habil. Leon Urbas

Tag der Einreichung: 04.12.2014

Tag der Verteidigung: 24.07.2015

Kurzfassung

Zur Kühlung von Prozessströmen kommen aufgrund hoher Leistungsdichten häufig Verdunstungskühltürme zum Einsatz. Um die Übertragungsfläche für Wärme und Stoff zu vergrößern, werden in diesen Kühltürmen Struktureinbauten integriert.

Die Weiterentwicklung von Kühlturmeinbauten und die Untersuchung der den Kühlprozess beeinflussenden Faktoren erfolgt empirisch, was eine Vielzahl von Versuchen notwendig macht. Eine numerische Simulation des Kühlprozesses kann diese Messungen unterstützen und so helfen eine Vielzahl an Versuchen einzusparen. Des Weiteren können bei versuchsbegleitender Simulation mit einem geeigneten Modell weitere Untersuchungen durchgeführt und Erkenntnisse gewonnen werden, die bei Messungen am Versuchskühlturm verborgen bleiben.

In dieser Arbeit werden zwei Ansätze der numerischen Simulation eines Verdunstungskühlturms betrachtet. Es werden eine CFD-Simulation und ein vereinfachtes Modellkonzept hinsichtlich der Anwendbarkeit auf diese Problemstellung untersucht.

Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die methodische Entwicklung eines solchen vereinfachten mathematischen Modells. Dieses beruht auf der physikalisch deterministischen Beschreibung der im Kühlturm ablaufenden Prozesse der Wärme- und Stoffübertragung unter Berücksichtigung des Stoffverhaltens.

Aufgrund der Nichtlinearität des Stoffverhaltens und der erforderlichen Inkrementierung des Berechnungsgebiets ist ein methodisches Vorgehen erforderlich, um die Erstellung der Modellgleichungen und deren Lösung überhaupt realisieren zu können. Hierfür wird auf allgemeine Methoden der gleichungsorientierten Simulation technischer Systeme zurückgegriffen.

Das entwickelte Modellkonzept wird für die Modellierung und Simulation eines Versuchskühlturms angewandt. Mit den so ermittelten Messdaten wird das Modell kalibriert und validiert. Es zeigt sich, dass mit dem erstellten Modell quantitativ und qualitativ valide Ergebnisse erzielt werden können.

Abstract

Due to the high power density, the cooling of process streams is often done bei evaporative cooling towers. To enlarge the exchange area for the heat and mass transfer, these cooling towers contain integrated structural fills.

The future development of cooling tower fills and the research regarding the cooling process and its influencing parameters will be carried out empirically, resulting in a large number of required experiments. A numeric simulation of the cooling process can support theses measurements and reduce the vast number of needed experiments. Furthermore, with the use of test-related simulations and adapted models, it will be possible to gain knowledge and do research in areas which are omitted during regular measurements on cooling towers.

In this study it is looked to two different approaches of numeric simulation of a evaporative cooling tower. There will be an examination of a CFD-Simulation and a simplified model concept regarding their respective applicability for this problem.

This work is focussed on the systematic developement of such simplified mathematical models, based on the physical deterministic description of the occurring processes of heat and mass transfer in cooling towers considering the stock behaviour.

Due to the non-linearity of the stock behaviour and the required incrementation of the calculation area, a systematic approach is needed to model equations and their respective solutions. For this purpose it is necessary to access general techniques of equation-based simulations of technological systems.

The developed model concept will be applied for the modelation and simulation of an experimental cooling tower. The model will be calibrated and validated with data from this experimental tower. It shows, that the results from this model are qualitatively and quantitatively valid.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Symbolverzeichnis | VII |
| Abbildungsverzeichnis | XI |
| Tabellenverzeichnis | XIV |
| 1 Einführung | 1 |
| 1.1 Verdunstungskühltürme | 1 |
| 1.2 Forschungsbedarf im Bereich der Verdunstungskühlung | 3 |
| 1.3 Simulation der Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge in einem Verdunstungskühlturm | 5 |
| 1.4 Zielstellung und Aufbau der Arbeit | 6 |
| 1.4.1 Zielstellung | 6 |
| 1.4.2 Aufbau | 7 |
| 2 Technische und theoretische Grundlagen von Kühltürmen | 9 |
| 2.1 Varianten von Rückkühlwerken | 9 |
| 2.1.1 Durchlaufkühlung / Ablaufkühlung | 9 |
| 2.1.2 Umlaufkühlung | 10 |
| 2.1.3 Hybridkühlung | 11 |
| 2.2 Theoretische Grundlagen des Kühlprozesses | 13 |
| 2.2.1 Grundprozess der offenen Rückkühlung | 13 |
| 2.2.2 Struktureinbauten in Kühltürmen | 14 |
| 2.2.3 Zustandsverläufe der Fluidströme | 15 |
| 2.2.4 Energie- und Massebilanzen der Fluidströme | 17 |
| 2.3 Stand des Wissens | 21 |
| 2.3.1 Hydraulische und thermische Charakterisierung | 23 |
| 2.3.2 <i>MERKEL</i> 'sche Theorie | 23 |
| 2.3.3 Genauigkeit der <i>MERKEL</i> 'schen Hauptgleichung | 26 |
| 2.3.4 Lösen der Hauptgleichung | 27 |
| 2.3.5 Verfahren nach <i>MEHLIG</i> | 28 |
| 2.3.6 Auswertung nach <i>POPPE</i> | 31 |
| 2.3.7 Lösung der Hauptgleichung durch numerische Verfahren | 32 |
| 2.4 Vergleich der Berechnungsmethoden für Kühltürme | 33 |
| 3 Versuchskühlturm der Technischen Universität Dresden | 35 |
| 3.1 Abmessungen und Betriebsweise | 35 |
| 3.2 Messdatenerfassung und -aufbereitung | 36 |
| 4 Möglichkeiten und Grenzen der Simulation mit CFD-Software | 39 |
| 4.1 Erstellung des Modells | 39 |
| 4.1.1 Getroffene Vereinfachungen | 40 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.2 | Ergebnisse | 41 |
| 4.2.1 | Gegenüberstellung und Diskussion der Ergebnisse | 43 |
| 4.2.2 | Fehlerbetrachtung und Ausblick | 45 |
| 4.3 | Fazit | 46 |
| 5 | Entwicklung des Systemmodells „Virtueller Kühlturm“ | 47 |
| 5.1 | Anforderungen an ein geeignetes Simulationsmodell | 47 |
| 5.2 | Modellkonzept: Trennung von Struktur und Funktion | 49 |
| 5.3 | Funktionsmodell des Wärme- und Stofftransports – „Zellenmodell“ | 50 |
| 5.3.1 | Wärmeübergang in einer Zelle | 51 |
| 5.3.2 | Stoffübergang in einer Zelle | 55 |
| 5.3.3 | Kopplung von Wärme- und Stoffübertragung | 57 |
| 5.3.4 | Bilanzgleichungssystem des Zellenmodells | 59 |
| 5.4 | Strukturmodell der gekoppelten Zellen | 60 |
| 5.4.1 | Synthese des Netzmodells – Strukturerstellung | 60 |
| 5.5 | Zusammenführung von Funktions- und Strukturmodell | 66 |
| 5.6 | Iterative Lösung des gleichungsorientierten Modells | 66 |
| 5.7 | Lösungsstrategie – <i>NEWTON</i> 'sche Verfahren für Systeme | 67 |
| 5.7.1 | Ermittlung günstiger Startwerte | 71 |
| 5.7.2 | Lösen linearer Gleichungssysteme | 72 |
| 5.8 | Stoffdatenanpassung | 74 |
| 5.9 | Rechentechnische Umsetzung | 75 |
| 5.9.1 | Speicherplatzreduzierung mittels Listenspeicherung | 75 |
| 5.9.2 | Netzstudie – Ermittlung der optimalen Zellenanzahl | 78 |
| 5.9.3 | Sensitivitätsanalyse der Iterationsgrenzen | 79 |
| 5.10 | Systembeispiel | 80 |
| 5.11 | Ermittlung unbekannter Modellparameter | 85 |
| 5.11.1 | Relevante Modellparameter | 85 |
| 5.11.2 | Beispiel einer Validierung mittels <i>Downhill-Simplex-Verfahren</i> nach <i>NELDER-MEAD</i> | 89 |
| 6 | Validierung des Modells <i>Virtueller Kühlturm</i> | 92 |
| 6.1 | Validierung über den Kühlturm ohne Struktureinbau | 92 |
| 6.2 | Validierung des Modells über den Kühlturm mit Struktureinbau | 96 |
| 6.2.1 | Vergleich mit Messdaten des Referenzeinbaus | 98 |
| 7 | Weitere Untersuchungen mit dem Modell <i>Virtueller Kühlturm</i> | 103 |
| 7.1 | Simulation des Regenraums | 103 |
| 7.1.1 | Verlauf der Zustandsgrößen im Kühlturm | 103 |
| 7.1.2 | Funktionen der Transportgrößen | 104 |
| 7.1.3 | Luft-Austritts-Stand im <i>Virtuellen Kühlturm</i> | 107 |
| 7.1.4 | Verlauf der Übertragungszahl K_{Po} im <i>Virtuellen Kühlturm</i> | 110 |
| 7.1.5 | Einfluss der Kühlzonenbreite z | 112 |
| 7.1.6 | Einfluss der Luft-Eintritts-Enthalpie h_L | 115 |
| 7.2 | Simulation der Referenzeinbaus | 117 |
| 7.2.1 | Variation der Übertragungsfläche | 117 |
| 7.2.2 | Bewertung einzelner Zonen im Kühlturm | 118 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 8 | Diskussion | 120 |
| 8.1 | Versuchsbegleitende Simulation und Anforderungen an entsprechende Simulationsmodelle | 120 |
| 8.2 | Eignung und Validität von CFD-Modellen | 121 |
| 8.3 | Eignung und Validität des vorgestellten Modells | 121 |
| 8.3.1 | Gleichungsorientierte Simulation | 121 |
| 8.3.2 | Validität des Modells <i>Virtueller Kühlturm</i> | 122 |
| 8.3.3 | Rechentechnische Umsetzung und Rechenzeiten des Modells | 124 |
| 8.3.4 | Vergleich der Modellansätze <i>Virtueller Kühlturm</i> mit bekannten Berechnungsmethoden | 125 |
| 8.4 | Übertragbarkeit auf weitere Prozesse | 126 |
| 9 | Zusammenfassung | 128 |
| 9.1 | Fazit | 128 |
| 9.2 | Ausblick | 129 |
| | Danksagung | 131 |
| | Literaturverzeichnis | 132 |
| | ANHANG | 140 |
| A | Friedrich <i>MERKEL</i> - Kurzlebenslauf | 140 |
| B | Konventionen der Kühlturmtechnik | 141 |
| C | Herleitung von <i>POPPE</i> | 142 |
| D | Simulationen am <i>Virtuellen Kühlturm</i> | 144 |
| D.1 | Regenraum Messung A | 144 |
| D.2 | Abhängigkeit des Stoffübergangskoeffizienten von der Regendichte | 145 |
| D.3 | Regenraum Messung B | 145 |
| D.4 | Die Übertragungszahl im <i>Virtuellen Kühlturm</i> | 146 |
| D.5 | Einfluss der Luft-Eintritts-Enthalpie h_L | 147 |
| D.6 | Simulation des Referenzeinbaus im verkürzten <i>Virtuellen Kühlturm</i> | 147 |
| E | Messdaten | 150 |
| E.1 | Regenraum r12 z5 | 151 |
| E.2 | Regenraum r12 z10, Messung A | 155 |
| E.3 | Regenraum r12 z10, Messung B | 159 |
| E.4 | Regenraum r12 z15 | 163 |
| E.5 | Referenzeinbau r12 z10, Messung C | 167 |
| E.6 | Übertragungszahl in Abhängigkeit der Kühlzonenbreite z | 171 |

Symbolverzeichnis

Formelzeichen

| Symbol | Bedeutung | Einheit |
|-----------------------------|---|---------------|
| A | Fläche | m^2 |
| \dot{C} | Kapazitätsstrom | kW/K |
| $\underline{\underline{E}}$ | Einheitsmatrix | |
| \underline{F} | Fehler | |
| $\underline{\underline{F}}$ | Fehlervektor | |
| \dot{H} | Enthalpiestrom | kW |
| $\underline{\underline{I}}$ | Inputmatrix | |
| $\underline{\underline{J}}$ | JACOBI-Matrix | |
| K | Übertragungszahl | |
| M | Molare Masse | $kg/kmol$ |
| $\underline{\underline{M}}$ | Funktionsschar / Gesamtmodell | |
| $\underline{\underline{M}}$ | Koeffizientenmatrix | |
| $\underline{\underline{N}}$ | Übertragungszahl / Betriebscharakteristik | |
| \dot{N} | Stoffmengenstrom | $kmol/s$ |
| $\underline{\underline{O}}$ | Outputmatrix | |
| $\underline{\underline{Q}}$ | Wärme | kJ |
| \dot{Q} | Wärmestrom | kW |
| R | Spezifische Gaskonstante | $kJ/(kg K)$ |
| \bar{R} | Allgemeine Gaskonstante | $kJ/(kmol K)$ |
| S | Entropie | kJ/K |
| $\underline{\underline{S}}$ | Strukturmatrix | |
| T | Temperatur | K |
| V | Volumen | m^3 |
| \dot{V} | Volumenstrom | m^3/h |
| W | Arbeit | kW |
| Y | Volumenanteil | |
| Z | Zustandsgröße | variabel |
| $\underline{\underline{Z}}$ | Vektor der Zustandsgrößen | |
| a | Kühlgrenzabstand / Koeffizient | K |
| b | Breite / Koeffizient | mm |
| \underline{b} | Konstantenvektor | |
| c | spezifische Wärmekapazität | $kJ/(kg K)$ |
| Δc | Konzentrationsdifferenz | $kmol/m^3$ |
| d | Durchmesser | mm |
| f | Funktion / Fehler | |
| h | spezifische Enthalpie / Höhe | $kJ/kg / mm$ |

Fortsetzung (...)

(. . .) Fortsetzung

| Symbol | Bedeutung | Einheit |
|-----------------|--|----------------------------------|
| Δh_v | spezifische Enthalpie des Phasenwechsels | kJ/kg |
| k | Wärmedurchgangskoeffizient / Kantenlänge | W/(m ² K) / mm |
| l | Länge | mm |
| m | Masse | kg |
| \dot{m} | Massestrom | kg/s |
| n | Zellenanzahl | |
| p | Druck | kPa |
| q | Quotient / spezifische Wärme | kJ/kg |
| r | Regendichte | t/(m ² h) |
| s | spezifische Entropie | kJ/(kg K) |
| t | Temperatur | °C |
| w | Geschwindigkeit | m/s |
| x | Wassergehalt / Koeffizient | kg _w /kg _L |
| \underline{x} | Lösungsvektor | |
| z | Kühlzonenbreite | K |
| α | Wärmeübergangskoeffizient | W/(m ² K) |
| β | Stoffübergangskoeffizient | m/s |
| δ | Filmdicke | mm |
| ϵ | Abbruchkriterium / Differenz | |
| ζ | Druckverlustbeiwert | |
| η | Wirkungsgrad / Gewichtungsfaktor | |
| λ | Wärmeleitfähigkeit / Luftzahl | W/(m K) |
| $\tilde{\mu}^2$ | Faktor | |
| ξ | Masseanteil | |
| ρ | Dichte | kg/m ³ |
| σ | Verdunstungsziffer | kg/(m ² s) |
| τ | Zeit | s, min, h |
| ϕ | Betriebscharakteristik | |
| φ | relative Luftfeuchte | |
| ω | Frequenz / Relaxationsfaktor | Hz |

Indizes tiefgestellt

| Symbol | Bedeutung |
|--------|-----------------------|
| D | Wasserdampf |
| F | Feuchtkugeltemperatur |
| G | Phasengrenze |
| K | Kondensation |
| L | Luft trocken |
| MAX | maximal |
| Me | <i>MEHLIG</i> |
| N | neu |

Fortsetzung (. . .)

(...) Fortsetzung

| Symbol | Bedeutung |
|----------------------|---|
| <i>P</i> | Partikel |
| <i>P_o</i> | <i>POPPE</i> |
| <i>R</i> | Regenzone / Relaxation |
| <i>RMS</i> | Root Mean Square (kleinste Fehlerquadrate) |
| <i>S</i> | Sättigung |
| <i>U</i> | Umgebung |
| <i>V</i> | Versprühzone |
| <i>W</i> | Wasser flüssig |
| <i>e</i> | extensiv |
| <i>f</i> | Flächenvergrößerungsfaktor |
| <i>fL</i> | Luft feucht |
| <i>fill</i> | Struktureinbau (Fill) |
| <i>ges</i> | gesamt |
| <i>i</i> | Gleichungslaufzahl 1. Ebene / intensiv |
| <i>j</i> | Iterationslaufzahl |
| <i>k</i> | Gleichungslaufzahl 2. Ebene |
| <i>m</i> | mittel, Laufvariable |
| <i>mess</i> | Messung |
| <i>n</i> | Anzahl / Laufzahl Ort x-Richtung |
| <i>opt</i> | optimal |
| <i>or</i> | Messblende (Orifice) |
| <i>p</i> | Partialdruck / Druck |
| <i>vk</i> | Verteilungskoeffizient |
| <i>simu</i> | Simulation |
| <i>v</i> | Verdunstung |
| <i>z</i> | Kühlzonenbreite |
| α | Wärmestrom über Konvektion |
| σ | Wärmestrom durch Phasenwechsel |
| ϕ | <i>JACOBI</i> -Matrix der Zellen |
| 0 | Anfang / Startwert / Bezug |
| 1 | Wertematrix / bei einer Luftzahl $\lambda = 1$ |
| 2 | Positionsmatrix |
| <i>I</i> | Bereich I |
| <i>II</i> | Bereich II |

Indizes hochgestellt

| Symbol | Bedeutung |
|--------|--------------------------|
| A | Austritt Zelle |
| E | Eintritt Zelle |
| I | Eintritt (Input) System |
| O | Austritt (Output) System |
| sp | spaltenweise reduziert |
| ze | zeilenweise reduziert |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Kühlturm des Kohlekraftwerks Boxberg, Block R | 1 |
| 1.2 | Kühleinbauten im Kühlturm Boxberg, Werk IV | 2 |
| 1.3 | Aufteilung des Gegenstrom-Kühlprozesses | 2 |
| 2.1 | Vereinfachtes Schema einer Durchlaufkühlung | 10 |
| 2.2 | Vereinfachtes Schema einer Umlaufkühlung | 11 |
| 2.3 | Vereinfachtes Schema einer Hybridkühlung | 12 |
| 2.4 | Grundschemata aller offenen Kühlprozesse | 14 |
| 2.5 | Low Fouling Fill | 15 |
| 2.6 | Cross Corrugated Foil Fill | 15 |
| 2.7 | Grid Fill | 15 |
| 2.8 | <i>MOLLIER</i> h,x -Diagramm für feuchte Luft | 16 |
| 2.9 | Bilanzraum Kühlturm | 18 |
| 2.10 | Zustandsverläufe beim Rückkühlvorgang | 29 |
| 2.11 | Numerische Integration eines Teilbereiches mittels <i>SIMPSON</i> -Regel | 32 |
| 3.1 | Versuchskühlturm der Technischen Universität Dresden | 36 |
| 4.1 | Gitteransicht des Modells mit Darstellung der Einlassflächen | 40 |
| 4.2 | Ausschnitt des Modells mit Darstellung der Vernetzung | 40 |
| 4.3 | Geschwindigkeitsverteilung der Luft im <i>EULER-LAGRANGE</i> -Modell, Maßstab 1:1 | 42 |
| 4.4 | Geschwindigkeitsverteilung des Wassers im <i>EULER-LAGRANGE</i> -Modell, Maßstab 1:1 | 42 |
| 4.5 | Temperaturverteilung der Luft im <i>EULER-LAGRANGE</i> -Modell, Maßstab 1:1 | 43 |
| 4.6 | Temperaturverteilung des Wassers im <i>EULER-LAGRANGE</i> -Modell, Maßstab 1:1 | 43 |
| 4.7 | Masseabnahme der einzelnen Wasserpartikel im <i>EULER-LAGRANGE</i> -Modell (Maßstab 1:1) | 44 |
| 4.8 | Verlauf des Wassermassenanteils der feuchten Luft im <i>EULER-LAGRANGE</i> -Modell (Maßstab 1:1) | 44 |
| 5.1 | Beispiel der Verteilung von Wasser mit neun Zellen | 48 |
| 5.2 | Modellzelle: ideal durchmischter Wärmeübertrager ohne Trennwand | 51 |
| 5.3 | Transportphänomene im Verdunstungskühlturm | 58 |
| 5.4 | Zellenmodell als Funktion der Ausgangsgrößen und Abhängigkeit der Eingangsgrößen | 59 |
| 5.5 | Netzstudie - Einfluss der Zellenanzahl | 78 |
| 5.6 | Einfluss der unterschiedlichen Konvergenzkriterien auf die Rechenzeit | 80 |
| 5.7 | Minimalbeispiel: Temperaturen t | 84 |
| 5.8 | Minimalbeispiel: Masseströme \dot{m} | 84 |
| 5.9 | Verlauf des Wassergehalts x_L der Luft für das Minimalbeispiel | 85 |
| 5.10 | Verlauf der Temperatur t für das Minimalbeispiel | 85 |
| 5.11 | Verlauf des Massestroms \dot{m} für das Minimalbeispiel | 85 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.12 | Fehler in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten α und des Stoffübergangskoeffizienten β | 89 |
| 5.13 | Kalibrierung des Wärmeübergangskoeffizienten α und des Stoffübergangskoeffizienten β mit dem <i>Downhill-Simplex-Verfahren</i> | 90 |
| 6.1 | Simulationsraum des Regenraums | 94 |
| 6.2 | Zellenmodell des Regenraums mit 3360 Zellen | 94 |
| 6.3 | Simulation Regenraum: Verlauf der Temperaturen, Nr. 23, Messung A . . | 95 |
| 6.4 | Verlauf von φ | 96 |
| 6.5 | Verlauf von x_L | 96 |
| 6.6 | Simulationsraum des kompletten Kühlturms | 97 |
| 6.7 | Zellenmodell mit Referenzeinbau mit 26 880 Zellen | 97 |
| 6.8 | Verlauf von t_W in °C | 100 |
| 6.9 | Verlauf von t_L in °C | 100 |
| 6.10 | Simulationsraum mit verkürzter Regenzone | 101 |
| 6.11 | Zellenmodell mit verkürzter Regenzone mit 12 800 Zellen | 101 |
| 6.12 | Verlauf der relativen Luftfeuchte φ , Simulation Referenzeinbau mit verkürzter Regenzone, Nr. 14, Messung C | 102 |
| 7.1 | Vergleich von Messung und Simulation r12 z10 | 104 |
| 7.2 | Wärmeübergangskoeffizient α über Luftzahl λ | 105 |
| 7.3 | Stoffübergangskoeffizient β über Luftzahl λ | 105 |
| 7.4 | Abhängigkeit der Transportgrößen α und β von der Anzahl der Zellen n . | 105 |
| 7.5 | LEWIS'sche-Faktor z in Abhängigkeit der Luftzahl λ | 106 |
| 7.6 | Vergleich von Messung und Simulation mit Regressionsfunktionen | 107 |
| 7.7 | Verlauf von φ | 109 |
| 7.8 | Verlauf von x_L | 109 |
| 7.9 | Simulation Regenraum: Zustandsverlauf der Luft, Nr. 19, Messung B . . | 110 |
| 7.10 | Simulation Regenraum: Verlauf der Übertragungszahl K_n , Nr. 23, Messung A | 111 |
| 7.11 | Simulation Regenraum: Verlauf der Masseströme \dot{m} , Nr. 23, Messung A . | 111 |
| 7.12 | Abhängigkeit der Übertragungszahl K_{Po} von der Kühlzonenbreite z | 113 |
| 7.13 | Temperaturdifferenz zwischen Luft t_L^E und Wasser t_W^A | 113 |
| 7.14 | Verlauf der Ausgangsgrößen über der Kühlzonenbreite z | 114 |
| 7.15 | Verlauf der Übertragungszahl K_{Po} über dem Wassergehalt x_L^E | 115 |
| 7.16 | Verlauf der Zustandsgrößen in Abhängigkeit von der Luft-Eintritts-Temperatur t_L^E | 116 |
| 7.17 | Übertragungszahl K_{Po} in Abhängigkeit der Kühleinbauhöhe h | 117 |
| 7.18 | Verlauf der Übertragungszahl im Kühlturm mit zwei Lagen Referenzeinbau | 118 |
| 7.19 | Einfluss der einzelnen Zonen | 119 |
| 7.20 | Einfluss der Höhe der Regenzone h_R | 119 |
| 8.1 | Abhängigkeit der Rechenzeit in VBA von der Zellenanzahl n | 125 |
| 1 | Verlauf der relativen Luftfeuchte φ im Regenraum, Nr. 23, Messung A . . | 144 |
| 2 | Veränderung des Stoffübergangskoeffizienten β bei Variation der Regendichte r | 145 |
| 3 | Simulation Regenraum: Verlauf der Übertragungszahl K_n , Nr. 19, Messung B | 145 |
| 4 | Simulation Regenraum: Verlauf der Temperaturen, Nr. 19, Messung B . . | 146 |
| 5 | Verlauf des Wassergehalts bei umgekehrten Wärme- und Stoffübergang . | 146 |

| | | |
|----|--|-----|
| 6 | Verlauf der Übertragungszahl bei umgekehrten Wärme- und Stoffübergang | 146 |
| 7 | Verlauf der Zustandsgrößen am Austritt über Wassergehalt x_L^E | 147 |
| 8 | Temperaturfeld des Wassers des Referenzeinbaus in °C | 147 |
| 9 | Temperaturfeld der Luft des Referenzeinbaus in °C | 147 |
| 10 | Verlauf der Temperaturen im verkürzten <i>Virtuellen Kühlturm</i> | 148 |
| 11 | Verlauf des Wassergehalts x_L im verkürzten <i>Virtuellen Kühlturm</i> | 148 |
| 12 | Verlauf der Masseströme im verkürzten <i>Virtuellen Kühlturm</i> | 148 |
| 13 | Vergleich der Regressionsgerade mit Simulation durch Transportfunktionen des Regenraums | 149 |
| 14 | Regenraum r12 z5 Messdaten | 151 |
| 15 | Regenraum r12 z5 Auswertung Zustandsgrößen | 152 |
| 16 | Regenraum r12 z5 Auswertung Übertragungszahlen | 153 |
| 17 | Regenraum r12 z5 Diagramm Übertragungszahlen | 154 |
| 18 | Regenraum r12 z10 Messdaten, Messung A | 155 |
| 19 | Regenraum r12 z10 Auswertung Zustandsgrößen, Messung A | 156 |
| 20 | Regenraum r12 z10 Auswertung Übertragungszahlen, Messung A | 157 |
| 21 | Regenraum r12 z10 Diagramm Übertragungszahlen, Messung A | 158 |
| 22 | Regenraum r12 z10, Messung B | 159 |
| 23 | Regenraum r12 z10 Auswertung Zustandsgrößen, Messung B | 160 |
| 24 | Regenraum r12 z10 Auswertung Übertragungszahlen, Messung B | 161 |
| 25 | Regenraum r12 z10 Diagramm Übertragungszahlen, Messung B | 162 |
| 26 | Regenraum r12 z15 Messdaten | 163 |
| 27 | Regenraum r12 z15 Auswertung Zustandsgrößen | 164 |
| 28 | Regenraum r12 z15 Auswertung Übertragungszahlen | 165 |
| 29 | Regenraum r12 z15 Diagramm Übertragungszahlen | 166 |
| 30 | Referenzeinbau r12 z10 Messdaten, Messung C | 167 |
| 31 | Referenzeinbau r12 z10 Auswertung Zustandsgrößen, Messung C | 168 |
| 32 | Referenzeinbau r12 z10 Auswertung Übertragungszahlen, Messung C | 169 |
| 33 | Referenzeinbau r12 z10 Diagramm Übertragungszahlen, Messung C | 170 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Größen von Luft und Wasser | 18 |
| 2.2 | Zusammenfassung der unterschiedlichen Berechnungsverfahren für die Übertragungszahl K | 34 |
| 3.1 | Am Versuchskühlturm aufgezeichnete Parameter | 37 |
| 5.1 | Speicherplatzeinsparung durch Listenspeicherung | 77 |
| 6.1 | Parameter einer Regenraummessung, Nr. 23, Messung A | 93 |
| 6.2 | Randbedingungen der Simulation, Nr. 23, Messung A | 93 |
| 6.3 | Vergleich der Ausgangsgrößen vom Regenraum, Nr. 23, Messung A | 94 |
| 6.4 | Parameter einer Messung des Referenzeinbaus, Nr. 14, Messung C | 98 |
| 6.5 | Randbedingungen der Simulation, Nr. 14, Messung C | 99 |
| 6.6 | Vergleich der Ausgangsgrößen des Referenzeinbaus, Nr. 14, Messung C | 99 |
| 6.7 | Angepasste Parameter des Referenzeinbaus mit verkürzter Regenzone, Nr. 14, Messung C | 100 |
| 6.8 | Vergleich der Ausgangsgrößen des Referenzeinbaus mit verkürzter Regenzone, Nr. 14, Messung C | 101 |
| 7.1 | Parameter einer Regenraummessung, Nr. 19, Messung B | 107 |
| 7.2 | Randbedingungen der Simulation, Nr. 19, Messung B | 108 |
| 7.3 | Vergleich der Ausgangsgrößen vom Regenraum, Nr. 19, Messung B | 108 |
| 8.1 | Vergleich der unterschiedlichen Bilanzen der Methoden | 126 |
| 1 | Funktionen der Übertragungszahl in Abhängigkeit der Kühlzonenbreite z | 171 |

1 Einführung

1.1 Verdunstungskühltürme

Während in Luftkühlern die Wärmeabgabe aufgrund der stoffdichten Trennung der Fluidströme allein durch eine konvektive Wärmeübertragung an die Umgebungsluft bestimmt ist (Trockenkühlung), nutzen Verdunstungskühltürme zusätzlich die beim Stoffübergang vom zu kühlenden Prozessstrom an die Umgebungsluft benötigte Verdampfungsenthalpie zur Wärmeabfuhr. Der Kühleffekt beruht somit neben der konvektiven Wärmeübertragung im Wesentlichen auf dem Stoffübergang, der sich durch eine Teilverdunstung des zu kühlenden Wassers mit einhergehender Befeuchtung der Kühlluft ausdrückt. Aufgrund der Nutzung der Verdampfungsenthalpie weisen Verdunstungskühltürme im Vergleich zu Trockenkühlern höhere Leistungsdichten auf. Daher werden für die in industriellen Anwendungen notwendige Wärmeabfuhr vorrangig Kühltürme nach dem Verdunstungsprinzip eingesetzt.



Abbildung 1.1: Kühlturm des Kohlekraftwerks Boxberg, Block R

Die theoretisch erreichbare Kühlgrenze ist bei der Verdunstungskühlung nicht die Umgebungstemperatur, sondern die Feuchtkugeltemperatur der Luft. Bei bestimmten Umge-

bungsbedingungen (warm und trocken) ist sogar eine Abkühlung des wärmeabgebenden Prozessstroms unterhalb der Umgebungstemperatur möglich.

Die baugrößten Verdunstungskühltürme sind Naturzugkühltürme, die zum landschaftsbestimmenden Erscheinungsbild von Dampfkraftwerken gehören (siehe Abbildung 1.1). In diesen wird das Prinzip der Verdunstungskühlung genutzt um Wärme auf möglichst niedrigem Temperaturniveau abzuführen und so ein hohes Enthalpiegefälle in der Turbine nutzen zu können. Weitere wichtige Anwendungsgebiete von Verdunstungskühltürmen sind die Kühlung von Strömen bei industriellen Produktionsprozessen sowie die Kühlung von Gebäuden und Rechenzentren. In den meisten Fällen werden Gegenstromkühltürme eingesetzt, in denen Luft und Wasser in entgegengesetzte Richtungen strömen. Eine weitere mögliche Strömungsführung ist die Kreuzstromführung (Kreuzstromkühlturm).



Abbildung 1.2: Kühleinbauten im Kühlturm Boxberg, Werk IV

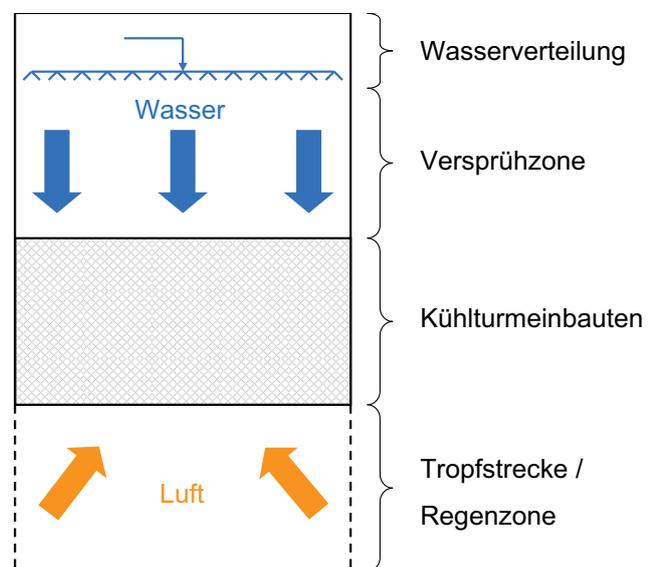


Abbildung 1.3: Aufteilung des Gegenstrom-Kühlprozesses

Einen wesentlichen Einfluss auf die Leistung des Verdunstungskühlturms hat die sich ausbildende Fläche der Phasengrenze zwischen Luft und Wasser. Sie hat sowohl für den Prozess der Wärmeübertragung als auch der Stoffübertragung (Verdunstung / Kondensation) zwischen Luft und Wasser entscheidende Bedeutung. Die Übertragungsfläche wird über sogenannte Struktureinbauten, die in den Kühlturm integriert werden (siehe Abbildung 1.2), vergrößert. Dadurch lässt sich der Gegenstrom-Kühlturm in drei Zonen einteilen (siehe Abbildung 1.3): Das abzukühlende Wasser wird durch Wasserverteilungssysteme versprüht (Versprühzone). Dadurch wird eine gleichmäßige Beaufschlagung der Kühlturmeinbauten mit Wassertropfen erreicht (Zone mit Kühlturmeinbauten). Nach Durchlaufen der Einbauten tropft das Wasser aus diesen heraus (Regenzone). Die Luft strömt dabei in allen Zonen stets in die entgegengesetzte Richtung der herabfallenden / herabfließenden Wassertropfen (Gegenstromführung).

Die eingesetzten Kühlturmeinbauten bestehen aus dünnen – meistens geriffelten – Folien, aus denen wabenartige Kanäle geformt werden, um eine möglichst große Übertragungsfläche bei geringen Strömungsdruckverlusten zu erhalten. Auch wird durch diese Einbauten angestrebt, eine hohe Durchmischung der Fluidströme selbst und untereinander zur Intensivierung des Wärme- und Stoffübergangs zu erzielen. Je besser die Fluide durchmischt werden (Turbulenz), desto effektiver verläuft die Wärme- und Stoffübertragung im Kühlturm.

Die gekoppelte Wärme- und Stoffübertragung im Verdunstungskühlturm lässt eine Berechnung als einfachen Wärmeübertrager nicht zu. Die Berechnung der Prozesse der Verdunstungskühlung (auch offene Rückkühlung genannt) ist – im Gegensatz zur Trockenkühlung – aufgrund des zweiphasigen Zweistoffgemisches komplex.

Eine erste theoretische Betrachtung und mathematische Beschreibung der Verdunstungskühlung veröffentlichte *MERKEL* im Jahr 1925 [1]. Auch heutige Berechnungsmodelle bauen auf *MERKEL's* Ansatz auf und sind rechentechnische Weiterentwicklungen der von *MERKEL* vorgeschlagenen mathematischen Behandlung.

Die Berechnungsmethodik beruht auf folgendem Grundprinzip:

- Der gesamte Kühlturm bildet einen Bilanzraum für den Wärme- und Stoffübergang (Betrachtung der Ein- und Ausgangszustände).
- An einem realen Kühlturm werden die Eingangs- und Ausgangsgrößen experimentell vermessen.
- Aus den Messdaten der Ein- und Ausgangsgrößen wird eine dimensionslose Kennzahl – die Übertragungszahl K – bestimmt.
- Diese setzt die Enthalpieänderung der Luft ins Verhältnis zu der Enthalpieänderung des Wassermassestroms.
- Über dieses Vorgehen ist eine Bewertung des Kühlprozesses und damit ein Vergleich verschiedener Kühlturm-Konfigurationen möglich.
- Durch die Veränderung von nur einem Parameter kann der Einfluss dieser Veränderung ermittelt werden.

1.2 Forschungsbedarf im Bereich der Verdunstungskühlung

Weiterentwicklungen von Kühltürmen haben hohe Übertragungsleistungen bei kleinen Baugrößen zum Ziel. Um dieses zu erreichen, wird die Geometrie der Struktureinbauten zur Verbesserung des Kühleffektes variiert. Wie oben stehend beschrieben, erfordert die Bewertung des erzielten Kühleffekts immer experimentelle Untersuchungen.

Die notwendigen Experimente sind in gewerblich genutzten Kühltürmen nur schwer durchführbar, da hier die Eingangstemperatur des Wasser je nach Prozess unterschiedlich

sein kann und in der Regeln nicht beeinflussbar ist. Zudem ist die Installation von Messtechnik an großen Anlagen aufwändig und kostenintensiv. Daher sind umfangreiche Messkampagnen im laufenden Betrieb kaum zu realisieren.

Für die Untersuchung von Struktureinbauten wird daher auf Versuchskühltürme zurückgegriffen. Sie bieten die Möglichkeit, mit überschaubarem Aufwand die Leistung von Kühlturm-Konfigurationen mit verschiedenen Einbauten zu ermitteln. Versuchskühltürme weisen einen kleineren Querschnitt im Vergleich zu realen Kühltürmen auf, was die Installation präziser Messtechnik zur Erfassung der Ein- und Austrittszustände von Luft und Wasser vereinfacht. Ebenfalls ist es am Versuchskühlturm möglich, die Kühlwasser-Eintrittstemperaturen sowie die Volumenströme von Luft und Wasser für die Experimente in weiten Grenzen frei zu wählen.

Am Versuchskühlturm ist folgendes Vorgehen üblich:

- Die zu untersuchenden Kühlturmeinbauten werden in den Versuchskühlturm integriert.
- Durch eine Vielzahl von Messungen wird ermittelt, wie sich Veränderungen der Randbedingungen (Wasser-Eintrittstemperatur, Massestromverhältnis) auf die erzielbare Kühlleistung auswirken.
- Mit den am Versuchskühlturm gewonnenen Messdaten wird über bekannte Berechnungsmethoden die Güte (die Übertragungszahl K) der jeweiligen Konfiguration bestimmt.

Trotz der Verwendung von geometrisch einfachen Versuchskühltürmen ist eine systematische Variation der Geometrieparameter von Struktureinbauten sehr zeitaufwändig und kostenintensiv. Dieses begründet sich durch die notwendige Anfertigung von Prototypen und umfangreiche Versuchsreihen inklusive deren Auswertung.

Ebenso ist ein Versuchskühlturm nicht in der Lage, einen Einblick in die inneren ablaufenden Prozesse zu gewähren, da nur die Ein- und Ausgangszustände der Fluidströme bestimmt werden können. Innerhalb des Kühlturms ist die messtechnische Bestimmung der Zustandsgrößen des zweiphasigen Stoffgemisches aus Luft und Wasser nicht möglich. Es lässt sich mit dem beschriebenen Vorgehen nur eine für den gesamten Kühlturm gültige Übertragungszahl K in Abhängigkeit des Massestromverhältnisses und der Wasser-Eintrittstemperatur bestimmen.

Auch am Versuchskühlturm sind grundsätzliche Betrachtungen begrenzt. Es sind nicht alle Parameter frei wählbar, da die Luftbedingungen von der Umgebung vorgegeben sind. Eine entkoppelte Veränderung der Luft-Eintrittstemperatur und des Wassergehalts der Luft x_L ist bei Versuchen nicht ohne übermäßig großen technischen Aufwand realisierbar.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Untersuchungen am Versuchskühlturm einen hohen experimentellen Aufwand erfordern und, wie oben erörtert, einige Betrachtungen

gar nicht möglich sind. Für die Weiterentwicklung von Kühltürmen wäre es von großem Vorteil ein Vorgehen zu entwickeln, welches es erlaubt die Anzahl an notwendigen Versuchen zu reduzieren.

1.3 Simulation der Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge in einem Verdunstungskühlturm

Ein zu erstellendes Simulationsmodell wird auf die wesentlichen Punkte reduziert und so der Berechnungsaufwand eingeschränkt. Das Modell wird gegenüber der Realität stark vereinfacht, zeigt aber in den betrachteten Punkten ein ähnliches Verhalten wie das Realsystem. Es ist daher keine Kopie des Realsystems, sondern eine Methodik, das tatsächliche Verhalten des Realsystems nachzuempfinden [2].

An dem oben genannten Punkt setzt die vorliegende Arbeit an. Versuche könnten eingespart werden, wenn es gelingt, ein geeignetes mathematisches Modell der Wärme- und Stoffübergänge innerhalb des Kühlturms zu erstellen.

Grundsätzlich scheinen hierzu Strömungssimulationen ein geeignetes Mittel zu sein. Auch wenn entsprechende Simulationssoftware die hin- und rücklaufenden Wärme- und Stoffübergangsphänomene in einem zweiphasigen Zweikomponenten-Strömungssystem prinzipiell abbilden könnte, führt die erforderliche feine Auflösung zu sehr großen und daher zeitaufwändigen Simulationsrechnungen.

Für die mathematische Modellierung eines Verdunstungskühlturms ist zu beachten, dass sich die Transportkoeffizienten der Wärme- und Stoffübertragung analytisch nur ungenau bestimmen lassen. Jedoch kann über eine Kombination von Messung und Simulationsmodell eine inverse Ermittlung der Transportkoeffizienten erfolgen. Dafür sind die Simulationen in der Regel vielfach zu durchlaufen, was vereinfachte und daher schnelle Modelle erforderlich macht.

Ein mit zutreffenden Transportkoeffizienten parametrisiertes Simulationsmodell würde qualitativ und quantitativ das gleiche Verhalten wie der reale Kühlturm zeigen. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Temperaturänderungen der Prozessströme im Kühlturm ist der Einfluss der Temperaturabhängigkeit der in die Berechnung der Übertragungskoeffizienten eingehenden Stoffdaten zu vernachlässigen. Diese Transportkoeffizienten (der Wärmeübergangskoeffizient α und der Stoffübergangskoeffizient β) sind im Wesentlichen abhängig von den Strömungsgeschwindigkeiten der Fluide.

Daher sollte ein an einem Massestromverhältnis kalibriertes Modell in der Lage sein, aussagekräftige Ergebnisse auch über die Veränderung der Eintritts-Temperaturen zu gewinnen. Dadurch könnten diese Versuche eingespart werden.

Mit der mathematischen Beschreibung des Wärme- und Stoffübergangs im Kühlturm wäre es ebenso möglich, die Zustandsänderungen der Prozessströme Luft und Wasser

entlang ihrer Strömungswege zu berechnen. Ein solches Modell würde einen Einblick in das Innere des Kühlturms erlauben, der messtechnisch am realen Kühlturm nicht zu erfassen ist [3]. Durch die Kenntnis der Zustandsgrößen innerhalb des Kühlturms könnten die einzelnen Zonen über lokale Übertragungszahlen einfach bewertet werden. Auf diese Weise lassen sich ebenso die Einflüsse der Höhen der Versprüh- und der Regenzone ermitteln, welche für die Auslegung im Kühlturmbau von wesentlicher Bedeutung sind.

Anhand der Kombination aus Modell und Versuchskühlturm lassen sich Transportgrößen ermitteln, die es ermöglichen die funktionalen Abhängigkeiten von den Masseströmen zu untersuchen und gegebenenfalls in Form von Regressionsfunktionen auszudrücken. Dieses hätte zur Folge, dass eine erneute Kalibrierung des Modells bei jeder Massestromänderung entfallen könnte.

Skizziertes Vorgehen würde es erlauben den experimentellen Anteil der Untersuchungen am Versuchskühlturm zu minimieren, indem mit einem vereinfachten Simulationsmodell verschiedene Konfigurationen des Kühlturms untersucht und verglichen werden. Die Folge wäre eine Einsparung von Ressourcen in Form von Strom, Wasser und Wärme. Zudem wäre die Messdauer verringert, da weniger Punkte gemessen werden müssten und die Ergebnisse der Simulation schneller vorlägen als die einer Messung.

1.4 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

1.4.1 Zielstellung

Zielstellung der Arbeit ist die Entwicklung eines möglichst einfachen mathematischen Modells, das für eine versuchsbegleitende Simulation geeignet ist. Die für den Kühlprozess relevanten physikalischen Phänomene sollen im Modell deterministisch beschrieben werden, was es erlaubt, Einblick in die Prozesse im Kühlturminneren zu erhalten. Auf diese Weise sind gezielte Eingriffs- und Entwicklungsmöglichkeiten, die durch den Blick von außen verwehrt bleiben, das Ziel der erstellten Simulation.

Aufgrund des symmetrischen Aufbaus des Kühlturms wird eine zweidimensionale Darstellung als ausreichend erachtet. Ziel ist es, ein zweidimensionales, ortsdiskretes Zellenmodell der Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge im Kühlturm zu erstellen.

Das mathematische Modell soll folgende Eigenschaften besitzen:

- Die Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge entlang der Strömungswege von Luft und Wasser im Kühlturm sollen abgebildet werden können.
- Die Eingangsbedingungen für Luft und Wasser sollen in einem sinnvollen Bereich frei wählbar sein.
- Eine flexible und einfache Erstellung unterschiedlicher Geometrien soll gewährleistet sein.

- Eine ständige Kenntnis der Masse- und Energiebilanzen soll der automatischen Selbstkontrolle der Berechnungsvorgänge dienen.
- In überschaubarer Berechnungszeit soll das Modell valide Ergebnisse liefern.
- Die Ergebnisse sollen aufbereitet und übersichtlich dargestellt werden.

Für die Kalibrierung und Validierung an weiteren Betriebspunkten des Simulationsmodells steht der Versuchskühlturm der Technischen Universität Dresden zur Verfügung. Dieser Versuchskühlturm bildet das Realsystem, welches in ein mathematisches Modell überführt werden soll.

Die beschriebene Vorgehensweise, mit Kombination aus Messung und Simulation Versuche einsparen zu können, soll mit Hilfe des erstellten, vereinfachten Modells und mit Hilfe des Versuchskühlturms der Technischen Universität Dresden auf Umsetzbarkeit untersucht werden.

1.4.2 Aufbau

Ausgehend von einer zusammenfassenden Beschreibung der technischen und physikalischen Grundlagen der Verdunstungskühlung in Abschnitt 2.2 wird in Abschnitt 2.4 ein Überblick über die bekannten Berechnungsmethoden gegeben und kritisch diskutiert. Die bisher bekannten Berechnungsmethoden für die Kühlturmbewertung werden miteinander verglichen und ein Bezug zum geplanten Vorgehen hergestellt. Dabei werden der aktuelle Stand des Wissens und aktuelle Forschungsvorhaben erörtert.

Im Anschluss wird in Kapitel 3 der Versuchskühlturm der Technischen Universität Dresden kurz vorgestellt um anhand dessen in Kapitel 4 die Möglichkeiten und Grenzen der numerischen Strömungsmechanik (computational fluid dynamics, CFD) zu zeigen. Es wird ein stark vereinfachtes Modell erstellt und mit diesem die in ANSYS CFX zur Verfügung stehenden Methoden auf ihre Anwendbarkeit auf den Kühlprozess überprüft. Bei einer Strömungssimulation durch CFD-Software sind feine Netze notwendig um Grenzschichtphänomene abzubilden. In Kombination mit der gekoppelten Wärme- und Stoffübertragung führt das zu großen komplexen Modellen. Ziel der versuchsbegleitenden Simulation sind schnelle Modelle, die mit wenig Aufwand aussagekräftige Ergebnisse erzielen. Es wird davon ausgegangen, dass CFD-Software dafür nicht geeignet ist. Dennoch wird in Kapitel 4 herausgearbeitet wie ein solches Modell erstellt wird.

In Kapitel 5 richtet sich der Schwerpunkt der Arbeit auf die Erstellung eines eigenen Simulationsmodells und deren numerische Umsetzung. Zunächst wird auf das Modellkonzept und die physikalischen Grundlagen des Modells eingegangen. Es wird diskutiert, welche numerischen Hindernisse sich ergeben und wie diese bewältigt werden können. Daraus wird schließlich ein Berechnungsmodell für den Kühlprozess entwickelt. Im Anschluss wird das

erstellte Modell in Kapitel 6 auf seine Anwendbarkeit und Genauigkeit anhand von zwei Anwendungsfällen überprüft. Mit dem Modell werden in Abschnitt 6.1 ein Zustand des Regenraums und in Abschnitt 6.2 ein Zustand des Kühlturms mit einem Referenzeinbau untersucht. Auf diese Weise wird durch Messungen die Validität des Modells überprüft.

Nach der Reproduktion von durch Messungen bekannten Zuständen werden in Abschnitt 7.1 weitere Untersuchungen, wie die Verläufe der Zustandsgrößen von Luft und Wasser innerhalb des Kühlturms durchgeführt. Ob die Transportgrößen vom Massestromverhältnis abhängig sind und wie dieser Einfluss deutlich wird, zeigt der anschließende Abschnitt. Im Folgenden wird der Verlauf der Übertragungszahl K und der Zustand der Luft am Austritt näher untersucht. Das Kapitel der Simulation des Regenraums schließt mit der Variation der Eingangsparameter (Luft- und Wasser-Eintritts-Temperatur, Wassergehalt der Luft) ab.

Im Abschnitt 7.2 über die Simulation der Referenzgeometrie wird der Einfluss der Übertragungsfläche auf die Übertragungszahl K ermittelt. Durch die ortsabhängige Modellierung kann auch hier in das Innere des Struktureinbaus hineingeschaut werden. Eine einfache Abgrenzung und Bewertung der einzelnen Zonen im Kühlturm (Versprühzone, Kühlturmeinbau, Regenzone) ist so möglich.

In den zusammenfassenden Kapiteln 8 und 9 werden die Ergebnisse diskutiert und schließlich ein Fazit mit Ausblick gezogen.

2 Technische und theoretische Grundlagen von Kühltürmen

2.1 Varianten von Rückkühlwerken

Zur Kühlung von Prozesswasser werden Trocken- und Nasskühltürme eingesetzt. Kühltürme mit Trockenkühlssystemen haben physikalisch bedingt eine theoretisch maximal erreichbare Kühlgrenze, die gleich der Umgebungstemperatur ist. Gerade bei hohen Außentemperaturen ist dieses ein Nachteil von Trockenkühlssystemen. Dennoch finden diese vor allem in Gebieten mit geringer Wasserverfügbarkeit Anwendung. Bei Nasskühlssystemen wird meist Oberflächenwasser oder Grundwasser zur Kühlung genutzt. Dabei kommt dieses in direkten Kontakt mit der Umgebungsluft und ein Teil des Wassers verdunstet – üblicherweise 1 – 3 % des Wasserdurchsatzes. Die für die Verdunstung erforderliche Wärmemenge wird dem Wasser zusätzlich zum konvektiv übertragenem Wärmestrom entzogen, was einen zusätzlichen Kühleffekt zur Folge hat. Die dabei theoretisch erreichbare Kühlgrenze ist die Feuchtkugeltemperatur t_F der Luft, die insbesondere in den Sommermonaten einige Grad unterhalb der Lufttemperatur t_L liegt¹. Der Luftmengenbedarf ist bei der Nasskühlung aufgrund der Kombination aus latenter und sensibler Wärmeübertragung geringer als bei der Trockenkühlung. Somit ist mehr Leistung auf geringerer Fläche, im Vergleich zur Trockenkühlung, möglich.

In der vorliegenden Arbeit werden nur die **offenen** Kühlsysteme, wie sie hauptsächlich in Deutschland verwendet werden, betrachtet. Die offenen Kühlsysteme werden in folgende Arten unterschieden:

2.1.1 Durchlaufkühlung / Ablaufkühlung

Die Durchlaufkühlung ist an Flüssen mit hohen Volumenströmen oder an der Küste möglich. Es wird Wasser der Vorflut entnommen und anschließend über Grob-, Feinrechen und Siebmaschine gereinigt und zum Kondensator geleitet (siehe Abbildung 2.1). Ohne Ablaufkühlung wird das erwärmte Wasser ohne den Zusatz chemischer Stoffe direkt zurück in den Fluss oder das Meer geleitet. Häufiger wird zusätzlich eine Ablaufkühlung über einen

¹An dieser Stelle sei erwähnt, dass sich in der Kühlturmtechnik die Notation „t“ für die Celsiusstemperatur über viele Jahre etabliert hat. Aus diesem Grund wird auch in dieser Arbeit für die Temperatur in Grad Celsius gemäß DIN1345 ebenfalls der Buchstabe „t“ (anstatt des an der Technischen Universität Dresden üblichen „θ“) verwendet.

Kühlturm realisiert. In diesem wird das Wasser zusätzlich gekühlt und mit Sauerstoff angereichert, bevor es wieder dem Fluss zugeführt wird. Oft ist eine Ablaufkühlung notwendig, da die Einleitbedingungen in offene Gewässer streng geregelt sind [4].

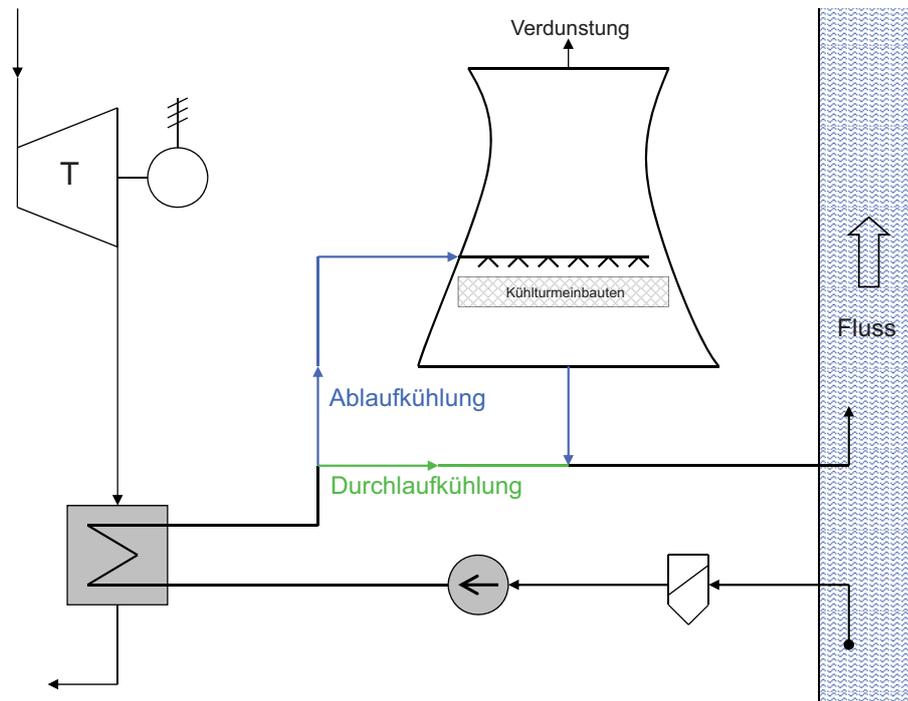


Abbildung 2.1: Vereinfachtes Schema einer Durchlaufkühlung

Der Luftvolumenstrom kann durch große Bauhöhen mittels Naturzug oder erzwungen durch Ventilatoren erzeugt werden. Vorteile des *Naturzugkühlturms* sind die geringeren Betriebskosten, der Nachteil hingegen ist die große Raumanforderung und die optische Integration des teils sehr hohen Kühlturms (bis zu 200 m) in das Stadt- oder Landschaftsbild. Vorteil der erzwungenen Bauart, die in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen hat, ist wiederum eine geringere Bauhöhe und geringere Grundfläche (höhere spezifische Kühlleistung). Dem entgegen stehen durch den zusätzlichen Verbrauch von elektrischer Energie der Ventilatoren vergleichsweise hohe Betriebskosten. Zudem sind die Investitionskosten durch die Ventilatoren höher.

2.1.2 Umlaufkühlung

Die offene Umlaufkühlung ist die am häufigsten angewandte Art der Rückkühlung. Das Wasser wird im Kreislauf befördert, im Kühlturm runter gekühlt und immer wieder in den Kreislauf zurückgeführt, wie es in der Abbildung 2.2 zu erkennen ist. Bei der offenen Rückkühlung verdunstet ein Teil des Wassers. Dieses hat zur Folge, dass sich der Gehalt an gelösten und ungelösten Stoffen aufkonzentriert. Dieser Effekt wird Eindickung des Kühlwassers genannt. Um dieses zu vermeiden, wird ein Teil des Wassers abgeflutet und

Zusatzwasser (Frischwasser) zugeführt. Des Weiteren ist eine chemische Wasserbehandlung notwendig um Kalk- und Algenbildung zu minimieren. Ebenso müssen die Verluste durch Verdunstung und Versprühung ausgeglichen werden [4].

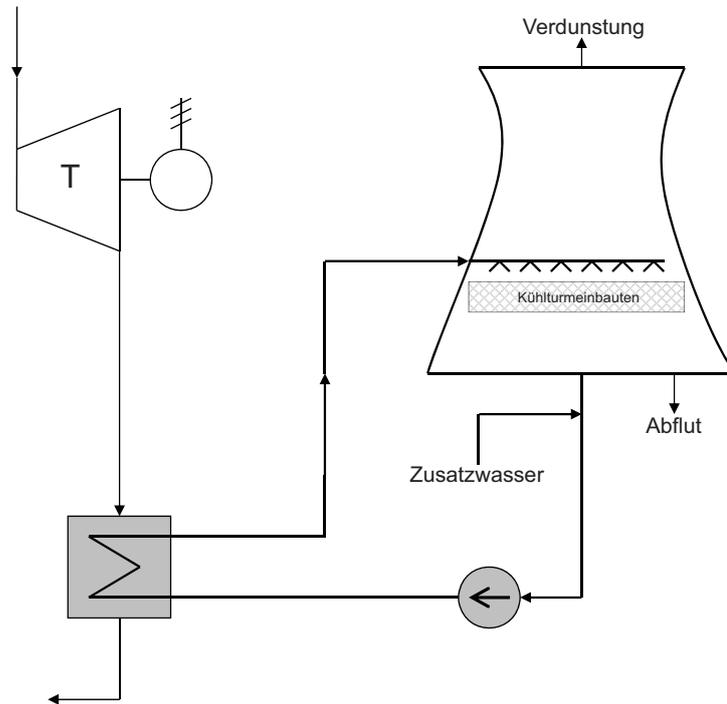


Abbildung 2.2: Vereinfachtes Schema einer Umlaufkühlung

Genau wie bei der Durchlaufkühlung mit Ablaufkühlung, kann der Luftvolumenstrom über Ventilatoren oder über den Naturzugeffekt beziehungsweise über Kombination aus beidem (*Rundkühlturm* oder im Englischen: *fan assisted natural draft cooling tower*) erreicht werden.

Der in Kapitel 3 vorgestellte Versuchskühlturm der Technischen Universität Dresden ist ein offener Gegenstromkühlturm nach dem Umlaufprinzip mit einem kleinen Speicherbecken. Durch eine stetige Abflut und Frischwasserspeisung ist eine chemische Behandlung des Wassers nicht notwendig. Die vertikalen Dimensionen unterscheiden sich von einem Großkühlturm nur unwesentlich, so dass der Verlauf des Wassers im Versuchskühlturm, beschränkt auf einem Quadratmeter, dem Verlauf im Großkühlturm sehr ähnlich ist.

2.1.3 Hybridkühlung

Der *Hybridkühlturm* stellt eine Mischung aus Nass- und Trockenkühlung (geschlossener Kreislauf) dar. Hier gibt es eine große Bandbreite von Anwendungen und Ausführungen, wobei die Begrifflichkeiten teils widersprüchlich verwendet werden. Generell wird bei der Hybridkühlung ein Teil des warmen Wassers vor der Verrieselung im Kühlturm über Wärmeübertrager geleitet (siehe Abbildung 2.3). Dieser kühlt das Wasser mit Luft vor (Trockenkühlung). Dadurch wird die Luft vor Austritt aus dem Kühlturm vorgewärmt. Zudem

findet eine Vermischung aus gesättigter Luft aus dem Nassteil sowie dem nicht gesättigten Luftstrom aus dem Trockenteil statt. Durch die erhöhte Luft-Austritts-Temperatur ist es dann möglich Schwadenbildung – teils stark – zu reduzieren. Dieses ist jedoch in technischer Hinsicht aufgrund vermindertem Auftrieb, höheren Druckverlusten und zusätzlicher elektrischer Verbraucher oft nicht rentabel. Die mögliche Einsparung von Verdunstungsverlusten ist maximal 10 – 15 % und stellt damit nur ein geringes Einsparpotential dar [5]. Daher ist beispielsweise die Nähe zu Wohngebieten ein größerer Einflussfaktor, um die Bildung von großen Dampfschwaden zu vermeiden. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass bei hohen Außentemperaturen durch die zusätzliche Verdunstungskühlung eine deutlich bessere Kühlleistung gegenüber der reinen Trockenkühlung erzielt werden kann [4].

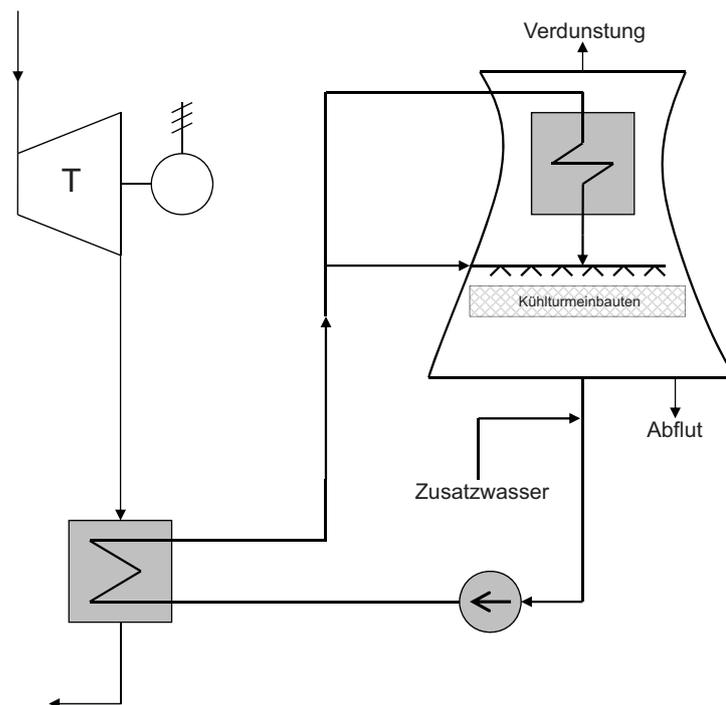


Abbildung 2.3: Vereinfachtes Schema einer Hybridkühlung

Der Luftvolumenstrom wird bei Hybridkühltürmen immer durch Ventilatoren erzwungen erzeugt. Aus diesem Grund haben Hybridkühltürme eine relativ geringe Bauhöhe im Vergleich zu Naturzugkühltürmen (in der Abbildung 2.3 schematisch nicht berücksichtigt).

Die Integration in das Landschafts- oder Stadtbild und die Genehmigungsplanung spielen eine entscheidende Rolle, welche Bauart von Kühltürmen zum Einsatz kommt. Hybridkühltürme haben durch ihre geringe Bauhöhe und geringe Schwadenbildung in diesem Gesichtspunkt deutliche Vorteile gegenüber den Naturzugkühltürmen.

Letztendlich ist die Variantenentscheidung eine Minimumsuche, die aufgrund von Investitionskosten und Betriebskosten entschieden werden muss. Diese müssen sich mit den Standort spezifischen Gegebenheiten und Regelungen decken [5]. Eine Entscheidung welche Bauart die optimale ist, hängt also maßgeblich vom Standort ab.

2.2 Theoretische Grundlagen des Kühlprozesses

2.2.1 Grundprozess der offenen Rückkühlung

Alle vorgestellten offenen Rückkühlarten haben immer den gleichen Grundprozess. Das Wasser wird nach dem Durchlaufen der Versprühzone über Einbauten mit definierter Höhe verteilt. Anschließend erfolgt der Übergang in die Regenzone, bevor sich das Wasser in der Kühlturmtasse sammelt (siehe Abbildung 2.4). Die Umgebungsluft wird durch Ventilatoren oder Naturzug angeregt und im Gegenstrom (eine Kreuzstrom-Führung ist ebenfalls möglich) durch den Kühlturm geleitet.

Bei der offenen Rückkühlung tritt das warme Prozesswasser direkt mit – in der Regel kühlerer – Umgebungsluft in Kontakt. Aufgrund der Temperaturdifferenz der Medien wird ein konvektiver Wärmestrom vom Wasser an die Luft übertragen. Bei ungesättigter feuchter Luft findet zusätzlich zum konvektiven Wärmestrom ein Stofftransport von Wasser in die Luft statt. Für diesen Verdunstungsprozess ist Energie notwendig, die dem Wasser zusätzlich entzogen wird. Dabei nimmt sie Wärme auf und wird aufgrund der Verdunstung befeuchtet. Aufgrund des zusätzlichen Kühleffekts, der in der Regel den größeren bilanziellen Anteil ($\sim 70\%$) aufweist, ist es möglich das Wasser auch unterhalb des Temperaturniveaus der Umgebung zu kühlen. Je nach Umgebungsbedingungen können beide Transportvorgänge ebenso in die andere Richtung ablaufen.

Nach einem Tropfenabscheider, welcher von dem Luftstrom mitgerissene Tropfen auffängt und so die Wasserverluste vermindert, tritt die Luft aus dem Kühlturm aus.

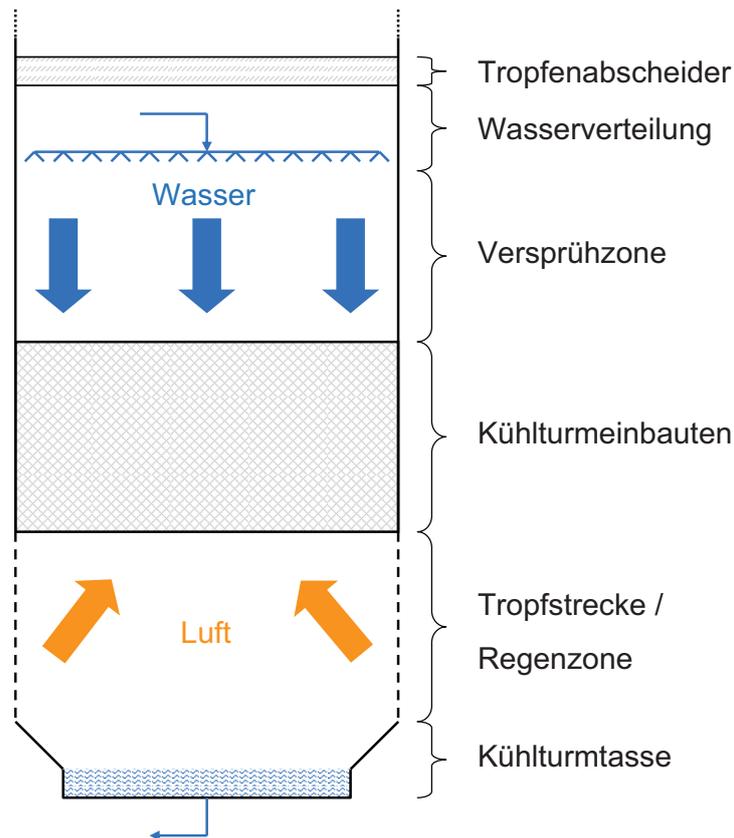


Abbildung 2.4: Grundschemata aller offenen Kühlprozesse

Schwerpunkt dieser Arbeit ist es den Vorgang von der Versprühzone bis zum Ende der Tropfstrecke zu untersuchen, zu modellieren und zu simulieren.

2.2.2 Struktureinbauten in Kühltürmen

Grundsätzlich werden Struktureinbauten vom Typ *Low Fouling Fill* für hohe Fremdstoffbelastungen des Kühlwassers und *Clean Water Fill* für kaum belastete Kühlwässer unterschieden, diese unterteilen sich wiederum in unterschiedliche Kanalweiten und unterschiedliche geometrischer Gestalt dieser Kanäle. Bei dem Typ *Low Fouling Fill* wird zwischen Folieneinbauten (*Vertical Foil Fill*, vergleiche Abbildung 2.5 aus [6]) und Gittereinbauten (*Grid Fill*, siehe Abbildung 2.7 aus [6]) differenziert. Hergestellt werden die meisten modernen Arten von Einbauten aus Kunststoffen zum Beispiel Polyvinylchlorid (PVC), Polypropylen (PP), Polyethylen (PE). *Clean Water Fills* sind mit einer schrägen Kanalführung aufgebaut, sie werden international als *Cross Corrugated Foil Fill* bezeichnet [7], siehe Abbildung 2.6 aus [6].

Hinsichtlich der Einsatzfähigkeit bestehen zwischen den beiden Haupttypen *Low Fouling Fill* und *Clean Water Fill* große Unterschiede, die sich im Design widerspiegeln. Grundsätzlich gilt, je schlechter das zu kühlende Wasser beschaffen ist, desto gröber und unprofiliertes ist die einzusetzende Struktur, um einen Dauerbetrieb damit durchführen zu können. Eine



Abbildung 2.5: Low Fouling Fill



Abbildung 2.6: Cross Corrugated Foil Fill



Abbildung 2.7: Grid Fill

gröbere Struktur bedeutet auch eine geringere spezifische Oberfläche, die maßgebend für die übertragene Energie ist. Daher weisen Hochleistungseinbauten des Typs *Clean Water Fill* auch die höchste Oberfläche auf, während Gittereinbauten dem Kühlprozess vergleichsweise geringere Übertragungsflächen anbieten. Folglich wird die Leistung der Kühleinbauten mit kleiner werdender Übertragungsfläche immer geringer.

2.2.3 Zustandsverläufe der Fluidströme

Kühlprozesse lassen sich ebenso wie andere thermodynamische Prozesse in Zustandsdiagrammen anschaulich darstellen. Der Zustandsverlauf der feuchten Luft wird im h,x -Diagramm dargestellt [8], siehe Abbildung 2.8 aus [9]. Beim klassischen Prozess der Verdunstungskühlung wird der Luft zusätzlich zur konvektiv übertragenen Wärme auch die latente Wärme der verdunsteten Wassermasse zugeführt. Somit erwärmt sich die Luft und gleichzeitig steigt der Wassergehalt der Luft. Dabei kann es vorkommen, dass die Luft bis in den gesättigten Bereich befeuchtet wird.

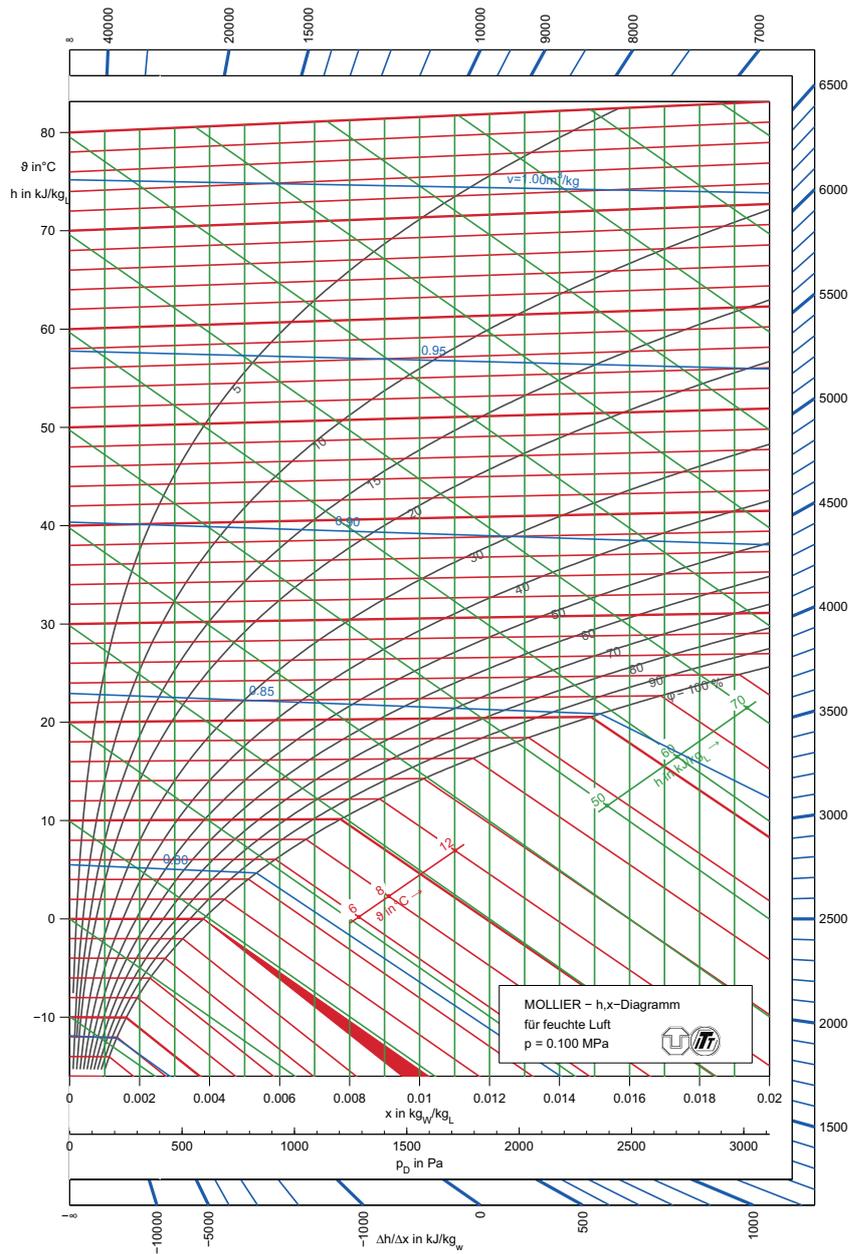


Abbildung 2.8: MOLLIER h,x-Diagramm für feuchte Luft

Ziel des Rückkühlprozesses ist es, die Temperatur des Wassers zu verringern. Die Temperaturdifferenz um die sich das Wasser abkühlt wird als *Kühlzonenbreite* z bezeichnet²:

$$z = \Delta T_W = t_W^E - t_W^A. \quad (2.1)$$

Die theoretisch maximal mögliche erreichbare Temperatur (*Kühlgrenztemperatur*) bei der offenen Rückkühlung ist die *Feuchtkugeltemperatur* t_F der Luft. Somit ist es auch möglich das Wasser unter die Umgebungstemperatur t_L herunter zu kühlen. Jedoch wird die Kühlgrenztemperatur theoretisch nur bei einer unendlich großen Übertragungsfläche

²Eine übersichtliche Auflistung vieler in der Kühlturmtechnik verwendeten Größen ist im Anhang B zusammengefasst

erreicht. Die Differenz zwischen Kühlgrenztemperatur und Wasser-Austritts-Temperatur wird *Kühlgrenzabstand* a genannt und liegt in der Regel über drei Kelvin ($a > 3 \text{ K}$).

Der Zustandsverlauf von Luft und Wasser lässt sich im h,t -Diagramm darstellen (siehe Abbildung 2.10). Der Prozess, in dem die eintretende Luft kühler ist als das eintretende Wasser ($t_L^E < t_W^E$) wird *gegensinnige* Verdunstungskühlung genannt, da sich die Temperaturen von Luft und Wasser beim Übertragungsvorgang im Gegesinne ändern. Ist hingegen die eintretende Luft wärmer als das eintretende Wasser ($t_L^E > t_W^E$) wird vom *gleichsinnigen* Übertragungsvorgang gesprochen. Die Temperaturänderungen von Luft und Wasser erfolgen im gleichen Sinne. Dabei kann, bei Betrachtung der Temperaturverläufe im Kühlturm, ein gleichsinniger Vorgang zwar in einen gegensinnigen Vorgang umschlagen, aber niemals ein gegensinniger Vorgang in einen gleichsinnigen [10]. Es muss aber erwähnt werden, dass dieses in der Praxis nur bei sehr bestimmten Umweltbedingungen (hohe Luft-Eintritts-Temperatur, sehr trocken) nur sehr selten der Fall ist. Eine weitere mögliche Zustandsänderung der Luft besteht darin, dass die Luft kälter aus dem Kühlturm austritt, als sie eingetreten ist und sich dennoch das Wasser abkühlt. Der Effekt der Verdunstung schafft es beide Prozessströme gleichzeitig zu kühlen. Dieses zeigt, wie viel Potential in der Kühlung mittels Verdunstung steckt. Eine genaue Beschreibung aller theoretisch möglichen Prozesse wird in dem Abschnitt 5.3.3 erfolgen.

2.2.4 Energie- und Massebilanzen der Fluidströme

Um ein grundlegendes Verständnis für die Vorgänge im Kühlturm zu erhalten, ist es notwendig zunächst die Masse- und Energiebilanzen von Luft und Wasser im Kühlturm aufzustellen. Als Beispiel dient eine infinitesimal kleine Modellzelle, wie in der Abbildung 2.9 dargestellt.

Alle austretenden Parameter von den zwei gegenläufigen Komponenten Luft und Wasser sind unbekannt. Zudem kann die Komponente Wasser sowohl flüssig als auch gasförmig vorliegen. Dieses stellt die besondere Herausforderung bei der Simulation der Verdunstungskühlung dar. Die Luft tritt mit einem definierten Wassergehalt in den Kühlturm ein. Das Wasser wird im Gegenstromkühlturm von oben eingespritzt. Aufgrund des Konzentrationsunterschiedes des Wassers im System, verdunstet ein Teil des eingeleiteten Wassers an der Fläche A der Phasengrenze G . Die dafür notwendige Energie (Verdampfungsenthalpie) wird dem flüssigen Wasser entzogen, so dass es sich abkühlt. Parallel dazu wird ein konvektiver Wärmestrom vom Wasser an die kühlere Luft übertragen. Beim bilanziellen Vergleich hat in den meisten Fällen der Effekt der Verdunstung den größeren Anteil an der Abkühlung des Wassers.

Neben dem typischen Vorgang der Verdunstungskühlung sind noch weitere physikalische Effekte möglich, die berücksichtigt werden müssen. Das erstellte Simulationsmodell muss

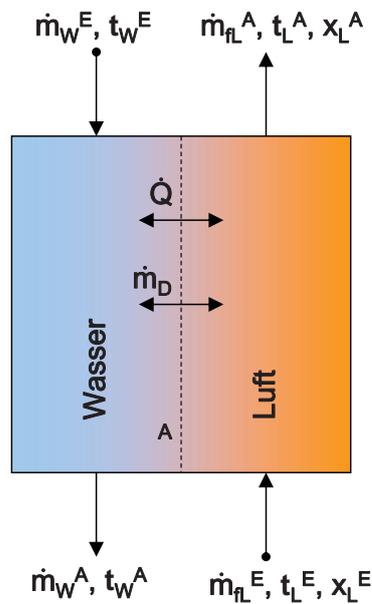


Abbildung 2.9: Bilanzraum Kühlturm

alle theoretisch möglichen Prozesse abbilden können. Sind diese mathematisch genau definiert, können die unbekanntesten Austrittsgrößen von Luft und Wasser berechnet werden.

In der Tabelle 2.1 sind zur Übersicht noch einmal alle Größen von feuchter Luft und Wasser zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Größen von Luft und Wasser

| | WASSER | | LUFT | |
|---------------------------------|------------|---------------|--------------|------------------|
| Eintritt: (bekannt) | Massestrom | \dot{m}_W^E | Massestrom | \dot{m}_{fL}^E |
| | Temperatur | t_W^E | Temperatur | t_L^E |
| | | | Wassergehalt | x_L^E |
| Austritt: (unbekannt) | Massestrom | \dot{m}_W^A | Massestrom | \dot{m}_{fL}^A |
| | Temperatur | t_W^A | Temperatur | t_L^A |
| | | | Wassergehalt | x_L^A |

Ziel der Simulation ist es, die unbekanntesten Größen von Luft und Wasser bei einer definierten Anzahl an Zellen zu bestimmen.

Zunächst werden die erforderlichen Bilanzen aufgestellt. Zur Veranschaulichung wird der am häufigsten vorkommende Fall der Verdunstung erläutert. Bei einem Kondensationsvorgang gelten die gleichen Gesetze, einzige Änderung ist die Umkehrung des Vorzeichens des übertragenen Massestroms \dot{m}_D . Der Austrittsmassestrom der **feuchten Luft** ergibt sich aus der eintretenden Luft plus des verdunsteten Massestroms des Wassers:

$$\dot{m}_{fL}^A = \dot{m}_{fL}^E + \dot{m}_D. \quad (2.2)$$

Der Massestrom der **trockenen Luft** bleibt dabei konstant:

$$\dot{m}_L = \dot{m}_L^E = \dot{m}_L^A. \quad (2.3)$$

Dem **Wasser** wird der übertragene Massestrom \dot{m}_D entzogen:

$$\dot{m}_W^A = \dot{m}_W^E - \dot{m}_D. \quad (2.4)$$

Der übertragene **Dampf**massestrom \dot{m}_D lässt sich mit mehreren Gleichungen beschreiben:

$$\dot{m}_D = \dot{m}_L \cdot (x_L^A - x_L^E) = \dot{m}_{fL}^A - \dot{m}_{fL}^E = \dot{m}_W^E - \dot{m}_W^A. \quad (2.5)$$

Thermodynamisch lässt sich die gebildete Zelle mit den Komponenten Luft und Wasser als offenes und ruhendes System im stationären Zustand beschreiben [11]. Die Energiebilanz wird mit Hilfe des 1. Hauptsatz der Thermodynamik gebildet [12]. Auf diese Weise lassen sich die übertragenen Energieströme beschreiben. Die Änderung der potentiellen und kinetischen Energie werden mit guter Näherung vernachlässigt. Zudem wird keine Leistung zu- oder abgeführt und die Außenhülle des gesamten Kühlturms wird als adiabat angenommen.

Unter der Voraussetzung konstanter spezifischer Wärmekapazität gilt der Ansatz für trockene Luft [13]:

$$h_L = c_{pL} \cdot (T - T_0) + h_0. \quad (2.6)$$

Die Konstante h_0 entspricht der Enthalpie bei der Bezugstemperatur T_0 . Üblicherweise wird die Bezugstemperatur auf $t_0 = 0^\circ\text{C}$ beziehungsweise $T_0 = 273,15\text{K}$ und die dazugehörige Enthalpie auf $h_0 = 0\text{kJ/kg}$ als Bezugspunkt festgelegt.

Für die im Kühlturm eintretende **trockene Luft** gilt dann unter der Voraussetzung, dass $T - T_0 = t - t_0$ ist:

$$\dot{H}_L^E = \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot (t_L^E - t_0). \quad (2.7)$$

Am Austritt gilt analog:

$$\dot{H}_L^A = \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot (t_L^A - t_0). \quad (2.8)$$

Für den **Dampf** muss zusätzlich zur sensiblen Wärme die latent gespeicherte Verdampfungsenthalpie Δh_v in der Energiebilanz Berücksichtigung finden [14]. Am Eintritt gilt:

$$\dot{H}_D^E = x_L^E \cdot \dot{m}_L \cdot c_{pD} \cdot (t_L^E - t_0) + x_L^E \cdot \dot{m}_L \cdot \Delta h_v. \quad (2.9)$$

Am Austritt gilt entsprechend:

$$\dot{H}_D^A = x_L^A \cdot \dot{m}_L \cdot c_{pD} \cdot (t_L^A - t_0) + x_L^A \cdot \dot{m}_L \cdot \Delta h_v. \quad (2.10)$$

Es muss ergänzt werden, dass die Verdampfungsenthalpie Δh_v temperaturabhängig ist.

Die Energiebilanz des **Wassers** wird analog zu der Bilanz der Luft nach der Gleichung 2.7 aufgestellt:

$$\dot{H}_W^E = \dot{m}_W^E \cdot c_{pW} \cdot (t_W^E - t_0), \quad (2.11)$$

$$\dot{H}_W^A = \dot{m}_W^A \cdot c_{pW} \cdot (t_W^A - t_0). \quad (2.12)$$

Diese Änderung des Enthalpiestroms setzt sich aus dem übertragenen Wärmestrom und der Enthalpieänderung durch Verdunstung beziehungsweise Kondensation zusammen [15]:

$$\dot{H}_W^A - \dot{H}_W^E = -\dot{Q}_\alpha - \dot{Q}_\sigma. \quad (2.13)$$

Durch Anwendung des vereinfachten Verdunstungsgesetzes [14, 16] errechnet sich der übertragene Massestrom über

$$\dot{m}_D = \beta \cdot \rho_L \cdot A \cdot (x_G - x_L) = \sigma \cdot A \cdot (x_G - x_L) \quad (2.14)$$

mit der Verdunstungsziffer σ

$$\sigma = \beta \cdot \rho_L = \frac{\alpha}{c_{pL}}. \quad (2.15)$$

Mit der Transportgleichung für den konvektiven Wärmestrom

$$\dot{Q}_\alpha = \alpha \cdot A \cdot (t_W^A - t_L^A) \quad (2.16)$$

und dem zusätzlichen Wärmestrom durch den Phasenübergang [10]

$$\dot{Q}_\sigma = \sigma \cdot A \cdot (x_G - x_L) \cdot (h_{D,G} - h_{W,G}) = \sigma \cdot A \cdot (x_G - x_L) \cdot \Delta h_{V,G}, \quad (2.17)$$

ergibt sich folgende Funktion für die gesamte Energiebilanz des Wassers:

$$\dot{f}_W = \dot{m}_W^A \cdot c_{pW} \cdot t_W^A - \dot{m}_W^E \cdot c_{pW} \cdot t_W^E + \alpha \cdot A \cdot (t_W^A - t_L^A) + \sigma \cdot A \cdot (x_G - x_L) \cdot \Delta h_{V,G} = 0. \quad (2.18)$$

Der Term $\Delta h_{V,G}$ entspricht dabei der Verdampfungsenthalpie des Wassers bei der Temperatur der Phasengrenze.

Die Bilanz der Luft und die Bilanz des Dampfes werden zu einer Gleichung für feuchte Luft zusammengeführt, die sowohl die Anteile der Luft als auch die des Dampfes enthält. Daraus ergibt sich der bereits von *MOLLIER* [17] vorgeschlagene Ansatz:

$$\dot{H}_{fL}^E = \dot{m}_L \cdot [(c_{pL} + x_L^E \cdot c_{pD}) \cdot (t_L^E - t_0) + x_L^E \cdot \Delta h_v], \quad (2.19)$$

$$\dot{H}_{fL}^A = \dot{m}_L \cdot [(c_{pL} + x^A \cdot c_{pD}) \cdot (t_L^A - t_0) + x_L^A \cdot \Delta h_v] . \quad (2.20)$$

Durch Ausklammern und Umformung wird der sensible und latente Anteil der feuchten Luft deutlicher, was nachfolgend von besonderer Bedeutung sein wird:

$$\dot{H}_{fL} = \underbrace{\dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot (t_L - t_0) + \dot{m}_L \cdot x_L \cdot c_{pD} \cdot (t_L - t_0)}_{\text{sensibler Anteil}} + \underbrace{\dot{m}_L \cdot x_L \cdot \Delta h_v}_{\text{latenter Anteil}} . \quad (2.21)$$

Die bei dem Wasser abgeführten Wärmeströme \dot{Q}_α und \dot{Q}_σ werden in die Luft übertragen:

$$\dot{H}_{fL}^A - \dot{H}_{fL}^E = \dot{Q}_\alpha + \dot{Q}_\sigma . \quad (2.22)$$

Zusammenfassend lässt sich für die Energiebilanz der Luft schreiben:

$$\begin{aligned} f_L &= \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot t_L^A + \dot{m}_L \cdot x_L^A \cdot \Delta h_v + \dot{m}_L \cdot x_L^A \cdot c_{pD} \cdot t_L^A \\ &\quad - \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot t_L^E - \dot{m}_L \cdot x_L^E \cdot \Delta h_v - \dot{m}_L \cdot x_L^E \cdot c_{pD} \cdot t_L^E \\ &\quad - \alpha \cdot A \cdot (t_W^A - t_L^A) - \sigma \cdot A \cdot (x_G - x_L) \cdot \Delta h_{v,G} = 0 . \end{aligned} \quad (2.23)$$

Neben den einzelnen Bilanzen muss ebenfalls die gesamte Bilanz aus Luft, Wasser und Dampf gleich null sein, damit der 1. Hauptsatz der Thermodynamik erfüllt ist:

$$\boxed{\dot{H}_W^A - \dot{H}_W^E + \dot{H}_{fL}^A - \dot{H}_{fL}^E = 0} . \quad (2.24)$$

Der gesamte vom Wasser konvektiv abgegebene und im Fall von Verdunstung abgeführte Wärmestrom wird in die Luft übertragen (sensibel und latent). Die Lufttemperatur ändert sich nicht nur aufgrund des konvektiv übertragenen Wärmestroms sondern auch durch die zusätzliche Aufnahme des dämpfförmigen Wassermassestroms \dot{m}_D selbst [10]. Dieser ist oftmals sehr klein, kann aber aufgrund der Verdampfungsenthalpie Δh_v leicht Fehler in der Bilanz verursachen.

2.3 Stand des Wissens

Um den Kühlprozess zu charakterisieren und somit verschiedene Betriebszustände, die meist aus unterschiedlichen Kühleinbauten bestehen, miteinander zu vergleichen, ist ein Verfahren nötig welches die Güte der Rückkühlung unabhängig von den Umgebungsbedingungen beschreibt.

Die Übertragungszahl K , auf deren genaue Bestimmung in dem Abschnitt 2.3.4 näher eingegangen wird, ist ein Maß für die Güte des Kühlprozesses im Kühlturm. Mit Hilfe der aus Messdaten ermittelten Übertragungszahl K ist es möglich Kühltürme zu charakterisieren

und auszulegen. Bei Kenntnis der Kühlleistung des jeweiligen Einbaus, kann entsprechend der Vorgaben die zu berieselnde Grundfläche des Kühlturms errechnet werden. Hat ein Einbau eine bessere Kühlleistung, so kann der Kühlturm kleiner ausgelegt werden. Dieses spart Material, Platz und somit Kosten. Umgekehrt kann bei einer erneuten Auslegung eines vorhandenen Kühlturms („Re-Fit“) die Kühlleistung erhöht werden. Dieses steigert den Gesamtwirkungsgrad des industriellen Prozesses, in den der Kühlturm integriert ist.

Für die theoretische Auswertung und Auslegung stehen verschiedene Methoden zu Verfügung. Auslegungswerkzeuge vieler Kühlturmhersteller sind nicht auf dem neusten Forschungsstand und arbeiten häufig auf Basis eindimensionaler Berechnungsprogramme. Auf die überholte Qualität dieser Theorien wird in dem Abschnitt 2.3.3 weiter eingegangen. Die entsprechenden Gleichungen sind noch immer Stand der Technik und im VDI-Wärmeatlas aufgeführt [18]. Neben der in Abschnitt 2.3.2 näher diskutierten *MERKEL*'schen Theorie ist im VDI-Wärmeatlas die Theorie nach *POPPE* beschrieben. In dieser werden einige Vorgänge, die in der *MERKEL*'schen Theorie vernachlässigt wurden, miteinbezogen. Jedoch hat sich die Theorie nach *POPPE* in den Auslegungswerkzeugen der Kühlturmhersteller bisher nur vereinzelt durchgesetzt. *KLOPPERS* und *KRÖGER* haben hierzu zahlreiche Veröffentlichungen verfasst [19, 20].

Die Auslegung des Kühlturms hängt von vielen Parametern ab. Maßgeblich sind die berechnete Grundfläche, die Packungshöhe der Einbauten, die Übertragungsfläche pro Einbau sowie der Typ des Kühlturms [21]. Aus den geometrischen Daten und der geforderten Kühlleistung lässt sich die Kühlanforderung an den Kühlturm bestimmen. Der Designpunkt des Kühlturms befindet sich dort, wo die Kühlanforderung und Übertragungszahl den gleichen Wert haben [5]. Eine ausführliche Diskussion der Auswertemethoden wird in dem Abschnitt 2.4 durchgeführt.

Software für Strömungssimulation findet nur sehr selten Anwendung in der Kühlturmtechnik. Die Stellenbosch-Universität³ unter Leitung von Prof. Hanno *REUTER* arbeitet an der numerischen Simulation von Kühltürmen. Basierend auf der Dissertation von Prof. *REUTER* [22] wurde im Jahr 2011 auf einer Tagung in China, ein bereits im Jahr 2010 gezeigtes [23], verbessertes zweidimensionales Modell für Naturzugkühltürme vorgestellt [24]. Es wurde hervorgehoben, dass an einem dreidimensionalen Modell für Hybrid- und Zellenkühltürme gearbeitet wird. Eine detaillierte Darstellung der Kühlturmeinbauten wird in deren Modell nicht berücksichtigt.

Die RWE Power AG untersucht gemeinsam mit B&B-AGEMA GmbH den Einfluss der Rauchgaseinleitung in Kühltürme. Hier wird über numerische Strömungssimulationen der Einfluss auf Naturzugkühltürme untersucht. Allerdings wird dabei die Wasserseite nicht mit berücksichtigt [25]. Die GEA Energietechnik GmbH beschäftigt sich mit Simulationen der Ausbreitung von Wasserdampfschwaden, die aus dem Kühlturm austreten. Es wird dabei ein

³in Kapstadt, Südafrika

Dampfmassestrom vorgegeben und nicht der Vorgang im Kühlturm selbst modelliert [26]. In verschiedenen Arbeiten wird der Einfluss äußerer Einflussfaktoren, beispielsweise Wind, über numerische Modelle untersucht [27, 28, 29]. Ein eindimensionales Simulationsmodell für den Kühlprozess wurde 2005 von *WEBB* vorgestellt [30].

2.3.1 Hydraulische und thermische Charakterisierung

Für die hydraulische Charakterisierung von Kühlturmeinbauten wird der Druck im Versuchskühlturm an zwei festen Punkten jeweils ober- und unterhalb des Kühlturmeinbaus gemessen und die Druckdifferenz über den entsprechenden Sensor aufgezeichnet.

Die Berechnung des Druckverlustbeiwertes ζ wird über folgende allgemeine Gleichung durchgeführt [31]:

$$\zeta = 2 \cdot \frac{\Delta p_{fill}}{\bar{w}^2 \cdot \rho_L}. \quad (2.25)$$

Ein wesentlicher Punkt für die Auslegung von Kühltürmen ist die Charakterisierung der im Kühlturm installierten Struktureinbauten. Nach der Aufnahme der Messdaten ist die Auswertung der aufgenommenen Daten ein wichtiger Aspekt der Beurteilung. Die Kühlturmleistung und deren Beeinflussung durch Kühleinbauten ist Hauptbestandteil der Untersuchungen. Je nach gewählter Methode unterscheidet sich die Kühlleistung des Einbaus. Daher ist ein genauer Vergleich der verschiedenen Theorien notwendig.

Die erste wissenschaftliche Veröffentlichung zu diesem Thema ist die Habilitationsschrift von Leopold Carl Friedrich *MERKEL* [1], die 1925 veröffentlicht wurde. Ihm zu Ehren wird die Übertragungszahl K auch heute noch *MERKEL*-Zahl (Me-Zahl) genannt. Des Weiteren benannte die Technische Universität Dresden in den 50er-Jahren den Neubau des thermodynamischen Instituts nach ihm. Die Professur für Technische Thermodynamik hat ihren Sitz auch heute noch im „*MERKEL*-Bau“. Weitere Informationen zu *MERKEL* sind im Anhang A zu finden.

Von besonderem Interesse ist ebenfalls der Zustand der austretenden Luft des Kühlturms. Aus dieser Kenntnis kann die verdunstende Wassermenge und somit auch die Schwadenbildung des Kühlturms bestimmt werden. Für die Bestimmung des Luft-Austritts-Zustandes stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Neben *MEHLIG* [32], *POPPE* [33] und *HARTING* [34] wurde von *KINKELDEI* [35] ein Verfahren entwickelt, welches es ermöglicht über das h,t -Diagramm den Zustandsverlauf der Luft im Kühlturm zu bestimmen.

2.3.2 *MERKEL*'sche Theorie

MERKEL betrachtete die gekoppelten Übertragungsvorgänge von Masse und Wärme in einem infinitesimal kleinen Volumenelement. Die beiden Stoffströme feuchte Luft und Wasser – getrennt durch eine Phasengrenze – befinden sich im schon diskutierten adiabaten

Verdunstungskanal (in Abbildung 2.9 dargestellt). *MERKEL* geht von einem gegenseitigen Übertragungsvorgang aus.

Bei der Interaktion der Medien Luft und Wasser wird der konvektive Wärmestrom

$$d\dot{Q}_\alpha = \alpha \cdot (t_G - t_L) dA \quad (2.26)$$

analog zu der Gleichung 2.16 von der Phasengrenze (G) des Wassers an die Luft (L) übertragen. Dieses hat eine Änderung des Luft- und Wasserzustandes zur Folge. Des Weiteren verdunstet an der Phasengrenze ein Wassermassenstrom \dot{m}_D in die Luft, wobei der Konzentrationsgradient des Wassers die treibende Kraft darstellt:

$$d\dot{m}_D = \sigma \cdot (x_G - x_L) dA. \quad (2.27)$$

An der Phasengrenze liegt gesättigte feuchte Luft mit $x_G = x_S(t_G)$ vor. Durch den verdunsteten Wassermassenstrom steigt der Wassergehalt der Luft um den Anteil Δx_L . Dieser kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$\Delta x_L = \frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_L}. \quad (2.28)$$

Gleichzeitig steigt die Temperatur der Luft während die Temperatur des Wassers durch den übertragenen Wärmestrom sinkt. Der übertragene Wärmestrom wird über folgende Gleichung ausgedrückt:

$$d\dot{Q}_\alpha = \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot dt_L. \quad (2.29)$$

Dem Wasser wird weitere Wärme durch den Effekt der Verdunstung entzogen. Dieser Wärmestrom lässt sich über folgende Gleichung beschreiben:

$$d\dot{Q}_\sigma = \sigma \cdot (x_G - x_L) \cdot \Delta h_{V,G} \cdot dA. \quad (2.30)$$

Die Summe der abgegebenen Wärmeströme des Wassers, aus den Gleichungen 2.29 und 2.30, lautet also:

$$d\dot{Q}_W = d\dot{Q}_L = d\dot{Q}_\alpha + d\dot{Q}_\sigma = \dot{m}_W \cdot c_{pW} \cdot dt_W. \quad (2.31)$$

Aus den Gleichungen 2.26, 2.30 und 2.31 errechnet sich der durch Wärme- und Stofftransport übertragene Gesamtwärmestrom. Zusammengefasst lässt sich eine gewöhnliche Differentialgleichung aufstellen:

$$\dot{m}_W \cdot c_{pW} \cdot dt_W = \alpha \cdot (t_G - t_L) dA + \sigma \cdot \Delta h_{V,G} \cdot (x_G - x_L) dA. \quad (2.32)$$

Dieses stellt den Verlauf der Wassertemperatur und des Luftzustandes im Kühlturm dar [32]. *MERKEL* übernimmt die von *LEWIS* gefundene Beziehung [36]

$$\alpha = \sigma \cdot c_{pL} \quad (2.33)$$

und erhält die Differentialgleichung:

$$\dot{m}_W \cdot c_{pW} \cdot dt_W = \sigma \cdot c_{pL} \cdot (t_G - t_L) dA + \sigma \cdot \Delta h_{V,G} \cdot (x_G - x_L) dA. \quad (2.34)$$

Mit sehr guter Näherung gelten nach *MOLLIER* für die feuchte Luft folgende Beziehungen [17]:

$$h_L = c_{pL} \cdot (t_L - t_0) + x_L \cdot \Delta h_V \quad (2.35)$$

und

$$h_G = c_{pL} \cdot (t_G - t_0) + x_G \cdot \Delta h_V. \quad (2.36)$$

Unter Vernachlässigung der verdunsteten Wassermenge entfällt der Term $x_{L,G} \cdot \Delta h_{D,G}$, sowie der hintere Term der Gleichung 2.34. Schließlich ergibt sich die seither als *Hauptgleichung der Verdunstungskühlung* bezeichnete Gleichung:

$$\boxed{\dot{m}_W \cdot c_{pW} \cdot dt_W = \sigma \cdot (h_G - h_L) dA}. \quad (2.37)$$

Mit dieser Gleichung ist es *MERKEL* gelungen, die komplexen Vorgänge der Verdunstungskühlung in einer einfachen Gleichung zu vereinen. Die Grundaussage besteht darin, dass die Abkühlung des Wassers nur von der Enthalpiedifferenz der Luft zwischen Phasengrenze und Kernströmung abhängig ist. Die Temperatur der eintretenden Luft und deren relative Luftfeuchte hat laut der von *MERKEL* aufgestellten Gleichung nur einen untergeordneten Einfluss auf den Wärme- und Stoffübergang.

Um Kühltürme zu charakterisieren und Aussagen über deren Leistung zu gewinnen wurde die Übertragungszahl K eingeführt. Sie beschreibt den Gütegrad des Kühlturms als dimensionslose Kennzahl. Weitere Bezeichnungen sind „*MERKEL*-Zahl“, „Kühlturm Kennzahl“ oder im englischen „Performance-Factor“ und „Number of Transfer Units“ [10]. Gebildet wird die Übertragungszahl K mittels Integration der *MERKEL*'schen Hauptgleichung:

$$K = \int \frac{\sigma \cdot dA}{\dot{m}_W} = \int \frac{c_{pW} \cdot dt_W}{h_G - h_L}, \quad (2.38)$$

beziehungsweise in der allgemein üblichen Schreibweise:

$$\boxed{K = \frac{\sigma \cdot A}{\dot{m}_W} = \int_{t_W^A}^{t_W^E} \frac{c_{pW} \cdot dt_W}{h_G - h_L}}. \quad (2.39)$$

Allerdings musste *MERKEL* für die Herleitung einige Vereinfachungen treffen. Genau wegen dieser ist *MERKEL* vielfach in die Kritik geraten und seine Gleichung als zu ungenau beschrieben worden [10, 32].

Die von *MERKEL* getroffenen Vereinfachungen sind:

- Die Verringerung der Wassermenge aufgrund von Verdunstung wird vernachlässigt ($\dot{m}_W = \text{konstant}$).
- Der *LEWIS*'sche Faktor z (auch Austauschzahl z) wird gleich eins gesetzt:

$$z = \frac{\alpha}{\sigma \cdot c_{pL}} = 1.$$
- Die Temperaturabhängigkeit der Stoffdaten von Luft und Wasser sowie der Verdampfungsenthalpie Δh_v werden vernachlässigt.
- Der Kühlturm wird als adiabater Verdunstungskanal angenommen.
- Es findet kein Wärmedurchgang auf der Wasserseite (innerhalb des Wassertropfens) statt. Die Temperatur des Wassertropfens ist somit über das Volumen konstant und folglich gibt es kein Temperaturgefälle zwischen Wasseroberfläche und der Mitte des Wasserfilms.

Gerade die ersten beiden Punkte haben seit der Veröffentlichung von *MERKEL* zu Diskussionen geführt. Ob also die von *MERKEL* getroffenen Vereinfachungen gerechtfertigt sind oder ob eine genauere Betrachtung der stattfindenden Prozesse notwendig ist, wird im Folgenden diskutiert.

2.3.3 Genauigkeit der *MERKEL*'schen Hauptgleichung

MEHLIG und *KLENKE* erhoben bereits in den 1960er Jahren erhebliche Kritik an der von *MERKEL* aufgestellten Theorie.

Bei Berücksichtigung der verdunsteten Wassermenge $\dot{m}_D = \sigma \cdot (x_G - x_L)dA$ und der Temperaturabhängigkeit der Verdampfungsenthalpie Δh_v ergibt sich die so genannte „erweiterte Hauptgleichung“ [10]:

$$\dot{m}_W \cdot dh_W = \sigma \cdot \left[z \cdot (h_G - h_L) - (x_G - x_L) \cdot (z \cdot h_{D,G} - \Delta h_{V,G}) \right] dA. \quad (2.40)$$

Diese erweiterte Hauptgleichung erlaubt die Untersuchung der *MERKEL*'schen Theorie hinsichtlich ihrer Vereinfachungen. Bei Anwendung dieser auf die erweiterte Hauptgleichung 2.40 ergibt sich durch die Annahme der *LEWIS*'schen Beziehung $z = 1$ und der Vernachlässigung der verdunsteten Wassermenge $\sigma \cdot (x_G - x_L)dA$ wieder die *MERKEL*'sche Hauptgleichung 2.37.

KLOPPERS stellte dar, dass die *LEWIS*-Zahl großen Einfluss auf die Berechnung der Übertragungszahl hat und somit nicht einfach gleich eins gesetzt werden darf, wie es *MERKEL* umgesetzt hat [37]. Dass die verdunstete Wassermenge Einfluss hat, zeigt allein schon die Energiebilanz.

MEHLIG kam bei der Auswertung mehrerer messtechnischer Untersuchungen zu der Schlussfolgerung, dass die Übertragungszahl K mit der *MERKEL*'schen Hauptgleichung im Mittel um 12 % zu niedrig berechnet wird [32]. Bei doppelter Anwendung der Lösung nach *MERKEL* reduziert sich der Fehler auf $\pm 3\%$, da sich die Ungenauigkeiten aufheben. *MEHLIG* rät jedoch von diesem Verfahren ab, da der Rechenaufwand zu seiner Zeit gegenüber der nur geringen Steigerung der Genauigkeit zu groß war. Er entwickelte jedoch ein Lösungsverfahren, welches den Zustandsverlauf der Luft beim Erreichen der Sättigungslinie in die Berechnung integrierte.

MEHLIG schreibt in seiner Dissertation: „Zu den interessantesten Problemen auf dem Gebiet der Kühlturmtechnik gehört gegenwärtig die Frage, ob die Verdunstungskennzahl eine von den thermischen Bedingungen unabhängige Kenngröße ist. [...] Dabei zeigt eine genaue Untersuchung des Mechanismus der Wärme- und Stoffübertragung, dass die *MERKEL*'sche Hauptgleichung nur bei Luftzustandsänderungen im ungesättigten Bereich gültig ist. Für Zustandsänderungen im Sättigungszustand gilt eine neue Hauptgleichung.“ ([32] 1966, S. 16). Dieses Verfahren wird in dem Abschnitt 2.3.5 vorgestellt.

MERKEL's Theorie von 1925 ist also überholt und nicht mehr zeitgemäß. Durch die Weiterentwicklung der Berechnungsvorschriften ergeben sich genauere Theorien. Zu diesem Ergebnis kamen auch *KLOPPERS* [19, 20], *WEBB* [38] und *YADIGAROGLU* [39] in ihren Untersuchungen. Durch die Weiterentwicklung der EDV-Technik ergeben sich weitere Möglichkeiten hinsichtlich Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit. Heute ist es möglich auch viele komplexe Vorgänge schnell zu berechnen. Aus diesem Grund ist es möglich – im Vergleich zu den 60er Jahren – neue Ansätze zu definieren, um schnell genaue Ergebnisse zu erzielen. Das in dieser Arbeit erstellte Modell – „*Virtueller Kühlturm*“ genannt – hat genau dieses zum Ziel (siehe Kapitel 5).

Im Folgenden wird zunächst auf die klassischen Methoden der Messdatenauswertung eingegangen.

2.3.4 Lösen der Hauptgleichung

Die von *MERKEL* aufgestellte Gleichung 2.39 lässt sich nicht geschlossen integrieren, da sich die Sättigungsenthalpie der Luft an der Phasengrenze h_G mit der Temperatur des Wassers ändert. Eine mögliche analytische Lösungsmöglichkeit der *MERKEL*'schen Hauptgleichung stellt die Annäherung der nicht linearen Funktion $h_G = h_{L,S}(t_W) = f(t_W)$ durch Geraden-, Parabel- oder Exponentialgleichungen dar. Eine Übersicht verschiedener Lösungsverfahren bewertete *SPANGEMACHER* in seinem Werk [40] nach der Genauigkeit und dem zeitlichen

Aufwand. Aus *SPANGEMACHER*'s Untersuchungen geht hervor, dass sich zwei Methoden als besonders geeignet erweisen: Zum einen die tabellarische Integration, bei der das Integral als Summenformel möglichst kleiner Schrittweite aufgefasst wird (siehe Abschnitt 2.3.7) und zum anderen die Variante nach *CAREY* und *WILLIAMSON* [41] bei der die Sättigungslinie der Luft in einem h,t -Diagramm durch eine Parabel angenähert wird. Das Verfahren nach *CAREY* und *WILLIAMSON* wird heute noch in dem VDI-Wärmeatlas [18] empfohlen, obwohl es bereits wesentlich genauere Berechnungsmethoden, wie zum Beispiel nach *POPPE* und *HAUENSCHILD*, gibt.

2.3.5 Verfahren nach *MEHLIG*

Eines der am häufigsten angewandten Verfahren zur Bestimmung der Übertragungszahl K ist das Verfahren nach *MEHLIG*. Er setzte sich in seiner Dissertation [32] verstärkt mit dem Zustandsverlauf der Luft auseinander. Beim Durchströmen des Kühlturms steigt der Wassergehalt der Luft an und in vielen Fällen wird bereits innerhalb des Kühlturms der Sättigungszustand der Luft erreicht. Er geht davon aus, dass der Zustand der Luft nach Erreichen der Sättigung entlang der Sättigungslinie verläuft. Im Gegensatz dazu würde die Luft nach der *MERKEL*'schen Hauptgleichung in das übersättigte Gebiet laufen. *MEHLIG* ist nach vielen Untersuchungen des Übertragungsvorganges der Überzeugung, dass sich ein derartiger Zustandsverlauf nicht ausbilden kann. Aus diesem Grund muss bei dem Zustandsverlauf der Luft zwischen dem ungesättigten Gebiet und dem Sättigungszustand klar unterschieden werden. Eine beispielhafte Variante der Zustandsverläufe von Luft und Wasser ist in der Abbildung 2.10 dargestellt.

Nach dem Berechnungsverfahren von *MEHLIG* wird der Rückkühlvorgang in zwei Bereiche eingeteilt: Bereich I bis zum Erreichen des Sättigungszustandes und Bereich II ab dem Erreichen des Sättigungszustandes (siehe Abbildung 2.10). Es wird jeweils eine Übertragungszahl K für jeden Bereich bestimmt. Die Übertragungszahl bis zum Erreichen des Sättigungspunktes heißt K_I (Bereich I), ab dem Sättigungspunkt wird die Übertragungszahl K_{II} (Bereich II) genannt.

Die erste Übertragungszahl K_I teilt *MEHLIG* wiederum in zwei Teilintegrale (geknickter Geradenzug):

$$K_I = \int_{t_W^A}^{t_{Wm}} \frac{c_{pW} \cdot dt_W}{h_G - h_L} + \int_{t_{Wm}}^{t_W^E} \frac{c_{pW} \cdot dt_W}{h_G - h_L}. \quad (2.41)$$

Die Enthalpie der Luft an der Phasengrenze hängt von der Wassertemperatur ab ($h_G = h(t_W)$). Die Enthalpie h_{Lm} ist die arithmetische Mittelung der Enthalpie der Luft. Durch Umformungen und Hilfsgrößen lässt sich folgende Gleichung bestimmen:

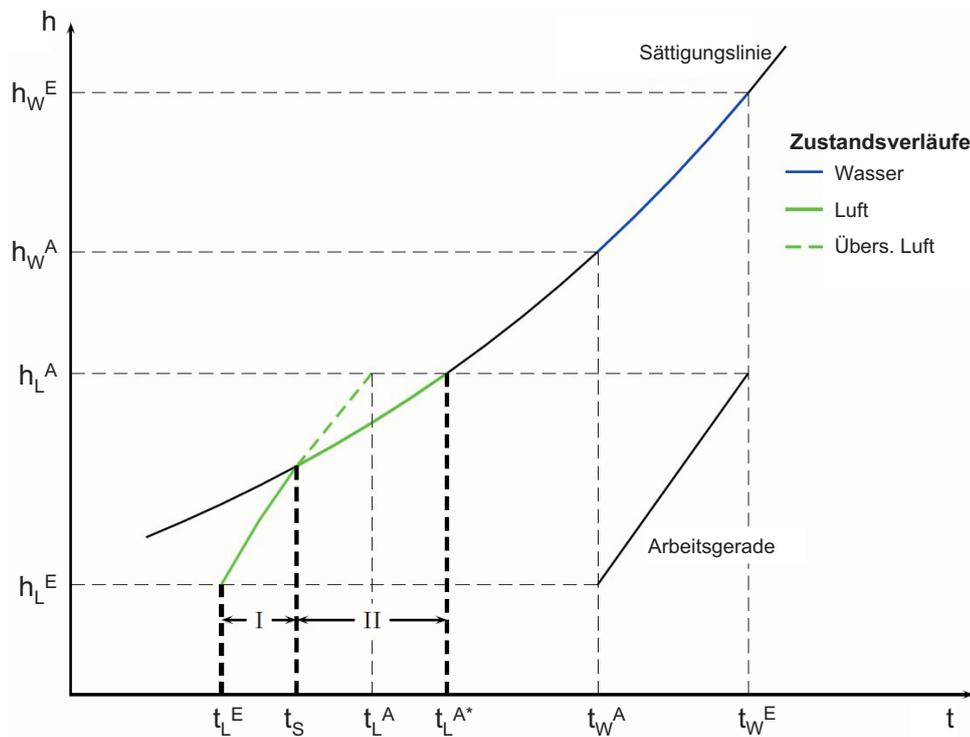


Abbildung 2.10: Zustandsverläufe beim Rückkühlvorgang

$$K_I = \frac{c_{pW} \cdot dt_W}{h_{Gm} - h_{Lm}} \cdot \frac{1}{2 \cdot G} \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{G}{I_1}\right)}{1 - \frac{I_1}{G}} + \frac{\ln\left(\frac{G}{I_2}\right)}{1 - \frac{I_2}{G}} \right] \quad (2.42)$$

mit den nötigen Hilfsgrößen:

$$I_1 = \frac{h_{W^E}^E - h_L^A}{h_{Wm} - h_{Lm}}$$

$$I_2 = \frac{h_{W^A}^A - h_L^E}{h_{Wm} - h_{Lm}}$$

$$G = \frac{4}{3} \cdot \left[1 + 0.03 \cdot \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 0.05 \cdot \ln(I_2) \right] - \frac{1}{6} (I_1 + I_2).$$

Im gesättigten Gebiet (Bereich II) gilt diese Gleichung nicht. Nach Erreichen des Sättigungszustandes der Luft hängt die Erhöhung des Wassergehalts nur noch von der Temperatur der Luft ab. Daher wurde eine Gleichung entwickelt, in der die Temperaturänderung der Luft berücksichtigt wird. Bezugnehmend auf die Gleichungen 2.26 und 2.29 gilt mit der Annahme $t_W = t_G$:

$$\alpha \cdot (t_W - t_L) dA = \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot dt_L. \quad (2.43)$$

Somit lässt sich die *MERKEL*'sche Hauptgleichung auch in folgender Form ausdrücken:

$$K_{II} = \frac{\sigma \cdot A}{\dot{m}_W} = \int_{t_L^E}^{t_L^A} \frac{\lambda \cdot dt_L}{t_W - t_L}. \quad (2.44)$$

Beim Überschreiten der Luftzustandskurve über die Sättigungslinie verläuft die weitere Änderung exakt auf dieser. Somit ist in jedem Punkt die Lufttemperatur gleich der Sättigungstemperatur $t_L = t_F$.

Es gilt streng zu unterscheiden, ob die Luftzustandsänderung im ungesättigten oder im gesättigten Bereich verläuft. Im ungesättigten Gebiet (Bereich I) kann die Berechnung wie schon vorgestellt über die *MERKEL*'sche Hauptgleichung erfolgen:

$$K_I = \int_{t_W^A}^{t_W^E} \frac{c_{pW} \cdot dt_W}{h_G - h_L} = \int_{t_L^E}^{t_L^A} \frac{\lambda \cdot dt_L}{t_W - t_L}. \quad (2.45)$$

Wenn der Luft-Austritts-Zustand im gesättigten Gebiet (Bereich II) liegt, muss die Berechnung nach der Hauptgleichung für den Sättigungszustand erfolgen:

$$K_{II} = \int_{t_F^E}^{t_F^A} \frac{\lambda \cdot dt_F}{t_W - t_F}. \quad (2.46)$$

In dieser Darstellung ist der gleiche Aufbau der Gleichungen 2.39 und 2.44 sehr gut zu erkennen. Somit kann die Gleichung für den gesättigten Bereich äquivalent zu dem schon vorgestellten Verfahren gelöst werden:

$$K_{II} = \frac{\lambda \cdot dt_L}{t_{Wm} - t_{Fm}} \cdot \frac{1}{2 \cdot G} \cdot \left[\ln \left(\frac{G}{I_1} \right) + \ln \left(\frac{G}{I_2} \right) \right]. \quad (2.47)$$

Die Hilfsgrößen werden dabei analog der Gleichung 2.42 gebildet. Somit stehen zwei getrennte Verfahren zur Bestimmung der Übertragungszahl K zur Verfügung.

Theoretisch ließe sich die gesamte Übertragungszahl nach *MEHLIG* (K_{Me} durch die getrennte Integration von K_I und K_{II} lösen:

$$K_{Me} = \underbrace{\int_{t_L^E}^{t_s} \frac{\lambda \cdot dt_L}{t_W - t_L}}_{K_I} + \underbrace{\int_{t_s}^{t_F^A} \frac{\lambda \cdot dt_F}{t_W - t_F}}_{K_{II}}. \quad (2.48)$$

Um den Aufwand der Berechnung möglichst gering zu halten, formulierte *MEHLIG* eine Alternative, die bei Kenntnis der Sättigungstemperatur t_s , durch einfache Addition und unter Berücksichtigung der Bereiche I und II die Übertragungszahl berechnet:

$$K_{Me} = \frac{t_s - t_L^E}{t_F^A - t_L^E} \cdot K_I + \frac{t_F^A - t_s}{t_F^A - t_L^E} \cdot K_{II}. \quad (2.49)$$

Die einzelnen Übertragungszahlen K_I und K_{II} werden dabei nach den Gleichungen 2.42 und 2.47 bestimmt.

2.3.6 Auswertung nach POPPE

Knappe 50 Jahre nachdem *MERKEL* den Grundstein der Kühlturmtheorie gelegt hatte, veröffentlichte M. *POPPE* mit seiner Dissertation [33] im Jahr 1972 eine neue Theorie zur Bestimmung der Übertragungszahl K . *POPPE* gelang es damit die wesentlichen – in dem Abschnitt 2.3.2 aufgezeigten – Vereinfachungen von *MERKEL* und *MEHLIG* mit zu berücksichtigen. Die beiden größten Kritikpunkte waren:

- Der *LEWIS*'sche-Faktor z wird gleich eins angenommen.
- Die verdunstete Wassermenge wird nicht berücksichtigt.

Jedoch konnte auch *POPPE* bei der Herleitung seines Berechnungsverfahrens nicht komplett auf Vereinfachungen verzichten:

- Es handelt sich auch um ein adiabates System.
- Der Wärmeübergang auf der Wasserseite bleibt weiterhin vernachlässigt.
- Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität wird vernachlässigt.
- Die Übertragungsflächen für den Wärme- und Stoffübergang sind gleich groß.

Auf die sehr ausführliche Herleitung der Gleichung zum Berechnen der Übertragungszahl nach *POPPE* wird an dieser Stelle auf Anhang C und folgende Quellen verwiesen [18, 33, 42]. *POPPE* entwickelte eine eigene erweiterte Hauptgleichung zur Bestimmung der Übertragungszahl K_{Po} :

$$K_{Po} = \frac{\sigma \cdot A}{\dot{m}_W} = \int_{t_W^A}^{t_W^E} \frac{c_{pW} \cdot dt_W}{h_G - h_L + G} \quad (2.50)$$

Der wesentliche Unterschied zu der *MERKEL*'schen Hauptgleichung besteht in dem Korrekturglied G :

$$G = (z - 1) \cdot \left[\left(h_{L,S}(t_W) - h_L - (x_S(t_W) - x_L) \cdot (\Delta h_V + c_{pD} \cdot t_W) \right) - (x_S(t_W) - x_L) \cdot c_{pW} \cdot t_W \right] \quad (2.51)$$

In der Gleichung 2.50 wird sowohl der verdunstete Wassermassestrom berücksichtigt als auch ein *LEWIS*'scher-Faktor z , der ungleich eins sein kann. Dieses führt zu einer genaueren Berechnung der Übertragungszahl, die im Mittel um etwa 7 % höher liegt als die nach *MERKEL* berechnete Übertragungszahl. Eine detaillierte Gegenüberstellung der Verfahren von *MERKEL* und *POPPE* wurde von *KLOPPERS* durchgeführt [43].

2.3.7 Lösung der Hauptgleichung durch numerische Verfahren

Die genaueste Lösung der *MERKEL*'schen Hauptgleichung gelingt heute mit Hilfe numerischer Integration. Mittels numerischer Quadraturformeln lässt sich das Integral durch nahezu beliebig viele Summen approximieren [44]. Dieses war früher ohne moderne EDV-Technik nicht möglich. Aus diesem Grund wird diese Methodik in der älteren Standard-Literatur oft nur kurz diskutiert.

Entscheidend für die Ermittlung der Übertragungszahl K ist die zu integrierende Gleichung. Wird die *MERKEL*'sche Hauptgleichung approximiert, ist das Ergebnis die Übertragungszahl nach *MERKEL* inklusive aller von *MERKEL* getroffenen Vereinfachungen. Daher wird an dieser Stelle die Gleichung 2.50 mit dem Verfahren nach *POPPE* für die Integration verwendet.

Durch Festlegung einer äquidistanten Schrittweite dx wird der gesamte Integrationsbereich $[a, b]$ in n Teilbereiche unterteilt. Jedes Teilintervall wird in die für das Näherungspolynom notwendige Anzahl an Stützstellen eingeteilt und numerisch integriert. Anschließend werden die n Teilintegrale über den gesamten Integrationsbereich aufsummiert und somit eine Näherungslösung für das gesamte Integral des Polynoms bestimmt. Die Genauigkeit der Lösung steigt dabei mit dem Grad des Näherungspolynoms und der Anzahl der Teilbereiche n bis zur numerischen Ungenauigkeit des Computers. Die Abbildung 2.11 skizziert das Prinzip der numerischen Integration für ein Näherungspolynom 2. Grades (*SIMPSON*-Regel) in einem Teilbereich. Weiterführende Informationen zu den Quadraturformeln beziehungsweise *NEWTON-COTES*-Formeln können aus [45, 46, 47] entnommen werden.

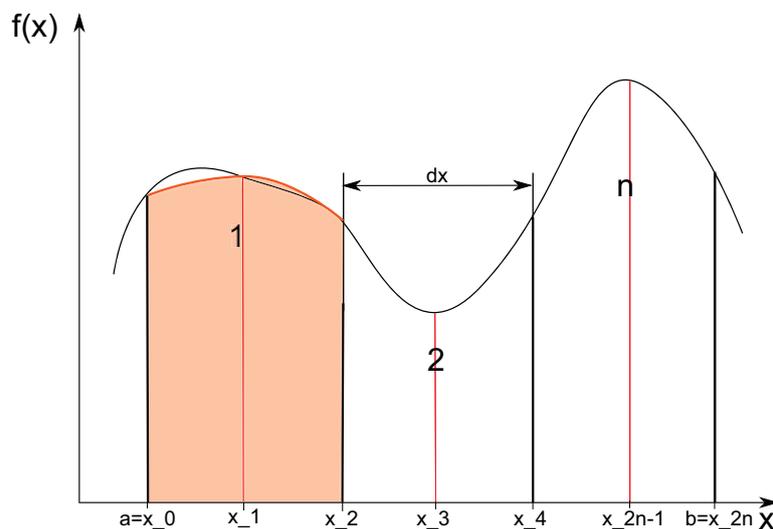


Abbildung 2.11: Numerische Integration eines Teilbereiches mittels *SIMPSON*-Regel

2.4 Vergleich der Berechnungsmethoden für Kühltürme

Weiterhin ist das in dem Abschnitt 2.3.4 angedeutete Verfahren nach *HAUENSCHILD* zu erwähnen. Ihm gelang es im Jahre 1985 in seiner Dissertation [11] auch den wasserseitigen Wärmeübergang ($t_G \neq t_W$) mit zu berücksichtigen. Die Berechnung über diese Methode ist sehr komplex und es gibt derzeit keine bekannten Anwendungen. Des Weiteren sind die Unterschiede gegenüber der Berechnung nach *POPPE* sehr gering, da der Einfluss des Wärmeübergangs innerhalb eines Tropfen sehr klein ist. Auf eine ausführliche Darstellung des Verfahrens nach *HAUENSCHILD* wird an dieser Stelle verzichtet. Ein Vergleich der Auswertemethoden ist in der Tabelle 2.2 zusammengefasst [42].

Alle Auswertungen der Übertragungszahl K (*MERKEL*-Zahl) in dieser Arbeit erfolgen über die Berechnungsmethoden nach *MEHLIG* (K_{Me} , Gleichung 2.49) und *POPPE* (K_{Po} , Gleichung 2.50).

Die vorgestellten Verfahren bieten die Möglichkeit den Kühlturm unabhängig von den herrschenden Umgebungsbedingungen zu bewerten. Sie stellen eindimensional den Verlauf der Prozessströme Luft und Wasser im Kühlturm dar. Ein Blick auf die Zustandsgrößen innerhalb des Kühlturms ist jedoch nicht möglich. Bereiche mit gutem und schlechtem Wärmeübergang können nicht charakterisiert werden. Bei einem zweidimensionalen Verfahren sind genauere Betrachtungen möglich. Eine Simulation ermöglicht die Bestimmung aller Parameter zwischen Ein- und Austritt des Kühlturms. Der Verlauf der Zustandsgrößen von Luft und Wasser kann somit verfolgt werden. Zudem kann für jeden Bereich eine Übertragungszahl bestimmt werden. Hierdurch lassen sich Bereiche mit hoher und niedriger Güte des Wärme- und Stoffübergangs identifizieren.

Diesem Sachverhalt ist hinzuzufügen, dass Variationen der Eingangsparameter in Versuchen kosten- und zeitintensiv sind, sowie sich im industriellen Betrieb überhaupt nicht realisieren lassen. Der Unterschied der Berechnungsmethoden zur Simulation ist, dass während am realen Kühlturm die Ausgangsparameter nur über Versuche ermittelt werden können, es bei einem Simulationsprogramm möglich ist diese numerisch zu ermitteln.

Beispielsweise ist die Wasser-Austritt-Temperatur t_W^A für die Bestimmung der Übertragungszahl notwendig. Durch eine numerische Berechnung dieser Ausgangsgröße können Versuche am Kühlturm reduziert werden. Mit einem Simulationsmodell lassen sich leicht die Eingangsparameter verändern und somit der Einfluss auf den Gesamtkühlturm bestimmen. Es können beispielsweise ausführliche Untersuchungen zur Abhängigkeit der Übertragungszahl K von der Kühlzonenbreite z verwirklicht werden, ohne eine Vielzahl von Ressourcen verbrauchender Messungen durchzuführen.

Tabelle 2.2: Zusammenfassung der unterschiedlichen Berechnungsverfahren für die Übertragungszahl K

| Verfahren nach | MERKEL [1] | MEHLIG [32] | POPPE [33] | HAUENSCHILD [11] |
|---|---|---|---|---|
| Berechnungsgleichung | <p>MERKEL'sche Hauptgleichung</p> $K = \int_{t_W^E}^{t_W^A} \frac{c_{pW} dt_W}{h_G - h_L}$ | <p>MERKEL'sche Hauptgleichung und Hauptgleichung des Sättigungszustandes</p> $K = \int_{t_F^E}^{t_S} \frac{\lambda dt_L}{t_W - t_L} + \int_{t_S}^{t_F^A} \frac{\lambda dt_F}{t_W - t_F}$ | <p>Erweiterte Hauptgleichung</p> $K = \int_{t_W^E}^{t_W^A} \frac{c_{pW} dt_W}{h_G - h_L + G}$ <p>mit</p> $G = (z - 1)(h_{L,S}(t_W) - h_L - [x_S(t_W) - x_L](\Delta h_v + c_{pD} t_W)) - [x_S(t_W) - x_L] c_{pW} t_W$ | <p>Erweiterte Hauptgleichung</p> $K = \int_{t_W^E}^{t_W^A} \frac{\frac{\alpha}{\sigma c_p} c_{pW} dt_W}{\frac{\alpha}{\sigma c_p} c_{pW} (t_W - t_G) + F}$ <p>mit</p> $F = [x_{G,S} - x_L](h_{W,G} - h_W)$ |
| Berücksichtigung physikalischer Effekte | <p>Annahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> • LEWIS-Zahl z ist gleich eins • Vernachlässigung des wasserseitigen Wärmeübergangskoeffizienten • Temperaturabhängigkeit der Verdampfungsenthalpie und spezifischen Enthalpie wurde nicht berücksichtigt • Vernachlässigung der verdunsteten Wassermenge • Sättigungslinie wird als Gerade angenommen | <p>Annahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identische Annahmen wie MERKEL • Luftzustandsverlauf ab gesättigtem Zustand entlang der Sättigungslinie <p>Verbesserung gegenüber MERKEL</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erweiterung der MERKEL'schen Hauptgleichung durch Hauptgleichung des Sättigungszustandes • Sättigungslinie wird durch zwei geknickte Geraden dargestellt | <p>Annahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wasserseitiger Wärmeübergangswiderstand wird vernachlässigt • Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität • Annahme gleich großer Flächen für den Wärme- und Stoffübergang <p>Verbesserung gegenüber MERKEL</p> <ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigt verdunstete Wassermenge ($\Delta \dot{m}_v \neq 0$) • LEWIS-Zahl z kann von eins abweichen | <p>Verbesserung gegenüber MERKEL</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beinhaltet alle Verbesserungen von POPPE • Berücksichtigt den wasserseitigen Wärmeübergangskoeffizienten ($t_G \neq t_W$) |

3 Versuchskühlturm der Technischen Universität Dresden

3.1 Abmessungen und Betriebsweise

Bei dem Versuchskühlturm der Technischen Universität Dresden¹ handelt es sich um einen offenen Gegenstromkühlturm mit erzwungener Luftanregung, siehe Abbildung 3.1. Er hat einen Querschnitt von $A = 1 \text{ m}^2$ und eine Höhe von $h = 8000 \text{ mm}$. Der Bereich von der Wasserverteilung bis zur Kühlturmtasse ist zu einem großen Teil isoliert, um den Einfluss von Wärmestrahlung durch die Sonne und den Wärmübergang über die Außenwand zu minimieren. Die maximale Kühleinbauhöhe beträgt $h_{fill} = 2000 \text{ mm}$. Die Versprühhöhe h_V kann mittels Seilzug auf einen konstanten Wert eingestellt werden. Ziel ist es das Wasser optimal über die Einbauten zu verteilen, so dass eine gleichmäßige Benetzung entsteht und Randgängigkeit vermieden wird. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich bei einer Versprühhöhe von $h_V = 400 \text{ mm}$ eine optimale Verteilung des Wassers mit den verbauten Brausen einstellt.

Im Versuchsbetrieb wird Wasser ohne chemische Zusätze verwendet. Durch kontinuierliche Speisung von Frischwasser und durchgängige Abflut wird nur eine sehr geringe Eindickung erreicht. Ein Einfluss auf die thermischen Eigenschaften des Wassers ist nicht gegeben [48]. Probleme mit Ablagerungen durch Kalk und Biofilme im Versuchskühlturm oder in den Struktureinbauten gibt es nicht.

¹Standort: MERKEL-Bau, Professur für Technische Thermodynamik



Abbildung 3.1: Versuchskühlturm der Technischen Universität Dresden

3.2 Messdatenerfassung und -aufbereitung

Die in der Tabelle 3.1 aufgeführten Parameter werden während des Versuchs gemessen und aufgezeichnet.

Zu Beginn jeder Messsaison werden alle Temperaturfühler im Wasserbad mit Präzisionsthermometern kalibriert. Ein magnetisch-induktiver Durchflusssensor (MID) dient der Messung des Wassermassestroms. Dieser wird regelmäßig mit einem Ultraschallmessgerät überprüft. Es ist eine mittlere Abweichung von 1 % festgestellt worden, welche im Toleranzbereich liegt.

Die Volumenstrommessung der Luft erfolgt über eine Messblende, die es in vier verschiedenen Innendurchmessern entsprechend des gewünschten Messbereiches gibt. Der Differenzdruck der Blende wird sowohl über einen digitalen Differenzdruckmesser, als auch über ein manuelles Schrägrohrmanometer bestimmt. Gleiches gilt für die Druckverlustmessung über die Kühlturmeinbauten. Für diese Messung stehen drei Differenzdrucksensoren

Tabelle 3.1: Am Versuchskühlturm aufgezeichnete Parameter

| Parameter | Symbol | Einheit |
|--|-------------------|-------------------|
| Frequenz des Lüfters | ω | Hz |
| Temperatur des Wassers am Eintritt | t_W^E | °C |
| Temperatur des Wassers am Austritt | t_W^A | °C |
| Feuchtkugeltemperatur der Luft am Eintritt | t_F^E | °C |
| Temperatur der Luft am Eintritt | t_L^E | °C |
| Temperatur der Luft am Austritt | t_L^A | °C |
| Kühlzonenbreite | z | K |
| Luftdruck | p_U | bar |
| Volumenstrom des Wassers | \dot{V}_W^E | m ³ /h |
| Wirkdruck der Blende | Δp_{or} | Pa |
| Druckverlust der Kühleleinbauten | Δp_{fill} | Pa |

mit unterschiedlichen Messbereichen zur Verfügung: $\Delta p = 0 - 50$ Pa, $\Delta p = 0 - 250$ Pa und $\Delta p = 0 - 500$ Pa. Je nach zu erwartetem Druckverlust kann so der Sensor gewählt werden, bei dem der Differenzdruck nicht am Rand des Messbereiches liegt. Alle Sensoren werden jährlich von einer externen Firma kalibriert und haben somit immer ein aktuelles Kalibrierzertifikat.

Die Messung der Feuchtkugeltemperatur t_F^E erfolgt über zwei unabhängige Psychrometer nach *FRANKENBERGER*, aus denen der arithmetische Mittelwert bestimmt wird. Die Temperatur der Eintrittsluft t_L^E wird an beiden Psychrometern mitbestimmt. Zusätzlich ist am Lufteintritt ein Pt100-Sensor installiert. Es wird aus allen drei Werten die arithmetische Mitteltemperatur bestimmt.

Die Temperatur der Luft am Austritt wird mit zwei Sensoren oberhalb des Tropfenabscheiders im Kühlturm gemessen. In der Auswertung wird der arithmetische Mittelwert von beiden Temperaturen bestimmt. Jedoch befinden sich diese Messfühler immer im Wasserdampf, der zu einer zusätzlichen Kühlung führen kann, falls kein Sättigungszustand der Luft vorliegt. Ist dieses der Fall, ist die gemessene Lufttemperatur t_L^A gleich der Feuchtkugeltemperatur t_F^A .

Am Eintritt und Austritt des Wassers wird die Wassertemperatur ebenfalls mit jeweils zwei Sensoren (Pt100, IP68, 4 Leiter) gemessen und die arithmetische Mitteltemperatur errechnet.

Es werden also alle Temperaturen von Luft und Wasser mindestens mit zwei Messfühlern gemessen. Zu große Differenzen der Sensoren an der gleichen Messstelle werden sofort im Auswerteprogramm gemeldet, so dass ein hohes Maß an Messsicherheit und -genauigkeit gewährleistet ist. Entsprechende Fehlmessungen werden anschließend wiederholt. Allgemein wird bei allen Sensoren eine Abweichung von maximal $\pm 0,2$ K zugelassen.

Da der Luftkanal mit einer Länge von 15 m, beispielsweise bei starker Sonneneinstrahlung, Einfluss auf den Luftzustand haben kann, wird die Temperatur der Luft unmittelbar vor dem

Eintritt in den Kühlturm erneut gemessen. Ist die Differenz gegenüber der Lüfter-Eintritts-Temperatur zu groß, kommt eine alternative Funktion zum Einsatz. Es wird hierbei der Wassergehalt x_L^E am Lüftereintritt bestimmt und anschließend mit dem im Kanal konstanten Wassergehalt x_L^E und der direkt am Kühlturmeintritt gemessenen Lufttemperatur eine neue Feuchtkugeltemperatur errechnet. So ist sicher gestellt, dass der Einfluss des Kanals und des Lüfters auf den Luftzustand nicht mit in die Berechnung einfließt. Zudem wird die im Lüfter verrichtete Förderarbeit auf diese Weise nicht mitberücksichtigt. Es konnte beobachtet werden, dass allein durch den Lüfter eine Temperaturerhöhung um fast zwei Kelvin auftreten kann. Dieses hat erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse haben. Eine ausführliche Untersuchung dieses Effekts wurde von *DREYER* durchgeführt [49]. Findet diese alternative Funktion Verwendung, ist dieses mit einem entsprechenden Hinweis hinter der Messreihe gekennzeichnet.

Zur Inbetriebnahme wird ein an der Technischen Universität vorhandener Referenzeinbau vermessen, dessen thermisches und hydraulisches Verhalten durch eine Vielzahl von Messungen sehr gut bekannt ist. Der gleiche Referenzeinbau wird auch am Ende jeder Messsaison vermessen, um sicher zu stellen, dass sich das Verhalten der Anlage nicht geändert hat.

Bei der Aufzeichnung eines Messpunktes wird für circa fünf Minuten gemessen und alle Werte über die gesamte Messdauer gemittelt. Des Weiteren werden parallel minütlich gemittelte Punkte aufgezeichnet. So ist sehr gut zu erkennen, ob sich das System zum Zeitpunkt der Messung im stationären Zustand befand. Alle Rohdaten aller Sensoren werden im Abstand von fünf Sekunden aufgezeichnet und gespeichert. Die arithmetischen Mittelwerte werden erst im Programm der Messdatenauswertung erstellt.

Durch dieses Vorgehen wird eine hohe Messgenauigkeit erreicht und die Ergebnisse sind sehr gut reproduzierbar. Somit steht ein zuverlässiges Realsystem für die Überprüfung und Validierung der Simulationsmodelle zur Verfügung.

4 Möglichkeiten und Grenzen der Simulation mit CFD-Software

Wie einführend erwähnt, ist das Ziel dieser Arbeit ein eigenes Simulationsmodell für den Kühlprozess zu erstellen. Parallel dazu wurde auch an der Simulation des Versuchskühlturms mit CFD-Software gearbeitet.

Bei der Simulation mit CFD-Software werden alle Bilanzen (Energie, Masse und Impuls) über numerische Modelle erstellt. Der zu untersuchende Kühlturm wird in Volumenelemente zerlegt, dabei erfolgt die Aufteilung der Volumenströme in den Kanälen des Kühlturmeinbaus durch die Berechnung der Druckverluste über die numerische Lösung der *NAVIER-STOKES*-Gleichung. Dies führt zwangsläufig zu komplexen zeitaufwändigen Simulationen.

Die Simulation mit der CFD-Software ANSYS CFX¹ wurde von *ROHDE* [50] und *KLAUSNER* [51] untersucht und erwies sich als herausfordernde Aufgabenstellung. Es stellte sich heraus, dass zwar Modelle für zwei Komponenten (Luft und Wasser) für mehrere Phasen verfügbar sind, aber die Phasenumwandlung stets nur in eine Richtung ablaufen kann [50]. Es ist somit im Phasenmodell von Wasser nur möglich Verdunstung *oder* Kondensation zu modellieren.

Für die Simulation des Kühlturms können zwei Mehrphasenmodelle verwendet werden: das *EULER-EULER*-Modell oder das *EULER-LAGRANGE*-Modell [52]. Um die prinzipielle Funktionalität zu überprüfen, wurde zu Beginn ein maßstabsgetreues verkleinertes Simulationsmodell des Versuchskühlturms erstellt und dieses anschließend vergrößert, bis ein Modell mit Originalabmessungen simuliert und mit Messwerten einer Versuchsreihe verglichen werden konnte.

4.1 Erstellung des Modells

Das in dieser Arbeit erstellte Modell basiert auf den geometrischen Daten des realen Kühlturmversuchsstandes. Zu Beginn wurde, um Rechenzeit zu sparen, die Funktionalität der verfügbaren Wärme- und Stoffübertragungsmodelle in einem maßstabsgetreuen verkleinerten Modell untersucht. Ausgangspunkt sind die Originalmaße des Versuchskühlturms von 1000 mm x 1000 mm x 8000 mm. Für die ersten Untersuchungen wurde ein Modell von 100 mm x 100 mm x 800 mm verwendet. Dieses entspricht einem Maßstab von 1:10. Nach der Auswahl eines funktionierenden Modells, wurde das Modell auf Originalmaße vergrößert.

¹Version 12.1

Die Erstellung des Modells erfolgte mit zahlreichen Vereinfachungen, da die Überprüfung der Funktionalität Schwerpunkt der Untersuchungen ist. Die Geometrie wurde aus einem Strömungskanal, einer Lufterlass- sowie einer Luftauslassöffnung, einer Ebene für die Wasserverteilung im Strömungskanal und einem Wasserbecken für den Wasserauslass erstellt (siehe Abbildung 4.1). Auf geometrische Details wie die Luftumlenkbleche, welche am Lufteintritt installiert sind und einer exakten Darstellung der Wasserverteilung, wurde an dieser Stelle verzichtet.

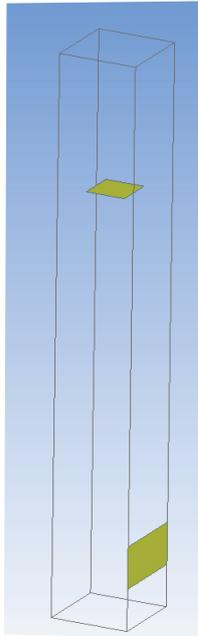


Abbildung 4.1: Gitteransicht des Modells mit Darstellung der Einlassflächen

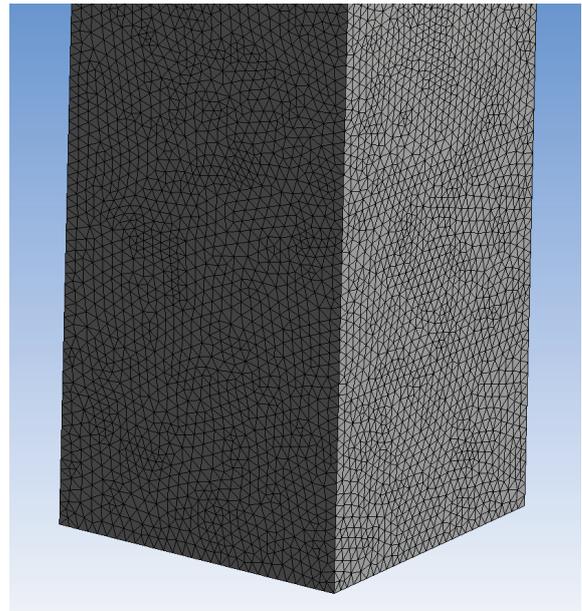


Abbildung 4.2: Ausschnitt des Modells mit Darstellung der Vernetzung

Bei der Vernetzung wurden die Randzonen nicht gesondert behandelt. Der gesamte Volumenkörper wurde automatisch von ANSYS CFX mit Tetraedern gefüllt, siehe Abbildung 4.2.

4.1.1 Getroffene Vereinfachungen

Schwerpunkt der Betrachtung ist die Funktionsweise der von ANSYS CFX zur Verfügung stehenden Modelle. Daher ist es notwendig folgende Vereinfachungen bei der Modellierung festzulegen:

- Die Luftumlenkbleche des realen Kühlturms wurden in der Geometrie des Modells vernachlässigt.
- Die Wasserverteilung wurde durch eine ebene Platte anstelle von den 16 Brausen im realen Kühlturm dargestellt.
- Die Strömungsrichtung der Wassertropfen verläuft dabei senkrecht zur Einlassebene. Das führt dazu, dass nur ein Teil der Grundfläche des Kühlturms mit Wasser

durchströmt wird. Bei der Wasserverteilung im realen Kühlturm ist eine kegelförmige Ausbreitung zu beobachten. Des Weiteren ist die Austrittsgeschwindigkeit der Wassertropfen unbekannt. Es wird ein Wert von $w_W = 2 \text{ m/s}$ angenommen.

- Nach *HAUENSCHILD* [11] wird der Durchmesser der Tropfen auf einen konstanten Wert von $d_P = 3 \text{ mm}$ festgelegt. Im Realmodell herrscht hingegen eine Tropfengrößenverteilung. Im Mittel stellt die Annahme eines konstanten Wertes eine gute Näherung dar.
- Bei dem *EULER-LAGRANGE*-Modell ist es notwendig eine feste Tropfenanzahl abzuschätzen. Diese entspricht nicht exakt der tatsächlich in den Kühlturm eintretenden Anzahl.
- Das Modell des Kühlturms wurde mit einer adiabaten Systemgrenze erstellt. Im realen Kühlturm ist der Wärmeübergang über die Außenwand bedingt durch eine Isolierung gering.

4.2 Ergebnisse

Als Beispiel wurde ein gemessener Zustand des realen Versuchskühlturms gewählt und in der Simulation die gleichen Randbedingungen eingestellt.

Die generelle Funktionalität des *EULER-LAGRANGE*-Modells hat sich in den kleineren Modellen als bewiesen herausgestellt. Die Ergebnisse zeigen plausible Werte, daher wurde nachfolgend ein Modell mit den originalen Abmessungen des Kühlturms untersucht. Der Volumenkörper wurde mit Elementen von acht Millimetern Größe erstellt. Daraus ergibt sich eine gesamte Elementanzahl von circa 25 Millionen. Dieses stellt einen relativ großen Rechenaufwand dar. Als Randbedingungen wurden die Eingangswerte eines gemessenen Zustandes am Versuchskühlturm gewählt, um die Ergebnisse der Simulation mit der Messung zu vergleichen. Auf diese Weise wurde überprüft, ob das Modell in ANSYS CFX die im Kühlturm stattfindenden Prozesse abbilden kann.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen Werte, die den Vorgängen eines Verdunstungsprozesses entsprechen. Die Geschwindigkeiten der Fluidströme sind größer als in dem zuvor untersuchten maßstäblich verkleinerten Modell. Die Ursache liegt in der längeren Strecke, welche die Tropfen und die Luft von Ein- bis Austritt im Kühlturm zurücklegen. Die Tropfen erreichen eine Geschwindigkeit von $w_W = 8,4 \text{ m/s}$, siehe Abbildung 4.4. Die Geschwindigkeit der Luft steigt bis auf $w_L = 5 \text{ m/s}$, siehe Abbildung 4.3. Es ist zu erkennen, dass die Querschnittsverengung durch die Ebene des Wassereinlasses zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit der Luft führt. Dieser Effekt ist im realen Kühlturm nicht vorhanden, da die Brausen nur eine geringe Querschnittsverengung verursachen.

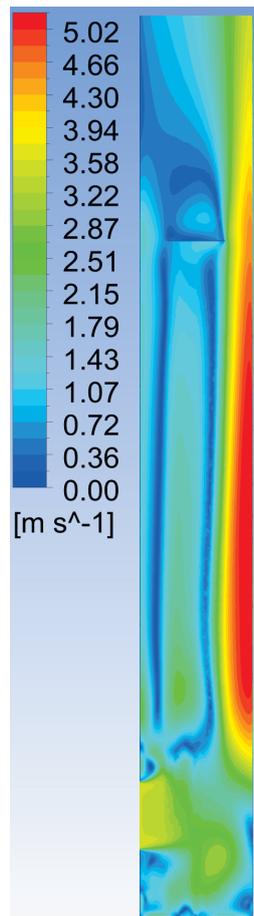


Abbildung 4.3: Geschwindigkeitsverteilung der Luft im *EULER-LAGRANGE*-Modell, Maßstab 1:1

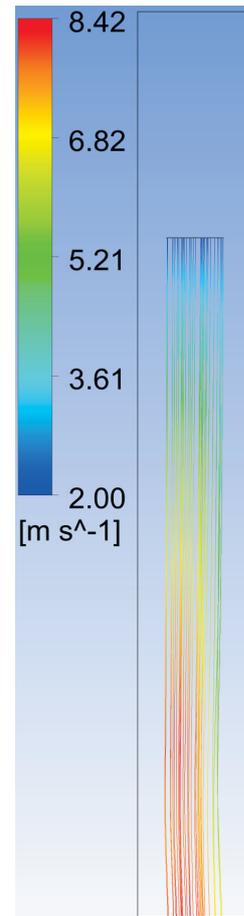


Abbildung 4.4: Geschwindigkeitsverteilung des Wassers im *EULER-LAGRANGE*-Modell, Maßstab 1:1

Die Temperaturdifferenz der Luft liegt zwischen Ein- und Austritt bei $\Delta T_L = 8,5$ K. Damit erhöht sich die durchschnittliche Temperatur der Luft auf $T_L^A = 282,8$ K, siehe Abbildung 4.5. Dieser Wert liegt circa neun Kelvin unterhalb der am Kühlturm gemessenen Austrittstemperatur der Luft von $T_L^A = 291,7$ K. Aufgrund der vielen getroffenen Vereinfachungen ist es ersichtlich, dass die gemessenen Werte in der Simulation nicht exakt nachgebildet werden können.

Die Temperaturdifferenz des Wasser verringert sich um $\Delta T_W = 4,3$ K (siehe Abbildung 4.6). Bei der Messung war eine Kühlzonenbreite von $z = 10$ K vorgegeben, der exakte Wert liegt bei $\Delta T_W = 10,4$ K. Ursachen für die Abweichungen sind hier ebenfalls die getroffenen Vereinfachungen, die nachfolgend näher diskutiert werden.

Bei Betrachtung der Energiebilanz zeigt sich, dass das Modell selbst korrekt gerechnet hat. Sie weist eine Differenz von $\dot{Q} = 162,3$ W auf. Dieses entspricht einer Abweichung von 0,74 %.

Die verdunstete Wassermenge beträgt $\Delta m_p = 13 \cdot 10^{-8}$ kg (siehe Abbildung 4.7). Die Masse des Wassers nimmt also im Verlauf des Kühlturms ab. Entsprechend steigt der Wassermasseanteil der feuchten Luft an. Am Austritt wurde im Modell ein Wert von

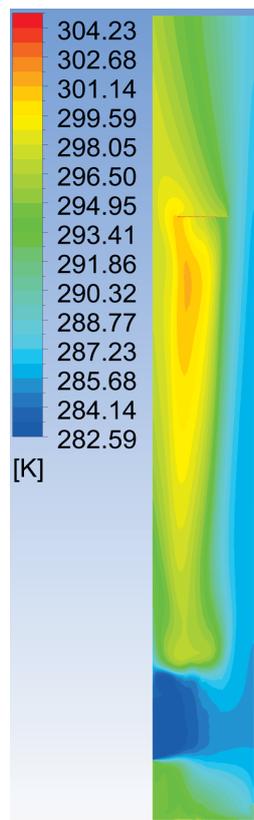


Abbildung 4.5: Temperaturverteilung der Luft im *EULER-LAGRANGE*-Modell, Maßstab 1:1

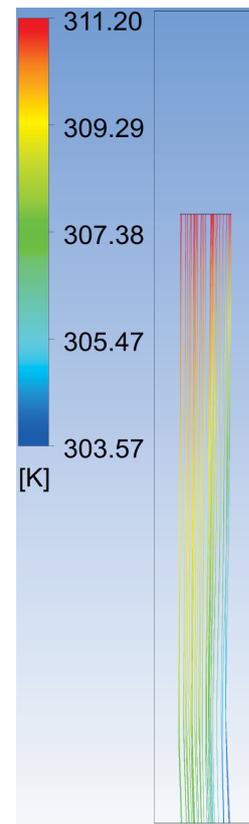


Abbildung 4.6: Temperaturverteilung des Wassers im *EULER-LAGRANGE*-Modell, Maßstab 1:1

$\xi = 0,01677$ bestimmt. Dieser Wert ist um 33 % geringer als der Messwert des Wassermasseanteils ($\xi = 0,025$).

Bei den Untersuchungen des *EULER-LAGRANGE*-Modells zeigte sich, dass der Phasenübergang korrekt berechnet wird. Die Abweichung in der gesamten Massebilanz beträgt nur $\Delta \dot{m} = 5,556 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$, das entspricht einem relativen Wert von 0,0002 %. So kann festgehalten werden, dass bei Anwendung des *EULER-LAGRANGE*-Verfahrens, der interne Massenübergang korrekt berechnet wird.

Die Abweichungen der Simulation und der Messung sind im direkten Vergleich relativ groß. Allerdings liegen diese aufgrund der vielen getroffenen Vereinfachungen im akzeptablen Bereich. Die generelle Funktionalität des Modells gilt als bewiesen, da sowohl die Energiebilanz als auch die Massebilanz im Modell korrekt berechnet werden. Die Richtungen des Wärme- und Stoffübergangs konnten mit guter Näherung wiedergegeben werden. Eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse erfolgt im folgenden Kapitel.

4.2.1 Gegenüberstellung und Diskussion der Ergebnisse

Es wurden zwei verschiedene Modelle zur Berechnung des Wärme- und Stoffübergangs im Kühlturm in ANSYS CFX untersucht. Auf die Darstellung der Ergebnisse des *EULER-EULER*-Modells wird an dieser Stelle verzichtet, da das Modell bereits bei der Überprüfung

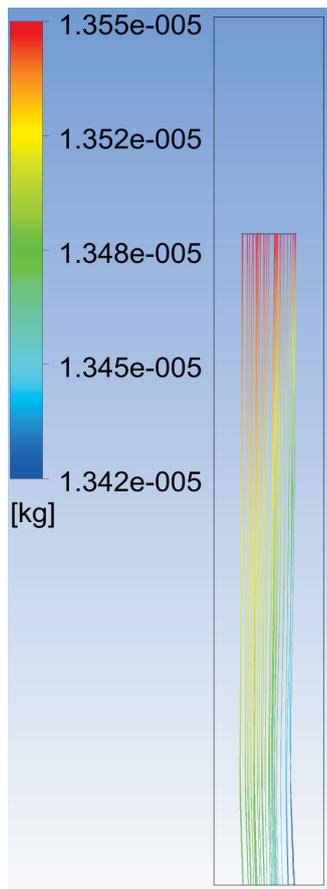


Abbildung 4.7: Masseabnahme der einzelnen Wasserpartikel im *EULER-LAGRANGE*-Modell (Maßstab 1:1)

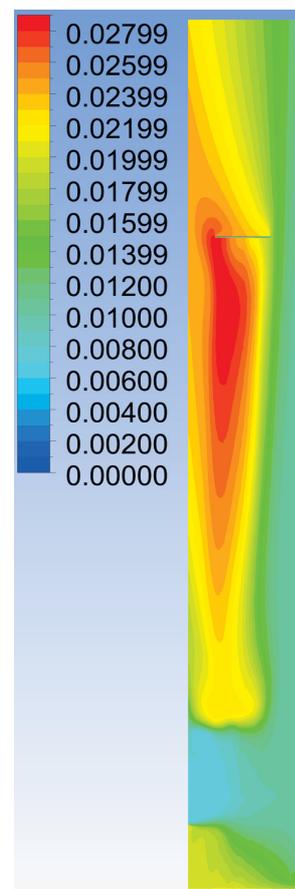


Abbildung 4.8: Verlauf des Wassermassenanteils der feuchten Luft im *EULER-LAGRANGE*-Modell (Maßstab 1:1)

im kleinen Maßstab Ergebnisse mit sehr großen Abweichungen im Vergleich mit den Messdaten lieferte. Zudem waren die Ergebnisse nicht plausibel, was sich in unphysikalisch hohen Temperaturänderungen als auch in einer relativen Luftfeuchte von größer als eins widerspiegelte. Die Ergebnisse widersprechen damit den Gesetzen der Physik. Aus diesem Grund wurde dieses Modell nicht näher untersucht.

Deutlich bessere Ergebnisse im Vergleich mit Messdaten lieferte das *EULER-LAGRANGE*-Modell. Mit zunehmender Modellgröße näherten sich die simulierten Ausgangswerte weiter den Messwerten des Versuchs an. Betrug die Abweichung der Luftaustrittstemperatur beim Maßstab 1:10 noch $\Delta T_L = 15,5$ K, sind es beim Modell in Originalgröße nur noch $\Delta T_L = 8,9$ K. Analog verhält es sich bei der Wasseraustrittstemperatur. Hier sinkt die Abweichung der Temperatur von $\Delta T_W = 9,2$ K auf $\Delta T_W = 6$ K.

Bei der relativen Feuchte lässt sich ebenfalls eine Verbesserung der Ergebnisse mit zunehmender Modellgröße beobachten. Der Wassergehalt sinkt von $\Delta x_L = 0,01584$ beim Modell im Maßstab 1:10 auf $\Delta x_L = 0,00841$ beim Modell mit Originalabmessungen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Kühlprozess mit dem *EULER-LAGRANGE*-Verfahren dargestellt werden kann. Die Ergebnisse weichen von den Messdaten ab, was auf die getroffenen Vereinfachungen zurückzuführen ist. Die grundlegenden Verläufe der

Zustandsgrößen entsprechen denen des realen Kühlturms. Die Ergebnisse näherten sich den Messdaten weiter an je näher sich das Modell an den Original-Abmessungen orientiert. Dieses steigert gleichzeitig den Simulationsaufwand. Mit dem verkleinerten Modell war es möglich die korrekten physikalischen Vorgänge darzustellen. Um genauere Ergebnisse zu erhalten, ist viel Rechenaufwand erforderlich und ein Modell mit gleichen Abmessungen wie beim Versuchskühlturm notwendig.

4.2.2 Fehlerbetrachtung und Ausblick

Die Ungenauigkeiten des *EULER-LAGRANGE*-Modells sind eindeutig auf die getroffenen Vereinfachungen zurückzuführen. Vor allem die geometrischen Vereinfachungen wie zum Beispiel die Vernachlässigung der Luftumlenkbleche am Luftertritt, stellen eine große Fehlerquelle dar. Die Strömung wird durch diese signifikant beeinflusst und somit herrschen im Modell andere Strömungsbedingungen als im Versuchskühlturm.

Die Wasserverteilung im Modell ist eine weitere Ursache für die nicht exakten Ergebnisse. Statt der 16 Brausen im Kühlturm, die für eine gleichmäßige Verteilung des Wassers im Kühlturm sorgen, ist im Modell nur eine Ebene mittig im Kühlturm integriert. Dadurch ist nur ein Teil des Kühlturms mit Wasser durchströmt. Zudem treten die Tropfen senkrecht zur Ebene aus, während bei den Brausen im Versuchsstand eine kegelförmige Verteilung zu beobachten ist. Eine Ursache für die hohen Geschwindigkeiten der Luft ist die mittig angeordnete Platte, die den Strömungsquerschnitt versperrt.

Für die Modellerstellung war eine Abschätzung der Größe, der Geschwindigkeit und der Anzahl der austretenden Tropfen notwendig. Eine messtechnische Erfassung wurde bisher nicht durchgeführt und ist aufwändig. Daher wurde auf Erfahrungswerte aus der Literatur zurückgegriffen [11, 53]. Sowohl die Anzahl der Tropfen als auch deren Durchmesser haben direkten Einfluss auf die Übertragungsfläche im Kühlturm. Aus diesem Grund beeinflussen sie den Wärme- und Stoffübergang direkt und haben signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse. Die Unkenntnis dieser beiden Größen stellt eine große Unsicherheit für die Modellerstellung dar.

Des Weiteren kann eine feinere Vernetzung des Modells die Ergebnisse beeinflussen. Eine Berücksichtigung der Grenzschichten steht hier im Vordergrund. Durch eine feinere Auflösung im Randbereich können bessere Ergebnisse erzielt werden. Außerdem sollte eine Vernetzung mit Hexaedern bevorzugt werden. Es gilt zu beachten, dass eine noch größere Elementanzahl auch die Berechnungsdauer erheblich steigert.

4.3 Fazit

Bereits im kleinen Maßstab wurde deutlich, dass das *EULER-EULER*-Modell nicht in der Lage ist den Kühlprozess darzustellen. Aufgrund unrealistischer Ergebnisse wurde auf eine weitere Verwendung dieses Modells verzichtet.

Die *EULER-LAGRANGE*-Methode war für die gegebene Aufgabenstellung deutlich besser geeignet. Sowohl die einzelnen Größen – Temperatur, Wassergehalt und Geschwindigkeit – als auch die Energie- und Massebilanzen zeigten Werte in einer realistischen Größenordnung. Eine weitere Verbesserung wurde durch die Simulation mit den Abmessungen des realen Versuchsstandes erreicht. Dennoch sind Abweichungen zu den Messdaten erkennbar, welche auf die getroffenen Vereinfachungen zurückzuführen sind.

Grundlegend können die physikalischen Vorgänge im Kühlturm dargestellt werden. Das *EULER-LAGRANGE*-Modell ist für die Modellierung eines Verdunstungsprozesses geeignet, obwohl das Handbuch von ANSYS [53] angibt, dass dieses Modell nur für Kondensationsvorgänge vorgesehen ist. Allerdings ist es nicht gelungen, Verdunstung und Kondensation in eine Simulation zu implementieren. Beim Erreichen des Sättigungspunktes kommt es zum Absturz der Simulation. Die Methode ist also nicht in der Lage Phasenübergänge in beide Richtungen in einem Modell zu vereinen. Da das Ziel jedoch eine Simulation aller im Kühlturm stattfindenden Prozesse, mit gleichzeitig auftretender Verdunstung und möglicher Kondensation ist, ist eine Simulation mit CFD-Software nicht das geeignete Mittel der Wahl.

Des Weiteren ist eine Integration der Struktureinbauten in ein CFD-Modell aufgrund der sehr komplexen Struktur nur sehr schwer möglich. Es konnte von *KLAUSNER* [51] mit sehr hohem Rechenaufwand lediglich ein Teil des Kühlturms mit Kühleinbau simuliert werden. Dabei wurde nur die Komponente Luft berücksichtigt. Es ist sehr aufwändig bis unmöglich in dieses Modell die zweite Komponente Wasser inklusive Phasenübergang zu integrieren, da die Berechnung sehr komplex wird und der Rechenaufwand stark ansteigt. Selbst wenn sehr viel Rechenleistung zur Verfügung steht, ist immer nur die Betrachtung eines kleinen Teilstücks des Einbaus möglich. Als Alternative wurde von *KLAUSNER* untersucht, den Druckverlust mittels eines Modells basierend auf einem porösen Medium, zu simulieren. Allerdings ist auch hier die Integration des Phasenübergangs des Wassers wenn überhaupt nur mit sehr hohem Aufwand möglich.

Dieses führt zu der Schlussfolgerung, dass die Simulation mit ANSYS CFX sehr aufwändig und in ihrer Anwendbarkeit auf eine Richtung der Phasenumwandlung begrenzt ist. Mit einem eigenen Bilanzmodell kann die komplexe Strömungssimulation mittels Lösung der *NAVIER-STOKES*-Gleichung, die von ANSYS CFX durchgeführt wird, eingespart werden. Dadurch reduziert sich der Rechenaufwand signifikant. Das Netz kann gröber gewählt werden und dennoch werden mit der Methode Aussagen zum Verhalten des Realmodells gewonnen. Wie dieses gelingt wird in den folgenden Kapiteln aufgezeigt.

5 Entwicklung des Systemmodells „*Virtueller Kühlturm*“

5.1 Anforderungen an ein geeignetes Simulationsmodell

Für die versuchsbegleitende Simulation sind schnelle Modelle notwendig, welche trotz Vereinfachungen die Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge mit ausreichender technischer Genauigkeit wiedergeben können [54, 55]. Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, ist die Simulation mit CFD-Software sehr aufwändig und der Anwender ist auf die Modellformulierung entsprechend der Programmvorgaben angewiesen. Dieses führt unter anderem dazu, dass Kondensation und Verdunstung bei der verwendeten Software-Version nicht optimal implementiert werden konnten. CFD-Software basiert meistens auf der Lösung der Energie-, Masse- und Impulserhaltungsgleichung in einem ortsdiskreten Raster. Aus diesem Grund ist die Implementierung vereinfachender Modellvorstellungen (zum Beispiel: Abbildung einer Fluidströmung als Rührkesselkaskade) nicht möglich. Aufgrund dieser Beschränkungen und dem verfolgten Ziel, schnelle und aussagefähige Modelle zu erstellen, wird auf Ansätze der gleichungsorientierten Simulation technischer Systeme zurückgegriffen. Eine ausführliche Diskussion der gleichungsorientierten Simulation erfolgt beispielsweise in [3, 56, 57, 58].

Während die Modellierung mit CFD-Software zwangsläufig die Lösung der *NAVIER-STOKES*-Gleichung bedingt, wird für die Entwicklung eines geeigneten Modells vorgeschlagen auf die komplexe Strömungssimulation zu verzichten und die Energie- und Massebilanzen entlang des Strömungsweges modelltechnisch durch eine Rührkesselkaskade zu beschreiben. In dieser werden die Durchströmrichtungen von Wasser und Luft entgegengesetzt festgelegt. Eine Aufteilung der Massenströme, bei den durch den Einbau bedingten Stromteilungen, wird hier mittels Verteilungskoeffizienten modelliert [59]. Ein Beispiel für eine Aufteilung des Prozessstroms Wasser ist in der folgenden Abbildung 5.1 dargestellt.

Es ist offensichtlich, dass auch ein in solchen Maßen vereinfachtes Modell aus sehr vielen durch Wärme- und Stofftransport gekoppelten Bilanzzellen besteht. Eine flexible Modellerstellung erfordert daher ein geeignetes methodisches Vorgehen (Modellkonzeption), um die gekoppelten Bilanzgleichungen zu erstellen. Durch das Ausnutzen der horizontalen Symmetrie des Kühlturms ist jedoch eine zweidimensionale Darstellung ausreichend.

Für die Erstellung des Modells ist somit die Festlegung von Modellannahmen obligatorisch. Charakteristisch für die gewählte Art der stationären Modellierung ist:

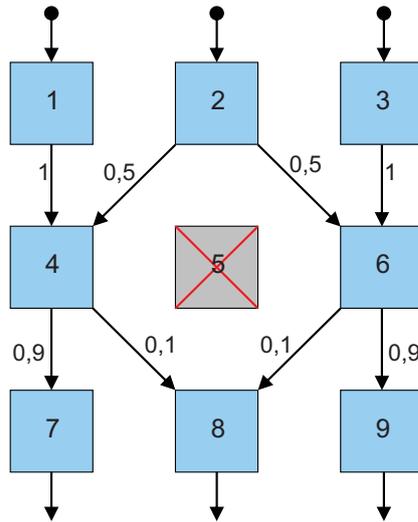


Abbildung 5.1: Beispiel der Verteilung von Wasser mit neun Zellen

- Die zweidimensionale Aufteilung erfolgt in gleich große Bilanzzellen.
- Für jede Zelle wird die Energie- und Massebilanz aufgestellt. Die Änderungen der kinetischen und potentiellen Energien der Stoffströme sind dabei vernachlässigbar klein.
- Die interessierenden Zustandsgrößen sind die Temperatur des Wassers t_W , die Temperatur der Luft t_L und der Wassergehalt der Luft x_L innerhalb der Zelle.
- Entsprechend der Konvention einer ideal durchmischten Zelle (Rührkessel) sind die Ausgangsgrößen gleich dem Zustand der Ströme innerhalb der Zelle.
- Der Zustand der Zelle (also der Zustand der austretenden Größen) ergibt sich durch den internen Wärme- und Stoffübergang.
- Die Kühlturmeinbauten begrenzen jeweils die linke und rechte Seite der Bilanzzellen, sie werden als adiabatisch und stoffdicht angenommen, ebenso verhält es sich mit der Systemgrenze des Kühlturms.
- Die Ströme sind beim Eintritt gleichmäßig verteilt. Der Wassermassestrom fällt anschließend gravitativ nach unten und die von der Luft mitgerissene Tropfen werden nicht bilanziert. Die folgenden Stromteilungen durch Kühlturmeinbauten werden mittels Verteilungskoeffizienten abgebildet.
- Das Gesamtsystem des Kühlturms ergibt sich aus den entsprechend der Strömungswege der Fluide gekoppelten Bilanzzellen.

Selbst erstellte gleichungsorientierte Modelle sind auf Systeme geringer Komplexität und Kompliziertheit begrenzt, wenn keine automatisierbaren Methoden für die Formulierung der gekoppelten Modellgleichungen zur Verfügung stehen.

5.2 Modellkonzept: Trennung von Struktur und Funktion

Wie oben angeführt, ergibt sich durch die Gegenstromführung entlang der Kühlturmeinbauten ein komplexes, gekoppeltes Modell vieler Bilanzzellen. Um ein Modell der Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge in einem Kühlturm mit Einbauten beschreiben zu können, wird auf einen Ansatz der *Systemverfahrenstechnik* zurückgegriffen, welcher die Bedeutung der getrennten Beschreibung von Struktur und Funktion eines zu modellierenden verfahrenstechnischen Systems betont [59, 60].

In der vorliegenden Problemstellung wird die Struktur über die Verschaltung vieler einzelner Bilanzzellen untereinander gebildet (Strukturmodell). Die davon getrennten internen Abläufe finden in jeder Bilanzzelle statt, welche die Funktion des Modells darstellt (Funktionsmodell). Das Gesamtmodell des *Virtuellen Kühlturms* entsteht schließlich durch die Kopplung des übergeordneten Strukturmodells und der Funktionsmodelle der einzelnen Zellen. Die Kopplung von Struktur und Funktion gibt das Verhalten aller gekoppelten Bilanzzellen wieder.

Komplexe (verfahrens-)technische Systeme können vorteilhaft als „*technisches Netz*“ beschrieben werden [58, 61]. *STRELOW* definiert ein solches Netz wie folgt, zitiert durch *KUNZ*:

„Ein technisches Netz ist ein auf physikalischen Wirkprinzipien basierendes technisches System, welches aus Knoten sowie Verbindungen zwischen den Knoten besteht. Die Knoten verfügen über ein durch intensive Größen charakterisiertes Potential. Im Allgemeinen besitzen die Knoten Speicherkapazität sowie Quellen und Senken. Das Potential der Knoten ist örtlich konstant oder weist ein ortsabhängiges Profil auf. Zwischen den Knoten existieren Verbindungen. Diese Verbindungen ermöglichen einen Fluss, dessen Eigenschaften extensive physikalische Größen beschreiben.“ ([58] 2013, S. 44f).

Dieser allgemeine Ansatz soll für die Modellerstellung des *Virtuellen Kühlturms* nutzbar gemacht werden. Hierzu wird das System als stationär angesehen, wodurch keine Speicherkapazität vorhanden ist. Des Weiteren entfallen die Quellen und Senken in der Zelle.

Eine Modellzelle setzt sich aus zwei Knoten (Wasserknoten und Knoten der feuchten Luft) zusammen. Analog zum *KIRCHHOFF*'schen Knotenpunktsatz für Gleichstromnetzwerke gilt: Die Summe der zu- und abfließenden Wärme- und Stoffströme ist gleich null [62].

Die beiden Knoten sind miteinander gekoppelt. Es tritt ein Wärme- und Stoffstrom aufgrund von Potentialunterschieden (Temperaturdifferenz und Partialdruckdifferenz zwischen

Luft und Wasser) auf. Die Richtung des Flusses folgt aus der Potentialdifferenz. Dieses führt zu internen Wärme- und Stoffänderungen innerhalb einer Zelle. Diese Transportvorgänge beeinflussen sich gegenseitig. Insbesondere die physikalische Beschreibung des Knotens der feuchten Luft ist nicht linear (Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks, Überschreiten des Sättigungspunktes). Die nichtlinearen Prozesse innerhalb einer Zelle werden über eine mathematische Funktion – nachfolgend „Zellenmodell“ genannt – abgebildet, welche die Bilanzgrößen in einer Zelle beschreiben.

Die Verbindungen der Zellen ergeben sich aus den gegenläufigen Strömungswegen der flüchtigen Luft und Wasser, diese werden hier durch die Aufprägung der Masseströme am jeweiligen Eingang bestimmt. Dabei sind die jeweiligen Knoten für Wasser und die jeweiligen Knoten für feuchte Luft getrennt untereinander verschaltet. Die aus den Zellen ein- und austretenden Fluidströme sind linear, daher lassen sich die Verschaltungen der Zellen vorteilhaft unter Verwendung von Verteilungskoeffizienten in Matrizenform beschreiben [59, 63].

Zu beachten ist, dass im Modell zwei Arten der Kopplungen auftreten. Einerseits gibt es Kopplungen zwischen den Zellen entlang derer die Richtung der Flüsse durch Strömungswege / aufgeprägte Massenströme vorgegeben sind. Andererseits liegen Kopplungen zwischen den Knoten innerhalb einer Zelle vor. Die Richtung der Flüsse dieser Kopplungen ergeben sich aus der Potentialdifferenz der Knoten, also aus den Zustandsgrößen der Knoten.

Der Vorteil dieser Betrachtung liegt darin, dass die nichtlineare Funktionalität des Verdunstungsprozesses getrennt von den linearen Verteilungsbilanzen behandelt werden kann. Wie im Folgenden gezeigt werden wird, ermöglicht dieses die Behandlung der Modellgleichungen mit Methoden der Matrizenalgebra.

5.3 Funktionsmodell des Wärme- und Stofftransports – „Zellenmodell“

Zunächst wird ein physikalisch begründetes Zellenmodell für die Wärme- und Stoffübergänge in einer einzelnen Bilanzzelle erstellt. Das Zellenmodell bildet die Grundlage der physikalischen Vorgänge im Kühlturm und stellt die Funktion für jede Zelle des Gesamtmodells dar. Es bildet alle relevanten auftretenden Zustandsänderungen und Transportphänomene in der Modellzelle qualitativ ab [57]. Hierzu zählen der Wärme- und Stofftransport zwischen den zwei Komponenten Luft und Wasser, wobei das Wasser in zwei Phasen – flüssig und dampfförmig – vorkommen kann.

Analog zur Bilanzierung des gesamten Kühlturms in Abschnitt 2.2.4 werden die in die Bilanz eingehenden Wärme- und Stoffströme für jede Modellzelle aufgestellt. Aufgrund der zwei Komponenten Luft und Wasser besteht die Bilanzzelle auch aus zwei Bilanzräumen (Knoten), die durch eine Phasengrenze getrennt sind. Über diese Grenze ist Wärme- und

Stoffübertragung möglich. Dabei werden alle durch die Zelle regnenden Tropfen auf eine Seite der Zelle zusammengefasst, die Luft wird analog auf der anderen Seite der Bilanzzelle zusammengefasst. Beide Bilanzräume sind in der jeweiligen Zelle ideal durchmischt (Modell eines idealen Rührkessels). Durch die Konvention des idealen Rührkessels weisen beide Komponenten innerhalb der Zelle einen einheitlichen Zustand auf. Es ist festgelegt, dass in den jeweiligen Knoten der Zelle die Ausgangsbedingungen herrschen (siehe Abbildung 5.2).

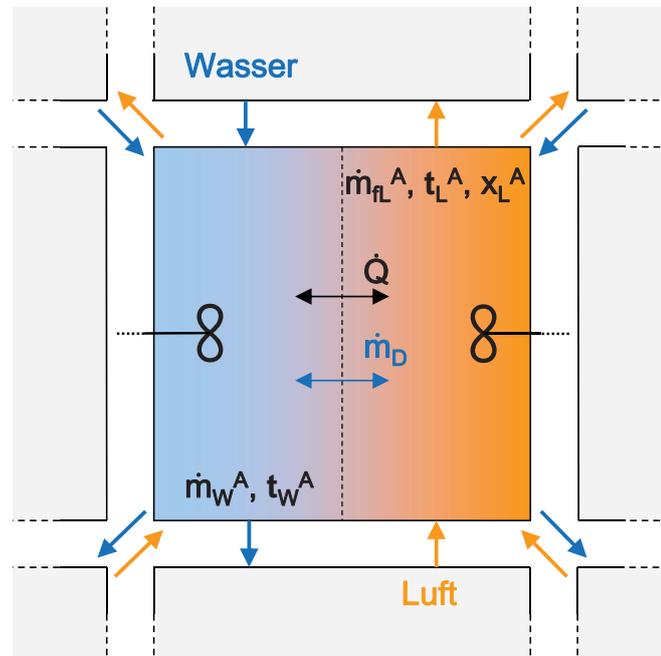


Abbildung 5.2: Modellzelle: ideal durchmischter Wärmeübertrager ohne Trennwand

Das Zellenmodell entspricht somit einem ideal durchmischten Wärmeübertrager, indem die Trennwand nicht nur für Wärme- sondern auch für Stofftransport durchlässig ist. Beide Transportvorgänge müssen getrennt beschrieben und anschließend gekoppelt werden.

5.3.1 Wärmeübergang in einer Zelle

Wie in dem Abschnitt 2.2.4 gezeigt, sind die Wärmeströme durch Konvektion \dot{Q}_α und durch die Phasenumwandlung \dot{Q}_σ maßgeblich für die Berechnung. Ziel ist die mathematische Beschreibung des Wärmestroms zwischen Luft und Wasser in Abhängigkeit von den Zuständen der eintretenden Ströme aus den benachbarten Zellen.

Für den Wärmestrom innerhalb der Zelle gilt:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_\alpha + \dot{Q}_\sigma = f(\dot{H}_W, \dot{H}_L, \dot{m}_W, x_L). \quad (5.1)$$

Aus den eintretenden und austretenden Enthalpieströmen von Luft und Wasser lassen sich deren Temperaturen bestimmen¹:

¹Die Bezugstemperatur t_0 wurde bereits auf $t_0 = 0^\circ\text{C}$ beziehungsweise $T_0 = 273,15\text{ K}$ festgelegt

$$\Delta t_W = t_W - t_0 = \frac{\dot{H}_W}{\dot{m}_W \cdot c_{pW}} \quad (5.2)$$

und

$$\Delta t_L = t_L - t_0 = \frac{\dot{H}_L - \dot{m}_L \cdot x_L \cdot \Delta h_v}{\dot{m}_L \cdot (c_{pL} + x_L \cdot c_{pD})}. \quad (5.3)$$

Die Temperaturdifferenz der Medien ($t_W^A - t_L^A$) ist die Triebkraft (Potentialdifferenz) der Wärmeübertragung [34]. Der konvektiv übertragene Wärmestrom \dot{Q}_α in den ideal durchmischten Bilanzräumen folgt aus:

$$\dot{Q}_\alpha = \alpha \cdot A \cdot (t_W^A - t_L^A). \quad (5.4)$$

Aus den in Abschnitt 2.2.4 vorgestellten Energiebilanzen, zunächst **ohne** Berücksichtigung des Stoffübergangs, ergibt sich unter der Annahme von konstanter Wärmekapazitäten innerhalb der Zelle

$$\dot{Q} = \dot{Q}_\alpha = \dot{m}_W^A \cdot c_{pW} \cdot (t_W^E - t_W^A) = \dot{m}_L \cdot (c_{pL} + x_L^A \cdot c_{pD}) \cdot (t_L^A - t_L^E). \quad (5.5)$$

Mit dem Kapazitätsstrom

$$\dot{C}_W = \dot{m}_W^A \cdot c_{pW} \quad (5.6)$$

für Wasser und dem Kapazitätsstrom

$$\dot{C}_L = \dot{m}_L \cdot (c_{pL} + x_L^A \cdot c_{pD}) \quad (5.7)$$

für die feuchte Luft lassen sich die Gleichungen vereinfachen:

$$\dot{Q}_\alpha = \dot{C}_W \cdot (t_W^E - t_W^A) = \dot{C}_L \cdot (t_L^A - t_L^E) = \alpha \cdot A \cdot (t_W^A - t_L^A). \quad (5.8)$$

Diese Gleichungen lassen sich vorteilhaft in Matrixschreibweise aufstellen:

$$\begin{bmatrix} \dot{C}_W & 0 \\ 0 & \dot{C}_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_W^A \\ t_L^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{C}_W & 0 \\ 0 & \dot{C}_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_W^E \\ t_L^E \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha A & -\alpha A \\ -\alpha A & \alpha A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_W^A \\ t_L^A \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

Mit der dimensionslosen Größe für Wasser und feuchte Luft

$$N_{W/L} = \frac{\alpha \cdot A}{\dot{C}_{W/L}} \quad (5.10)$$

ergibt sich nach Umformung:

$$\begin{bmatrix} t_W^E \\ t_L^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + N_W & -N_W \\ -N_L & 1 + N_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_W^A \\ t_L^A \end{bmatrix}. \quad (5.11)$$

Um diese Gleichung nach den gesuchten Ausgangstemperaturen t_i^A von Luft und Wasser umzustellen, wird die Inverse der Matrix durch Anwendung der *CRAMER*'schen-Regel gebildet [45]:

$$\begin{bmatrix} t_W^A \\ t_L^A \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + N_W + N_L} \begin{bmatrix} 1 + N_L & N_W \\ N_L & 1 + N_W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_W^E \\ t_L^E \end{bmatrix}. \quad (5.12)$$

Mit der bereits von *BOŠNJKOVIĆ* formulieren Betriebscharakteristik für den ideal durchmischten Rührkessel [64, 65]:

$$\Phi_W = \frac{t_W^E - t_W^A}{t_W^E - t_L^E} = \frac{N_W}{1 + N_W + N_L}, \quad (5.13)$$

$$\Phi_L = \frac{t_L^A - t_L^E}{t_W^E - t_L^E} = \frac{N_L}{1 + N_W + N_L}.$$

beschreibt die folgende Matrizengleichung die Ausgangstemperaturen der Fluide:

$$\begin{bmatrix} t_W^A \\ t_L^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \Phi_W & \Phi_W \\ \Phi_L & 1 - \Phi_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_W^E \\ t_L^E \end{bmatrix}. \quad (5.14)$$

Die in der betrachteten Modellzelle auftretenden gekoppelten Wärme- und Stofftransportphänomene können mittels einer abstrahierten Form dieser vorgestellten Betriebscharakteristik definiert werden. Die Gleichung 5.9 wird um den zusätzlichen Wärmestrom \dot{Q}_σ erweitert:

$$\begin{bmatrix} \dot{C}_W & 0 \\ 0 & \dot{C}_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_W^A \\ t_L^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{C}_W & 0 \\ 0 & \dot{C}_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_W^E \\ t_L^E \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha A & -\alpha A \\ -\alpha A & \alpha A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_W^A \\ t_L^A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Q}_\sigma \\ -\dot{Q}_\sigma \end{bmatrix}. \quad (5.15)$$

Der Term \dot{Q}_σ stellt dabei den zusätzlichen Wärmestrom zwischen Luft und Wasser durch Verdunstung beziehungsweise Kondensation dar. Da der Wärmetransport von dem Wasser zur Phasengrenze intensiver ist, als der Wärmetransport von der Luft zur Phasengrenze, wird die für die Verdunstung benötigte Energie stets dem Wasser entzogen. Aus diesem Grund ist der Term \dot{Q}_σ für Luft gleich null. Für Wasser folgt dieser Wärmestrom \dot{Q}_σ aus dem übertragenen Wassermassestrom \dot{m}_D und der damit verbundenen Zu- oder Abnahme der Enthalpie [66].

Durch die Umstellung des übertragenen Wärmestroms nach der Temperaturdifferenz

$$\Delta T_\sigma = \frac{\dot{Q}_\sigma}{\dot{m}_W \cdot c_{pW}} = \frac{\dot{Q}_\sigma}{\dot{C}_W} \quad (5.16)$$

ergibt sich nach analoger Herleitung wie in den Gleichungen 5.9 bis 5.14 für die modifizierte Betriebscharakteristik:

$$\begin{bmatrix} t_W^A \\ t_L^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \Phi_W & \Phi_W \\ \Phi_L & 1 - \Phi_L \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} t_W^E \\ t_L^E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta T_\sigma \\ 0 \end{bmatrix} \right). \quad (5.17)$$

Damit lässt sich für die Gleichungen schreiben:

$$\begin{cases} t_W^A = t_W^E - \Phi_W \cdot (t_W^E - t_L^E + \Delta T_\sigma) + \Delta T_\sigma \\ t_L^A = t_L^E + \Phi_L \cdot (t_W^E - t_L^E + \Delta T_\sigma) \end{cases}. \quad (5.18)$$

Die zusätzliche Erwärmung / Abkühlung des Wassers, ausgedrückt durch den Term ΔT_σ , lässt sich bei Kenntnis des übertragenen Wassermassestroms \dot{m}_D aus der Energiebilanz herleiten. Aus der Gleichung 2.18 und unter Vernachlässigung des bereits berücksichtigten konvektiven Wärmestroms \dot{Q}_α gilt für die Energiebilanz des Wassers:

$$\dot{m}_W^E \cdot t_W^E \cdot c_{pW} - \dot{m}_W^A \cdot t_{W,N}^A \cdot c_{pW} - \dot{m}_D \cdot \Delta h_{V,G} = 0. \quad (5.19)$$

Es kann vereinfacht angenommen werden, dass die Temperaturabhängigkeit von c_{pW} für eine einzige Zelle keinen Einfluss hat, da die Temperaturdifferenz von nur einer Zelle sehr klein ist. Mit der Massebilanz $\dot{m}_W^A = \dot{m}_W^E - \dot{m}_D$ und durch Umstellen der Gleichung 5.19 lässt sich die Austritts-Temperatur des Wassers nur durch den Effekt der Verdunstung wie folgt berechnen:

$$t_{W,N}^A = \frac{\dot{m}_W^E \cdot t_W^E - \frac{\dot{m}_D \cdot \Delta h_{V,G}}{c_{pW}}}{\dot{m}_W^E - \dot{m}_D}. \quad (5.20)$$

Durch die Verdunstung des Wassers sinkt die Temperatur des Wassers zusätzlich zum konvektiv übertragenen Wärmestrom weiter um den Term:

$$\Delta T_\sigma = t_{W,N}^A - t_W^E. \quad (5.21)$$

Mit diesem zusätzlichen Term ΔT_σ in der Betriebscharakteristik wird die zusätzliche Abkühlung beziehungsweise Erwärmung des Wassers durch Verdunstung beziehungsweise Kondensation berücksichtigt. Die aus der Betriebscharakteristik ohne Stoffübergang errechnete Temperatur t_W^A wird um dem Wert ΔT_σ korrigiert. Im Falle einer Verdunstung von Wasser ist der übertragene Massestrom \dot{m}_D negativ und somit auch der Term ΔT_σ . Im Fall von Kondensation kehrt sich dieser Prozess um. Auf diese Weise lässt sich bei Kenntnis

des übertragenen Massestroms \dot{m}_D der Phasenwechsel in der Zelle in beide Richtungen darstellen.

Die in der Gleichung 5.20 übertragene Wassermasse \dot{m}_D ist jedoch bisher nicht bekannt. Hierzu ist eine Formulierung des Stoffübergangs notwendig.

5.3.2 Stoffübergang in einer Zelle

Der Stoffübergang bei freier Konvektion ist die Grundlage für die Modellierung des Stoffübergangs. Der Konzentrationsunterschied zwischen der Phasengrenze des Wasser und der Kernströmung der feuchten Luft ist die Triebkraft (Potentialdifferenz) für den Stoffübergang. Der übertragene Massestrom wird analog zum Wärmestrom (Abschnitt 5.3.1) als Funktion der eintretenden Einflussgrößen definiert:

$$\Delta \dot{m} = f(\dot{H}_W, \dot{H}_L, \dot{m}_W, x_L). \quad (5.22)$$

Analog zum konvektiven Wärmeübergang wird der Stoffmengenstrom über die allgemeine Grundgleichung der Stoffübertragung mit folgender Gleichung definiert [66]:

$$\dot{N} = \beta \cdot A \cdot \Delta c. \quad (5.23)$$

Der Konzentrationsunterschied Δc ist die Folge des Dichteunterschieds. Unter der Annahme, dass sich der Wasserdampf wie ein perfektes Gas verhält, gilt für die Dichte:

$$\rho = \frac{p}{R_W \cdot T}. \quad (5.24)$$

Somit ergibt sich für den übertragenen Wassermassestrom:

$$\boxed{\dot{m}_D = \beta_p \cdot A \cdot (p_1 - p_2)} \quad (5.25)$$

mit dem Stoffübergangskoeffizienten der Partialdrücke

$$\beta_p = \beta \cdot \frac{M_W}{\bar{R} \cdot T}. \quad (5.26)$$

An dieser Stelle wird bewusst vermieden die Verdunstungsziffer σ (siehe Gleichung 2.15) zu verwenden. *KLENKE* weist in seiner Arbeit [10] darauf hin, dass der oft verwendete Zusammenhang $\sigma = \beta \cdot \rho_L$ nur in grober Annäherung gilt. Er kommt zu dem Ergebnis, dass dieses vor allem bei hohen Wassertemperaturen zu erheblichen Fehlern führt. Mit der direkten Verwendung des Stoffübergangskoeffizienten β wird dieser Fehler vermieden.

Die Drücke p_1 und p_2 sind die Triebkraft für die Stoffübertragung. Diese ist das Gefälle des Wasserdampfpartialdrucks zwischen dem flüssigen Wasser und der feuchten Luft. Der Druck p_1 wird über den Sättigungsdruck des flüssigen Wassers bei der Phasengrenztemperatur t_G

bestimmt. Dieser lässt sich mit sehr guter Näherung über die erweiterte *ANTOINE*-Gleichung² bestimmen [67]:

$$p_S(t) = 100 \cdot 10^{\left(9,758496 - \frac{2755,526}{t+273,15} - 0,008410066 \cdot (t+273,15) + 0,00000553 \cdot (t+273,15)^2\right)}. \quad (5.27)$$

Alternativ ist eine Berechnung über den Industriestandard IAPWS-IF97 [68] möglich. Die Differenz beider Implementierungen ist jedoch vernachlässigbar gering.

Der Wärmeübergang innerhalb eines einzelnen Wassertropfens ist sehr klein und wird somit vernachlässigt. Die Phasengrenztemperatur t_G ist somit gleich der Temperatur des Wassers t_W .

Bei dem Druck p_2 handelt es sich um den Partialdruck des dampfförmigen Wassers in der Luft. Er lässt sich über dem Volumenanteil Y_W beschreiben. Mit

$$Y_W = \frac{V_W}{V_W + V_L} \quad (5.28)$$

und unter der Annahme des perfekten Gasverhaltens für Luft und Wasserdampf

$$V_i = \frac{m_i \cdot \bar{R} \cdot T}{p_U \cdot M_i} \quad (5.29)$$

ergibt sich für den Partialdruck des Wassers in der Luft p_W :

$$p_W = Y_W \cdot p_U = \frac{\frac{m_W \cdot \bar{R} \cdot T}{p_U \cdot M_W}}{\frac{m_W \cdot \bar{R} \cdot T}{p_U \cdot M_W} + \frac{m_L \cdot \bar{R} \cdot T}{p_U \cdot M_L}} \cdot p_U = \frac{\frac{m_W}{M_W}}{\frac{m_W}{M_W} + \frac{m_L}{M_L}} \cdot p_U. \quad (5.30)$$

Mit der Definition des Wassergehalts $x_L = \frac{m_W}{m_L}$ wird

$$p_W = \frac{\frac{x_L}{M_W}}{\frac{x_L}{M_W} + \frac{1}{M_L}} \cdot p_U. \quad (5.31)$$

Damit lässt sich schließlich für den Partialdruck des Wasser schreiben [69]:

$$p_W = \frac{x_L \cdot M_L}{x_L \cdot M_L + M_W} \cdot p_U. \quad (5.32)$$

Allgemein gilt: Liegt der Dampfdruck des Wassers über dem Partialdruck des Wassers in der Luft, geht ein Stoffstrom von der flüssigen Phase Wasser in die Gasphase Luft über (Verdunstung). Liegt dieser unter dem Partialdruck des Wassers in der Luft, geht ein

²Eingabe: t in °C, Ausgabe: p_S in kPa; gültig für die gesamte Dampfdruckkurve vom Tripelpunkt bis zum kritischen Punkt

Stoffstrom von der Gasphase Luft in die flüssige Phase des Wassers über (Kondensation). Dieser Stoffstrom beschreibt den in dieser Arbeit so genannten Dampfmassestrom \dot{m}_D . Der Wassergehalt der Luft wird nach Bestimmung des übertragenen Wassermassestroms aus der Massebilanz des Dampfes (Gleichung 2.5) neu bestimmt:

$$x_L^A = x_L^E + \frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_L}. \quad (5.33)$$

Eine Besonderheit tritt im Falle der gesättigten feuchten Luft auf. Die Luft kann nur so viel Wasser aufnehmen, bis der Sättigungspunkt erreicht ist. Der maximale übertragbare Massestrom ist:

$$\dot{m}_{MAX} = \dot{m}_L \cdot (x_S - x_L^E). \quad (5.34)$$

Der Sättigungswassergehalt wird hier schon bei der neuen Luft-Austritts-Temperatur t_L^A über folgende Gleichung bestimmt:

$$x_S = \frac{M_W}{M_L} \cdot \frac{p_S(t_L^A)}{p_U - p_S(t_L^A)}. \quad (5.35)$$

Es kann nur maximal so viel Wasser verdunsten, bis die Luft den Sättigungspunkt erreicht hat. Ist der aus Gleichung 5.25 zu übertragene Wassermassestrom \dot{m}_D größer als der maximal mögliche Massestrom \dot{m}_{MAX} aus der Gleichung 5.34, wird der übertragene Massestrom \dot{m}_D durch \dot{m}_{MAX} ersetzt:

$$\dot{m}_{D,N} = \dot{m}_{MAX}. \quad (5.36)$$

Es wird im Fall der Sättigung nur so viel Wasser übertragen wie theoretisch möglich ist. Der Wassergehalt der Luft x_L^A ist dann immer gleich dem Sättigungswassergehalt x_S der jeweiligen Temperatur der Zelle. Dieses lässt sich über die Gleichung 5.33 überprüfen. Der Zustandsverlauf der Luft nach Erreichen des Sättigungspunktes verläuft somit entlang der Sättigungslinie und entspricht damit dem von *MEHLIG* angenommenen Verlauf.

Für eine korrekte Modellierung aller ablaufenden Prozesse müssen die Wärme- und Stoffübertragungsphänomene gleichzeitig berechnet werden. Diese stehen jedoch in gegenseitiger Wechselwirkung. Im folgenden Abschnitt wird erläutert, wann welche Effekte auftreten, wie diese miteinander wirken und wie der Wärme- und Stoffübergang gekoppelt ist.

5.3.3 Kopplung von Wärme- und Stoffübertragung

Die gekoppelte Beschreibung der Wärme- und Stoffübertragung erfordert die Berücksichtigung verschiedener Transportprozesse. Bei einem Kondensationsvorgang hat die Potentialdifferenz der Temperatur zwischen zwei Knoten das gleiche Vorzeichen wie die Potentialdifferenz der Partialdrücke der Knoten. Hingegen sind bei einem Verdunstungs-

vorgang auch gegensätzliche Vorzeichen von Temperatur- und Partialdruckdifferenz der Knoten möglich [10]. Daraus ergeben sich vier verschiedene Zustandsänderungen, siehe Abbildung 5.3. Das Zellenmodell muss diese zuverlässig abbilden können [70].

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------------|----------------------------|-------------|-----------|----------------------|
| Drücke | $p_{D,W} > p_{pW,L}$ | | | $p_{pW,L} > p_{D,W}$ |
| Vorgang | Verdunstung | | | Kondensation |
| Temperaturen | $t_L < t_W$ | $t_L > t_W$ | | $t_L > t_W$ |
| Zustandsänderung der Luft | Erwärmung | Abkühlung | Abkühlung | Abkühlung |
| des Wassers | Abkühlung | Abkühlung | Erwärmung | Erwärmung |
| Anwendung | <i>Verdunstungskühlung</i> | | | Entfeuchtung |
| | Trocknung | | | |

$p_{D,W} \hat{=}$ Dampfdruck des Wassers bei Temperatur der Flüssigphase

$p_{pW,L} \hat{=}$ Partialdruck des Wasserdampfes in der Luft

Abbildung 5.3: Transportphänomene im Verdunstungskühlturm

Tritt der Fall ein, dass der Luftaustrittszustand im übersättigten Bereich liegt, kondensiert Wasser bis zum Erreichen des Sättigungspunktes aus. Die Luft am Austritt ist dann genau am Sättigungspunkt. Es geht ein Massestrom von der feuchten Luft in die flüssige Phase über. Der Dampfmassestrom \dot{m}_D kann dennoch in die andere Richtung verlaufen. Ist dieser betragsmäßig größer als der Kondensationsmassestrom \dot{m}_{MAX} , wird weiterhin von Verdunstung gesprochen. Es handelt sich um die Zustandsänderung 1 in der Abbildung 5.3. Für den tatsächlichen Vorgang der Kondensation müsste sich die Luft über die Temperatur des Wassers hinaus erwärmen, da wie schon erwähnt, die Temperatur- und Partialdruckdifferenzen für Kondensation die gleichen Vorzeichen haben müssen. Dieser Fall ist in Zustandsänderung 4 in der Abbildung 5.3 dargestellt.

Die Kopplung von Wärme- und Stoffübertragung erfordert eine iterative Berechnung der Zustandsänderungen innerhalb der Zelle. Im ersten Schritt wird eine Berechnung der Betriebscharakteristik durchgeführt. Aus diesem ersten Ergebnis wird anschließend der Stoffübergang bestimmt. Dem folgt eine Prüfung des Austrittszustandes der feuchten Luft. Ist der Sättigungszustand erreicht, kommt es zur Kondensation.

Mit den Ergebnissen dieses ersten Iterationsschrittes wird dann erneut die modifizierte Betriebscharakteristik berechnet. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis sich nahezu keine Änderungen des übertragenen Massestroms mehr zeigen. Zur Überprüfung dienen die Energie- und Massebilanzen von Wasser und Luft. Es zeigt sich, dass die Bilanzen problemlos bis zu einem Rest von $f = 1 \cdot 10^{-9}$ konvergieren. Das Zellenmodell liefert damit zuverlässig die Austrittsgrößen von Luft und Wasser der jeweiligen Bilanzzelle.

5.3.4 Bilanzgleichungssystem des Zellenmodells

Aus der oben vorgestellten physikalischen Beschreibung des Wärme- und Stoffübergangs wird das Zellenmodell erstellt. $f(\underline{z}_j^E)$ stellt die nichtlineare Funktion der Einflussgrößen am Zellenausgang in Abhängigkeit der Eingangsgrößen dar (siehe Abbildung 5.4).

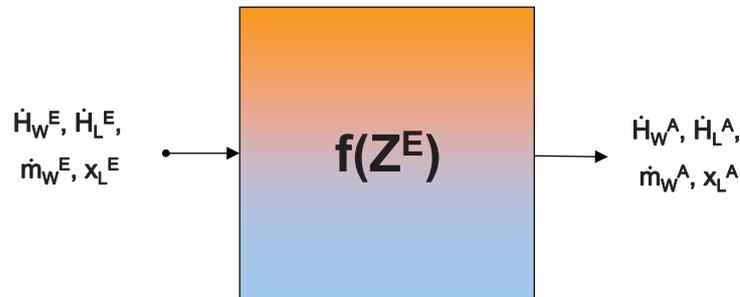


Abbildung 5.4: Zellenmodell als Funktion der Ausgangsgrößen und Abhängigkeit der Eingangsgrößen

Die interne Funktionalität der Wärme- und Stoffübertragung ist aufgrund des Verdunstungsprozesses nicht linear. Durch die Beschreibung der Nichtlinearitäten im Zellenmodell durch eine Funktion, ergeben sich Vorteile in der weiteren Handhabung.

Für jede Zelle wird eine Funktion erstellt, so dass sich entsprechend der Zellenanzahl n nichtlineare ortsdiskrete Einflussgrößen ergeben. Die gleichungsorientierte Simulation liefert so ein zu lösendes Gleichungssystem, durch welches die simultane Berechnung aller Einflussgrößen ermöglicht wird.

Wie in den Gleichungen 5.1 und 5.22 gezeigt, ist die Beschreibung des Wärme- und Stoffübergangs nur über mehrere Einflussgrößen möglich, diese sind:

- der Enthalpiestrom des Wassers \dot{H}_W ,
- der Enthalpiestrom der Luft \dot{H}_L ,
- der Wassermassestrom \dot{m}_W ,
- der Wassergehalt der Luft x_L .

Für eine simultane Berechnung aller Einflussgrößen für n Zellen werden diese in folgender Form in einem Vektor zusammengefasst:

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \dot{H}_{W,1} \\ \dot{H}_{W,2} \\ \vdots \\ \dot{H}_{W,n} \\ \dot{H}_{L,1} \\ \dot{H}_{L,2} \\ \vdots \\ \dot{H}_{L,n} \\ \dot{m}_{W,1} \\ \dot{m}_{W,2} \\ \vdots \\ \dot{m}_{W,n} \\ x_{L,1} \\ x_{L,2} \\ \vdots \\ x_{L,n} \end{bmatrix}. \quad (5.37)$$

Mit diesem Vektor der Einflussgrößen \underline{Z} lässt sich der Wärme- und Stoffübergang beschreibende Funktionsvektor f für n Zellen wie folgt ausdrücken:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{H}_W^A \\ \dot{H}_L^A \\ \dot{m}_W^A \\ \dot{x}_L^A \end{bmatrix}}_{\underline{Z}^A} = \underbrace{\begin{bmatrix} f(\dot{H}_W^E, \dot{H}_L^E, \dot{m}_W^E, x_L^E) \\ f(\dot{H}_W^E, \dot{H}_L^E, \dot{m}_W^E, x_L^E) \\ f(\dot{H}_W^E, \dot{H}_L^E, \dot{m}_W^E, x_L^E) \\ f(\dot{H}_W^E, \dot{H}_L^E, \dot{m}_W^E, x_L^E) \end{bmatrix}}_{f(\underline{Z}^E)}. \quad (5.38)$$

Auf diese Weise ist das nichtlineare Gleichungssystem des Zellenmodells definiert.

5.4 Strukturmodell der gekoppelten Zellen

5.4.1 Synthese des Netzmodells – Strukturerstellung

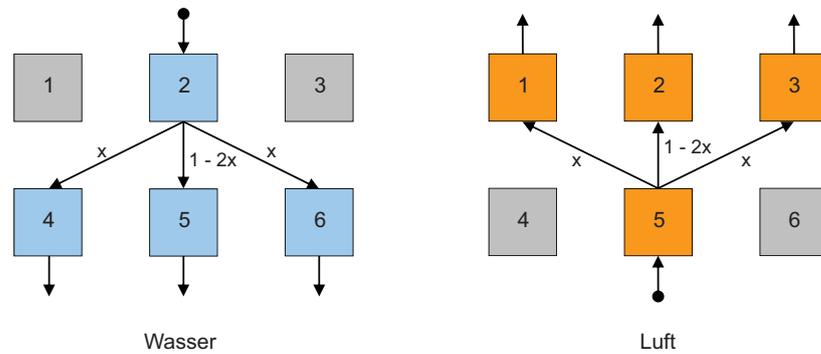
Das Modell des Gesamtsystems wird durch eine, die realen Strukturen im Kühlturm abbildende Verschaltung einzelner Zellenmodelle gebildet [71]. Durch diese Verknüpfung vieler Einzelsysteme wird ein zweidimensionales Modell erstellt.

Wie unter 5.2 kann die Beschreibung von Kopplungen der einzelnen Zellenmodelle mit Methoden der Matrizenalgebra erfolgen. Dieses ermöglicht eine automatisierbare Vorgehensweise für die Aufstellung der Modellgleichungen für unterschiedliche geometrische Strukturen. Daher ist es möglich verschiedene Bauformen der komplexen Struktureinbauten

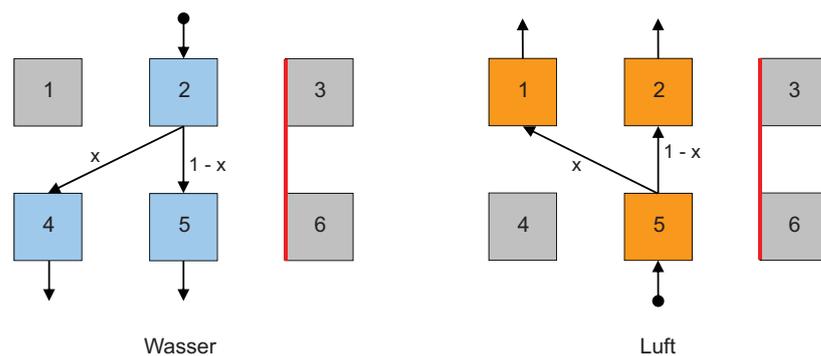
im Kühlturm in das Modell zu implementieren. Zunächst müssen für die Geometrie einige strukturbedingte Regeln aufgestellt werden.

Zunächst werden durch die nachfolgend dargestellten Abbildungen die für die Strömung von Wasser (links) und Luft (rechts) innerhalb des Systemmodells geltenden Regeln definiert:

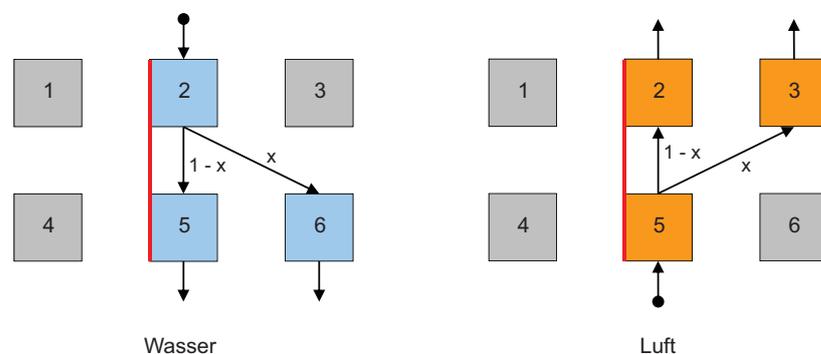
1. Regel: Kein Einbau



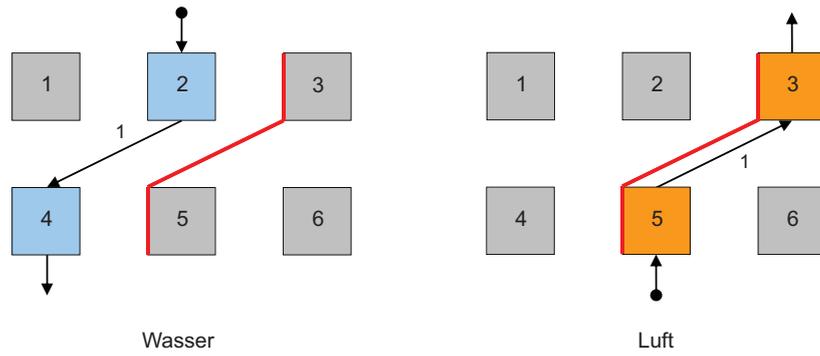
2. Regel: Rechte Seite mit Einbau



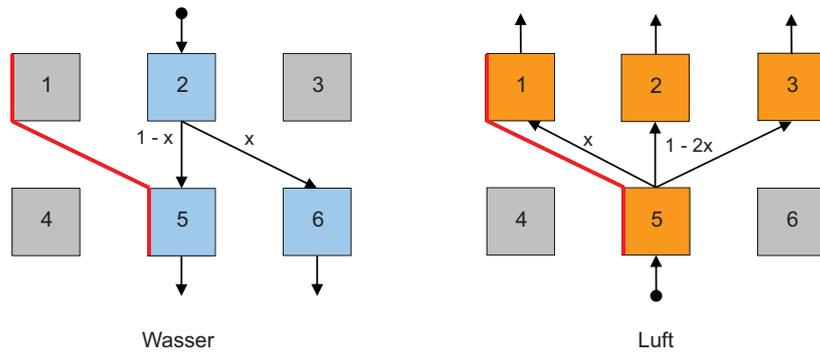
3. Regel: Linke Seite mit Einbau



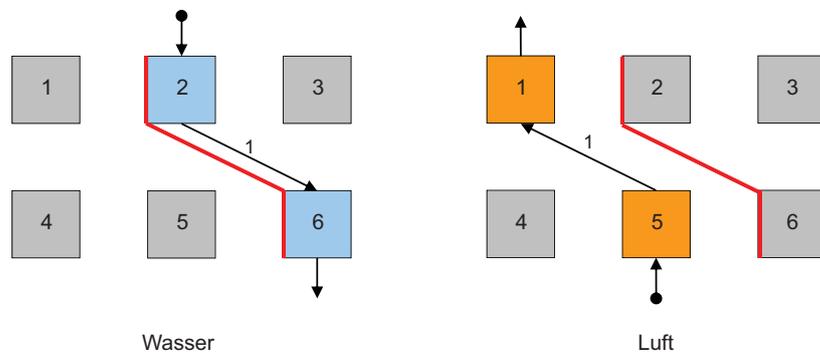
4. Regel: Einbau in rechts nebenliegender und folgender mittleren Zelle



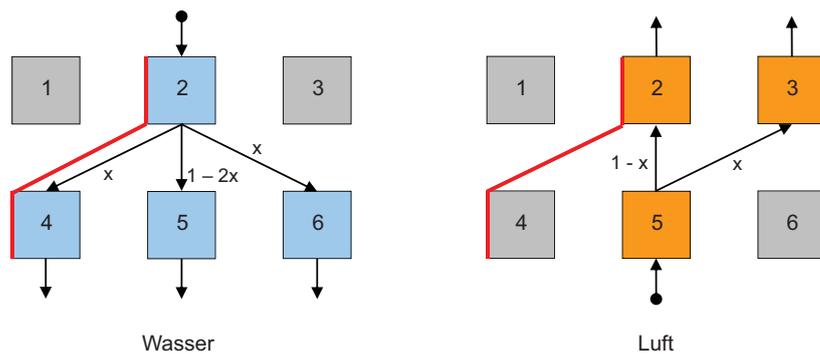
5. Regel: Einbau in links nebenliegender und folgender mittleren Zelle



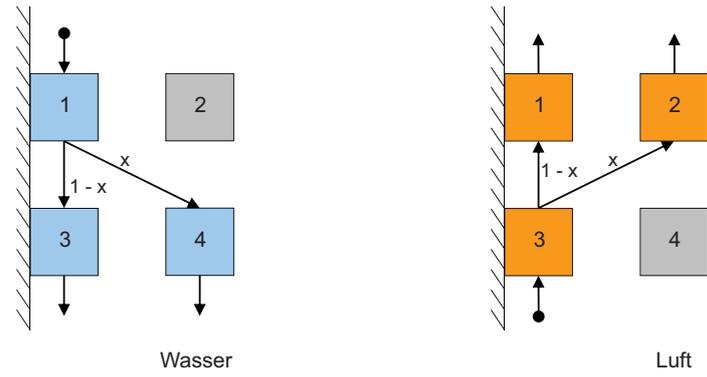
6. Regel: Einbau in Zelle selbst und in folgender rechten Zelle



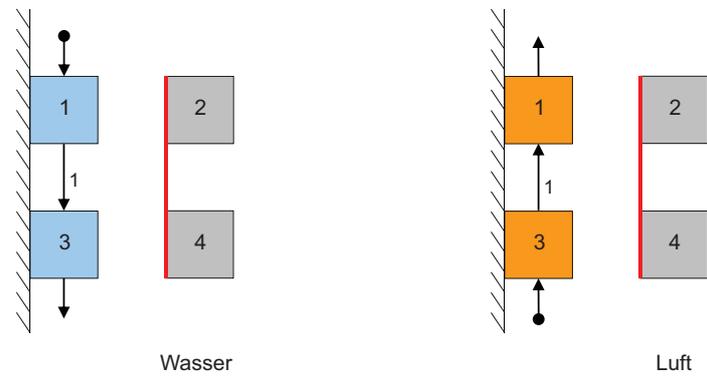
7. Regel: Einbau in Zelle selbst und in folgender linken Zelle



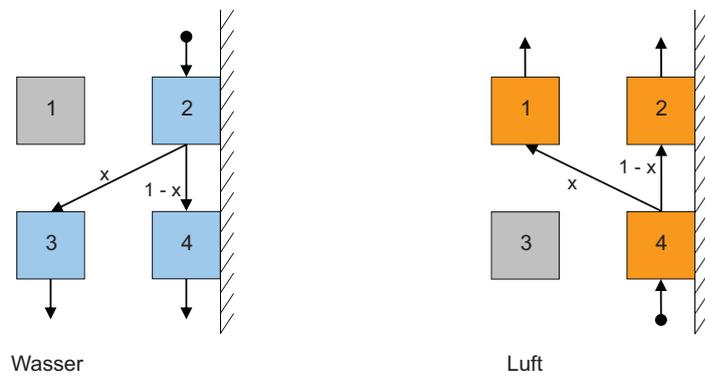
8. Regel: Randzelle linke Seite ohne Einbau



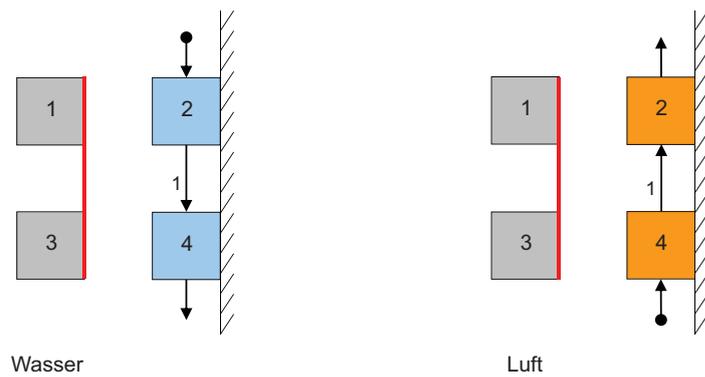
9. Regel: Randzelle linke Seite mit Einbau rechts



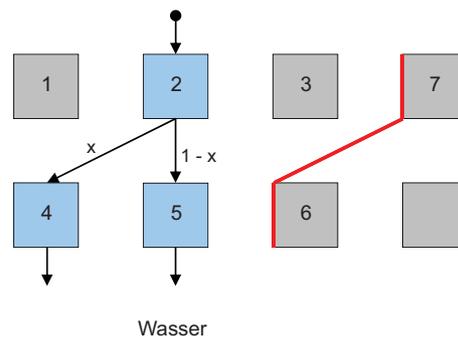
10. Regel: Randzelle rechte Seite ohne Einbau



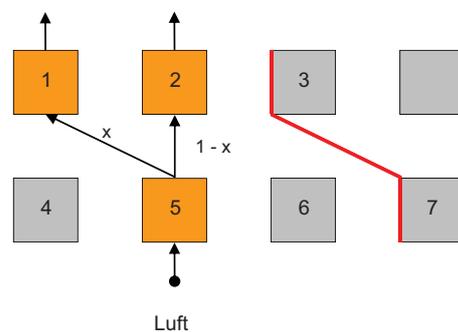
11. Regel: Randzelle rechte Seite mit Einbau links



12. Regel: Spezialfall für Strömung des Wassers



13. Regel: Spezialfall für Strömung der Luft



Die dicken roten Markierungen stellen in diesem Modell eine Einbauwand dar, welche immer am linken Rand der Zelle platziert wird. Durch diese findet kein Stoff- und Wärmetransport statt. Die Kopplungen in der Strukturmatrix werden entsprechend entfernt.

Die Geometrie des Systems legt die Stromführung für feuchte Luft und Wasser durch die einzelnen Zellen fest. Wie unter Kapitel 5.2 angedeutet, lassen sich diese Strukturinformationen unter Verwendung von Verteilungskoeffizienten in Matrizenform beschreiben. Eine solche Matrix enthält die Information der Verschaltung der Knoten untereinander [59]. Die Verteilungskoeffizienten stellen einen auf den gesamten Massestrom normierten Wert dar. Beispielsweise bedeutet $x_{vk} = 0,1$, dass 10 % des strömenden Massestroms des Mediums in die folgende seitlich versetzte Zelle strömt. Der übrige Massestrom strömt entsprechend in die direkt folgende Zelle. Der maximale Wert des Verteilungskoeffizienten ist auf $x_{vk} = 0,45$ (45 %) festgelegt, da bei freier Strömung (Regel 1) nur noch 10 % in die direkt folgende Zelle strömen würde und 90 % in die Nachbarzellen. Ein noch größerer Wert wäre physikalisch nicht sinnvoll, eine Diskussion der Verteilungskoeffizienten erfolgt in Abschnitt 5.11.1.

Ein weiterer Parameter ist der Flächenvergrößerungsfaktor A_f . Dieser Parameter bestimmt, um wie viel sich die Übertragungsfläche vergrößert, wenn die aktuelle Zelle durch ein Einbauelement beeinflusst wird. Dieses tritt immer dann auf, wenn die aktuelle Zelle ein Einbauelement als direkten Nachbarn hat. Ist dieses der Fall, vergrößert sich die Übertragungsfläche um den angegebenen Faktor. Ist dieser beispielsweise mit $A_f = 0,1$ angegeben,

vergrößert sich die Fläche um 10 %. Liegt als rechter und linker Nachbar eine Einbauzelle vor, verdoppelt sich der Faktor entsprechend. Im Beispiel mit $A_f = 0,1$ pro Einbauzelle vergrößert sich dieser entsprechend auf $A_f = 0,2$ und somit auf 20 %.

Die diskutierte Verteilung der Ströme von Luft und Wasser entsprechend der Regeln 1 bis 13 wird mittels der schon vorgestellten Strukturmatrix $\underline{\underline{S}}$ festgelegt. Dort werden die Koeffizienten entsprechend der prozentualen Verteilung auf die Zellen eingetragen. Die Nummer der Spalte in der Strukturmatrix $\underline{\underline{S}}$ stellt die Eingangszelle, die Nummer der Zeile die Ausgangszelle dar. Das Vorzeichen des Wertes gibt die Richtung der Prozessströme vor. Es ist möglich einen eingehenden Strom auf mehrere ausgehende Ströme zu verteilen. Die Summe der Parameter ist aufgrund der Masseerhaltung im System immer eins. Dieses wird bei der Beschreibung von den im Kühlturm befindlichen Einbauten eine zentrale Rolle spielen. Diese Matrix wird Strukturmatrix $\underline{\underline{S}}$ genannt und hat die Dimension $\mathbb{R}^{n \times n}$ [72].

Die Strukturmatrix $\underline{\underline{S}}$ hat aufgrund des Vektors der Einflussgrößen \underline{Z}_j , der sich aus intensiven und extensiven Einflussgrößen zusammensetzt, eine besondere Form. Die Enthalpie von Luft \dot{H}_L und Wasser \dot{H}_W sowie der Wassermassestrom \dot{m}_W sind extensive Einflussgrößen, der Wassergehalt der Luft x_L ist jedoch eine intensive Einflussgrößen. Analog zum Aufbau des Vektors der Einflussgrößen hat die Strukturmatrix folgende Form:

$$\underline{\underline{S}} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{S}}_{e,W} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{\underline{S}}_{e,L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{\underline{S}}_{e,W} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{\underline{S}}_{i,L} \end{bmatrix}. \quad (5.39)$$

Des Weiteren müssen die Eingangs- und Ausgangszellen des Systems definiert werden. Dieses geschieht mit Hilfe der so genannten „Inputmatrix“ \underline{I} und „Outputmatrix“ \underline{O} . Bei je einem Ein- und Ausgang sind dieses Matrizen mit je einer Spalte der Dimension $\mathbb{R}^{n \times 1}$ beziehungsweise einer Zeile der Dimension $\mathbb{R}^{1 \times n}$. Der Ein- beziehungsweise Austritt eines Stroms in und aus dem System wird in der Input- und Outputmatrix mit einer Eins in der entsprechenden Zelle beschrieben.

Zu beachten ist, dass jeweils für alle intensiven (Index i) und extensiven (Index e) Einflussgrößen separate Strukturmodelle benötigt werden. Das Strukturmodell wird in ein Energiemodell (intensiv) und ein Stoffmodell (extensiv) aufgeteilt.

Im Simulationsmodell werden die einzelnen Bereiche des Kühlturms getrennt eingegeben. Die Länge der Versprühzone, der Bereich der Einbauten und die Regenzone können getrennt beschrieben werden. Anschließend werden für alle Bereiche die charakteristischen Eigenschaften festgelegt.

Eine ausführliche Diskussion der hier vorgestellten unbekanntenen Modellparameter erfolgt in Abschnitt 5.11.1.

5.5 Zusammenführung von Funktions- und Strukturmodell

Das Gesamtmodell *Virtueller Kühlturm* besteht nun aus zwei Teilen: Zum einen aus den linearen Strukturinformationen in den strukturbeschreibenden Matrizen, zum anderen aus den nichtlinearen Modellzellen, welche die interne Funktion beschreiben. Diese Zellen werden über das in Abschnitt 5.3.4 aufgestellte Gleichungssystem beschrieben. Dadurch ergeben sich entsprechend der Elementanzahl n nichtlineare Gleichungen, die noch nicht direkt miteinander gekoppelt sind. Es besteht also noch keine direkte Abhängigkeit der Zellen untereinander.

Die Verbindung zwischen der Funktion in den Zellenmodellen und der Struktur ihres Zusammenspiels ergibt sich durch die Kopplung der Modelle über folgenden Zusammenhang [71, 73]:

$$\underline{z}^E = \underline{S} \cdot \underline{z}^A + \underline{I} \cdot \underline{z}^I. \quad (5.40)$$

Mit dieser Gleichung lässt sich der Einfluss der berechneten Ausgangsgrößen \underline{z}^A auf die Eingangsgrößen \underline{z}^E ermitteln. Auf diese Weise werden das Funktions- und Strukturmodell miteinander verschmolzen.

Die bestimmten Eingangsgrößen \underline{z}^E gehen dann wieder in das aus Abschnitt 5.3.4 bekannte, funktionelle Gleichungssystem ein. Das Gesamtmodell \underline{M} ist somit sowohl von den Ausgangs- als auch von den Eingangsgrößen abhängig:

$$\underline{z}^A = \underline{M}(\underline{z}^A, \underline{z}^E). \quad (5.41)$$

Das gekoppelte Funktionsmodell ergibt sich aus den Gleichungen 5.40 und 5.41:

$$\underline{z}^A = \underline{M}(\underline{z}^A, \underline{S} \cdot \underline{z}^A + \underline{I} \cdot \underline{z}^I) = \underline{M}(\underline{S} \cdot \underline{z}^A + \underline{I} \cdot \underline{z}^I). \quad (5.42)$$

Aufgrund der Abhängigkeit sowohl von den Eingangs- als auch von den Ausgangsgrößen lässt sich dieses nicht direkt lösen.

5.6 Iterative Lösung des gleichungsorientierten Modells

Formal ist das Gleichungssystem gelöst, wenn Ergebnisse ermittelt werden bei denen die nichtlineare Hilfsfunktion \underline{F} gleich null ist [74]:

$$\underline{0} \stackrel{!}{=} \underline{F}_j = \underline{z}_j^A - \underline{M}(\underline{S} \cdot \underline{z}_j^A + \underline{I} \cdot \underline{z}^I). \quad (5.43)$$

Da sich dieses Funktionsmodell aufgrund des nichtlinearen Anteils $\underline{M}(\underline{S} \cdot \underline{z}^A + \underline{I} \cdot \underline{z}^I)$ nicht explizit auflösen lässt, erfordert die Berechnung eine iterative Lösung des Gesamtmodells. Für den einzelnen Iterationsschritt wird der Index j verwendet.

Die Gleichung 5.43 wird zunächst mit gewählten Startwerten \underline{z}_j^A mit $j = 1$ für die Einflussgrößen gelöst. Die Startwerte führen nicht zur endgültigen Lösung des Gleichungssystems. Es verbleibt ein Vektor der Residuen \underline{F}_j . Die Berechnung ist abgeschlossen, wenn sich von der Iteration zur nächsten nur noch eine sehr kleine definierte Änderung einstellt.

Der Vektor \underline{F}_j stellt den Rest (Residuum) des aktuellen Iterationsschrittes dar. Da es sich bei \underline{F}_j um einen Vektor handelt, wird aus diesem über die kleinsten Fehlerquadrate (engl. **r**oot **m**ean **s**quare, RMS) ein gesamter Fehlerwert F_j bestimmt (euklidische Norm des Vektors) [75]:

$$F_{j,RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} (F_1^2 + F_2^2 + \dots + F_n^2)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i^2}. \quad (5.44)$$

Dieser gibt den aktuellen Fehler des gesamten Systems in einer Zahl wieder. Alternativ kann der maximale Fehler $F_{j,MAX}$ ausgegeben werden (Maximumnorm des Vektors). Dieser stellt den größten Fehler aller Zellen dar. Auf diese Weise ist für die Berechnung eine Bewertung der erzielten Ergebnisse möglich.

Ist der über Gleichung 5.44 berechnete Fehlerwert kleiner als das festgelegte Abbruchkriterium, ist die Simulation abgeschlossen. Die aktuelle Lösung der Einflussgrößen bildet das Ergebnis der Simulation.

5.7 Lösungsstrategie – *NEWTON*'sche Verfahren für Systeme

Die Wahl einer geeigneten Lösungsstrategie für das gekoppelte Funktions- und Strukturmodell ist wesentlicher Bestandteil der Modellierung.

Im betrachteten Fall ist eine Nullstellensuche von n Gleichungen gleichzeitig zu bestimmen. Da sich das Zellenmodell nicht analytisch ableiten lässt, ist es notwendig das Modell numerisch abzuleiten. Ein n -dimensionales *NEWTON*-Verfahren ist hierfür die geeignete Wahl.

Allgemein gilt, dass sich jede Änderung der Funktion f_i bezüglich der Änderung der Variablen x_j durch die partielle Ableitung

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \quad (5.45)$$

ausdrücken lässt. Die *JACOBI*-Matrix beinhaltet damit sämtliche partiellen Ableitungen einer Funktionenschar in einer $(n \times n)$ -Matrix:

$$\underline{J}(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix}. \quad (5.46)$$

Im erstellten Simulationsmodell sind in der *JACOBI*-Matrix alle Ableitungen aller Einflussgrößen für jede Zelle enthalten [75]. Die auf diese Art gewonnene Linearisierung des Gleichungssystems am Berechnungspunkt ist eine wichtige Eigenschaft, welche die rechnerische Behandlung stark vereinfacht [56]. Gebildet wird die *JACOBI*-Matrix, indem die Einflussgröße der ersten Zelle der aktuellen Iteration j über eine festgelegte Differenz ϵ verändert wird:

$$Z_i = Z_i + \epsilon. \quad (5.47)$$

Alle anderen Einflussgrößen bleiben bei ihrem ursprünglichen Wert. Mit diesem kann die erste Spalte der *JACOBI*-Matrix errechnet werden. Es wird die Auswirkung auf das Gesamtsystem ermittelt, indem das Zellenmodell der jeweiligen Zelle für alle vier Einflussgrößen durchgerechnet wird. Anschließend wird der Fehlervektor \underline{F}_k bestimmt. Die Differenz des Anfangsfehlers \underline{F}_0 und des aktuellen Fehlers \underline{F}_k mit der veränderten Einflussgröße ist der differentielle Fehler der Zelle:

$$\Delta \underline{F}_k = \underline{F}_k - \underline{F}_0. \quad (5.48)$$

Entsprechend dem *NEWTON*-Verfahren ist der Fehler ΔF_i geteilt durch die differentielle Änderung ϵ die Ableitung der Zelle:

$$J_{i,k} = \frac{F_{i,k} - F_{i,0}}{\epsilon}. \quad (5.49)$$

Bei Wiederholung dieses Vorgangs für jede einzelne Zelle wird die *JACOBI*-Matrix für den aktuellen Fall gebildet:

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Z_1} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial Z_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial Z_1} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial Z_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_m}{\partial Z_1} & \frac{\partial F_m}{\partial Z_2} & \dots & \frac{\partial F_m}{\partial Z_n} \end{bmatrix}. \quad (5.50)$$

Im konkreten Fall mit $\Delta Z_i = \epsilon$ der aktuellen Iteration j lässt sich die *JACOBI*-Matrix numerisch wie folgt bilden:

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta F_1}{\epsilon} & \frac{\Delta F_1}{\epsilon} & \dots & \frac{\Delta F_1}{\epsilon} \\ \frac{\Delta F_2}{\epsilon} & \frac{\Delta F_2}{\epsilon} & \dots & \frac{\Delta F_2}{\epsilon} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Delta F_m}{\epsilon} & \frac{\Delta F_m}{\epsilon} & \dots & \frac{\Delta F_m}{\epsilon} \end{bmatrix}. \quad (5.51)$$

Mittels der so gebildeten *JACOBI*-Matrix lässt sich die Gleichung 5.43 über Differenzenquotienten korrigieren, so dass diese null ergibt [76]. Die Gleichung wird um lineare Anteile ergänzt, die die Abweichung zur exakten Lösung bilden. Die auf diese Weise erhaltene erweiterte Hilfsfunktion lautet:

$$\underline{F}_j + \Delta \underline{F}_j = \underline{Z}_j^A + \Delta \underline{Z}_j^A - \underline{M}(\underline{S} \cdot \underline{Z}_j^A + \underline{I} \cdot \underline{Z}^I) - \underline{J}_\phi(\underline{Z}_j^A) \cdot \underline{S} \cdot \Delta \underline{Z}_j^A = 0. \quad (5.52)$$

Dabei setzt sich die Ableitung des Modells $\underline{M}(\underline{S} \cdot \underline{Z}_j^A + \underline{I} \cdot \underline{Z}^I)$ nach \underline{Z}_j^A aus der *JACOBI*-Matrix \underline{J}_ϕ und der inneren Ableitung des Modells zusammen:

$$\partial \underline{M}(\underline{S} \cdot \underline{Z}_j^A + \underline{I} \cdot \underline{Z}^I) = \underline{J}_\phi(\underline{Z}_j^A) \cdot \underline{S}. \quad (5.53)$$

Durch die Multiplikation von $\Delta \underline{Z}_j^A$ mit dieser Ableitung des Modells lässt sich der Einfluss der Änderung $\Delta \underline{Z}_j^A$ auf das Gesamtmodell \underline{M} beschreiben.

Nach Subtraktion der Gleichung 5.43 von 5.52 ergibt sich die Änderung, um die die Funktion korrigiert werden muss, damit sie gegen null strebt. Die über die *JACOBI*-Matrix im Berechnungspunkt linearisierte Hilfsfunktion lautet:

$$\Delta \underline{F}_j = \Delta \underline{Z}_j^A - \underline{J}_\phi(\underline{Z}_j^A) \cdot \underline{S} \cdot \Delta \underline{Z}_j^A. \quad (5.54)$$

Nach Ausklammern der gesuchten Größe $\Delta \underline{Z}_j^A$ ergibt sich:

$$\Delta \underline{F}_j = \left[\underline{E} - \underline{J}_\phi(\underline{Z}_j^A) \cdot \underline{S} \right] \cdot \Delta \underline{Z}_j^A. \quad (5.55)$$

Schließlich lässt sich die Gleichung nach $\Delta \underline{Z}_j^A$ umstellen:

$$\Delta \underline{Z}_j^A = \left[\underline{E} - \underline{J}_\phi(\underline{Z}_j^A) \cdot \underline{S} \right]^{-1} \cdot \Delta \underline{F}_j. \quad (5.56)$$

Die *JACOBI*-Matrix \underline{J}_ϕ beinhaltet die Ableitung jeder Funktion einer Zelle nach jeder Einflussgröße. Dieses entspricht dem totalen Differential der aufgestellten Funktion. Pro Zelle werden vier Ableitungen gebildet, am Beispiel mit drei Zellen hat die abgeleitete Funktion folgende Form:

$$\underline{J}_\phi = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{H}_{W1}}{\partial Z} \\ \frac{H_{W2}}{\partial Z} \\ \frac{H_{W3}}{\partial Z} \\ \hline \frac{H_{L1}}{\partial Z} \\ \frac{H_{L2}}{\partial Z} \\ \frac{H_{L3}}{\partial Z} \\ \hline \frac{m_{W1}}{\partial Z} \\ \frac{m_{W2}}{\partial Z} \\ \frac{m_{W3}}{\partial Z} \\ \hline \frac{x_{L1}}{\partial Z} \\ \frac{x_{L2}}{\partial Z} \\ \frac{x_{L3}}{\partial Z} \end{bmatrix} = \quad (5.57)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{H}_{W1}}{\partial H_{W1}} & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{H}_{W1}}{\partial H_{L1}} & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{H}_{W1}}{\partial m_{W1}} & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{H}_{W1}}{\partial x_{L1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \dot{H}_{W2}}{\partial H_{W2}} & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{H}_{W2}}{\partial H_{L2}} & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{H}_{W2}}{\partial m_{W2}} & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{H}_{W2}}{\partial x_{L2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial \dot{H}_{W3}}{\partial H_{W3}} & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{H}_{W3}}{\partial H_{L3}} & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{H}_{W3}}{\partial m_{W3}} & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{H}_{W3}}{\partial x_{L3}} \\ \hline \frac{\partial H_{L1}}{\partial H_{W1}} & 0 & 0 & \frac{\partial H_{L1}}{\partial H_{L1}} & 0 & 0 & \frac{\partial H_{L1}}{\partial m_{W1}} & 0 & 0 & \frac{\partial H_{L1}}{\partial x_{L1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial H_{L2}}{\partial H_{W2}} & 0 & 0 & \frac{\partial H_{L2}}{\partial H_{L2}} & 0 & 0 & \frac{\partial H_{L2}}{\partial m_{W2}} & 0 & 0 & \frac{\partial H_{L2}}{\partial x_{L2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial H_{L3}}{\partial H_{W3}} & 0 & 0 & \frac{\partial H_{L3}}{\partial H_{L3}} & 0 & 0 & \frac{\partial H_{L3}}{\partial m_{W3}} & 0 & 0 & \frac{\partial H_{L3}}{\partial x_{L3}} \\ \hline \frac{\partial m_{W1}}{\partial H_{W1}} & 0 & 0 & \frac{\partial m_{W1}}{\partial H_{L1}} & 0 & 0 & \frac{\partial m_{W1}}{\partial m_{W1}} & 0 & 0 & \frac{\partial m_{W1}}{\partial x_{L1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial m_{W2}}{\partial H_{W2}} & 0 & 0 & \frac{\partial m_{W2}}{\partial H_{L2}} & 0 & 0 & \frac{\partial m_{W2}}{\partial m_{W2}} & 0 & 0 & \frac{\partial m_{W2}}{\partial x_{L2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial m_{W3}}{\partial H_{W3}} & 0 & 0 & \frac{\partial m_{W3}}{\partial H_{L3}} & 0 & 0 & \frac{\partial m_{W3}}{\partial m_{W3}} & 0 & 0 & \frac{\partial m_{W3}}{\partial x_{L3}} \\ \hline \frac{\partial x_{W1}}{\partial H_{W1}} & 0 & 0 & \frac{\partial x_{W1}}{\partial H_{L1}} & 0 & 0 & \frac{\partial x_{W1}}{\partial m_{W1}} & 0 & 0 & \frac{\partial x_{W1}}{\partial x_{L1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial x_{L2}}{\partial H_{W2}} & 0 & 0 & \frac{\partial x_{L2}}{\partial H_{L2}} & 0 & 0 & \frac{\partial x_{L2}}{\partial m_{W2}} & 0 & 0 & \frac{\partial x_{L2}}{\partial x_{L2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial x_{L3}}{\partial H_{W3}} & 0 & 0 & \frac{\partial x_{L3}}{\partial H_{L3}} & 0 & 0 & \frac{\partial x_{L3}}{\partial m_{W3}} & 0 & 0 & \frac{\partial x_{L3}}{\partial x_{L3}} \end{bmatrix}$$

In dieser Schreibweise ist die Diagonaldominanz der Matrix bereits gut zu erkennen. Da die *JACOBI*-Matrix selbst von den Ausgangsgrößen \underline{Z}_j^A abhängig ist, verändern sich deren Koeffizienten mit jeder Iteration.

Um bei der Bestimmung von $\Delta \underline{Z}_j^A$ die numerische Berechnung der Inversen zu vermeiden, wird die Gleichung 5.56 so umgestellt, dass diese schnell mit bekannten Algorithmen für lineare Gleichungssysteme (siehe Abschnitt 5.7.2) zu lösen ist:

$$\underbrace{\left[\underline{E} - \underline{J}_\phi(\underline{Z}_j^A) \cdot \underline{S} \right]}_{\underline{J}} \cdot \underbrace{\Delta \underline{Z}_j^A}_{\underline{x}} - \underbrace{\Delta \underline{F}_j}_{\underline{b}} = \underline{0} \quad (5.58)$$

Die *JACOBI*-Matrix für das Gesamtsystem \underline{J} wird über folgenden Zusammenhang beschrieben:

$$\underline{\underline{J}} = \underline{\underline{E}} - \underline{\underline{J}}_{\phi} \cdot \underline{\underline{S}}. \quad (5.59)$$

Matrix $\underline{\underline{J}}$ stellt die am Zustandspunkt linearisierte Systemmatrix dar. In ihr sind die internen Abhängigkeiten inklusive der strukturellen Wirkungsketten der Zellen vereint.

Die neuen Einflussgrößen der nächsten Iteration $j + 1$ von Wasser und Luft lassen sich dann über die ermittelte Änderung $\Delta \underline{\underline{Z}}_j^A$ bestimmen:

$$\underline{\underline{Z}}_{j+1}^A = \underline{\underline{Z}}_j^A - \Delta \underline{\underline{Z}}_j^A. \quad (5.60)$$

Für die Iteration ist eine Methodik für die Ermittlung der Startwerte erforderlich, da durch eine geschickte Wahl der Startwerte der einzelnen Zellen Iterationen eingespart und so die Modellierung beschleunigt werden kann.

5.7.1 Ermittlung günstiger Startwerte

Für eine schnelle und stabile Berechnung ist die Wahl geeigneter Startwerte wesentlich. Vor dem ersten Durchlauf der Berechnung müssen die Anfangswerte für jede Zelle bestimmt werden. Der Massestrom $\underline{\underline{m}}^A$ wird über das bereits vorgestellte Strukturmodell bestimmt:

$$\underline{\underline{m}}_0^A = \underline{\underline{S}}_e \cdot \underline{\underline{m}}_0^A + \underline{\underline{I}}_e \cdot \underline{\underline{m}}^l. \quad (5.61)$$

Der Vektor $\underline{\underline{m}}$ beinhaltet die Werte von Wasser und Luft in folgender Form:

$$\underline{\underline{m}} = \begin{bmatrix} \dot{m}_{W,1} \\ \dot{m}_{W,2} \\ \vdots \\ \dot{m}_{W,n} \\ \dot{m}_{L,1} \\ \dot{m}_{L,2} \\ \vdots \\ \dot{m}_{L,n} \end{bmatrix}. \quad (5.62)$$

Durch Umstellen nach $\underline{\underline{m}}_0^A$ ergibt sich:

$$\underline{\underline{m}}_0^A = \left[\underline{\underline{E}} - \underline{\underline{S}}_e \right]^{-1} \cdot \underline{\underline{I}}_e \cdot \underline{\underline{m}}^l. \quad (5.63)$$

Diese Gleichung enthält in der Berechnung eine Inverse. Da die numerische Berechnung einer Inversen sehr aufwändig und für große Systeme kaum realisierbar ist, wird die Gleichung 5.63 umgeformt:

$$\boxed{\underbrace{\begin{bmatrix} \underline{E} & -\underline{S} \\ \underline{e} & \end{bmatrix}}_{\underline{M}} \cdot \underbrace{\begin{matrix} \underline{\dot{m}}_0^A \\ \underline{x} \end{matrix}}_{\underline{x}} - \underbrace{\underline{l}_e \cdot \underline{\dot{m}}^l}_{\underline{b}} = 0}. \quad (5.64)$$

Diese Modellgleichung ist ein lineares Gleichungssystem in der Form $\underline{M} \cdot \underline{x} - \underline{b} = 0$ mit der Koeffizientenmatrix \underline{M} , dem Konstantenvektor \underline{b} und dem Lösungsvektor \underline{x} . Das Gleichungssystem in dieser Form lässt sich mittels bekannter numerischer Algorithmen (beispielsweise *SOR*, siehe Abschnitt 5.7.2) deutlich schneller als über die Berechnung der Inversen lösen.

Wie bereits erörtert werden die Masseströme von Luft und Wasser für jede Zelle bestimmt. Dieses ist besonders bei der Simulation mit Struktureinbauten wichtig, da diese die Verteilung der Masseströme signifikant beeinflussen und somit nicht mehr von einer gleichmäßigen Verteilung ausgegangen werden kann.

Für die Temperaturen von Luft t_L^A und Wasser t_W^A und den Wassergehalt der Luft x_L werden die Anfangsgrößen einheitlich als Startwerte für alle Zellen gleich der Eingangsgrößen des System vorgegeben.

5.7.2 Lösen linearer Gleichungssysteme

Wie im vorherigen Abschnitt 5.7.1 aufgezeigt, ist für die Ermittlung der Startwerte die Lösung eines linearen Gleichungssystems notwendig. Zudem ergibt sich aus dem über die *JACOBI*-Matrix linearisierten Simulationsmodell (siehe Abschnitt 5.7) ebenfalls ein lineares Gleichungssystem.

Für die erstellten linearen Gleichungssysteme mit diagonaldominanten Koeffizientenmatrizen stehen verschiedene Verfahren zur Lösung zur Verfügung. Es wird zwischen direkten und indirekten Verfahren (oder iterativen Verfahren) unterschieden. Die direkten Verfahren, die immer auf der *GAUSS*-Elimination basieren, lösen das Gleichungssystem mathematisch auf, was zu der exakten Lösung führt. Ein Nachteil ist, dass diese Verfahren sehr langsam sind. Deutlich schneller sind die iterativen Verfahren, die sich näherungsweise an eine Lösung „herantasten“. Je nach Konvergenzziel können auch diese sehr genaue Lösungen erzielen.

Zudem relativiert sich der Begriff „exakte Lösung“ sofort wieder, da die Arithmetik eines Rechners eine begrenzte Genauigkeit aufweist. Somit führen indirekte Lösungen in den meisten Fällen schneller an ein möglichst genaues Ergebnis.

Im vorliegenden Fall wird, um die Rechenzeit so gering wie möglich zu halten, in den meisten Fällen auf ein iteratives Verfahren zurückgegriffen. Damit dieses angewandt werden kann, muss die allgemeine Form des Gleichungssystems $\underline{M} \cdot \underline{x} - \underline{b} = 0$ erstellt werden, siehe Abschnitt 5.3.4. Das einfachste iterative Verfahren ist das *JACOBI*-Verfahren [75]:

$$x_i^{(m+1)} = \frac{1}{a_{ii}} \cdot \left(b_i - \sum_{j \neq i} a_{ij} \cdot x_j^m \right). \quad (5.65)$$

Bei diesem werden neu berechnete Werte nicht zur Weiterberechnung benutzt. Werden die vorher berechneten Werte verwendet, ergibt sich das *GAUSS-SEIDEL*-Verfahren:

$$x_i^{(m+1)} = \frac{1}{a_{ii}} \cdot \left(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \cdot x_j^{(m+1)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot x_j^m \right). \quad (5.66)$$

Es zeichnet sich durch bessere Konvergenz aus. Eine weitere Verbesserung des *GAUSS-SEIDEL*-Verfahren ist das *SOR*-Verfahren (Successive Over Relaxation):

$$x_i^{(m+1)} = (1 - \omega_R) \cdot x_i^m + \frac{\omega_R}{a_{ii}} \cdot \left(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \cdot x_j^{(m+1)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot x_j^m \right). \quad (5.67)$$

Dieses ist deutlich schneller und ist mittels des Relaxationsfaktors ω_R sehr stabil. Der Relaxationsfaktor kann nach dem Theorem von *KAHAN* von 1958 zwischen $0 < \omega_R < 2$ liegen und beschleunigt die Iteration bei günstiger Wahl von ω_R sehr stark [77]. Werte von $\omega_R < 1$ führen zu einer **Unterrelaxation**, Werte von $\omega_R > 1$ zu **Überrelaxation**. Bei $\omega_R = 1$ ergibt sich formal das *GAUSS-SEIDEL*-Verfahren.

Theoretisch ist es möglich über den dominantesten Eigenwert der Systemmatrix ein optimales ω_R für die Lösung zu finden. Allerdings ist die Suche nach diesem bei großen Systemen zu aufwändig und benötigt sehr viel Zeit. Schneller ist eine Näherungslösung nach dem Satz von *YOUNG* [78, 79]. Von *HERRMANN* wurde eine Bestimmung des optimalen ω_R in eine schnelle und leicht anzuwendende Näherungsrechnung überführt und formal zusammengefasst [80]. Daher wird bei dem hier verwendeten *SOR*-Algorithmus nach folgender Berechnungsvorschrift vorgegangen:

1. Mit $\omega_R = 1$ den *SOR*-Algorithmus mindestens drei Mal durchlaufen.
2. Berechnung des Quotienten aus den Lösungen $\vec{x}^1, \vec{x}^2, \dots$:

$$q_m = \frac{\|\vec{x}^{(m+1)} - \vec{x}^m\|}{\|\vec{x}^m - \vec{x}^{(m-1)}\|}. \quad (5.68)$$

3. Bestimmung von $\tilde{\mu}^2$ mit dem letzten q_m :

$$\tilde{\mu}^2 = \frac{1}{q_m} \cdot \left(1 + \frac{q_m - 1}{\omega_0} \right)^2. \quad (5.69)$$

4. Berechnung des optimalen ω_R mit:

$$\omega_{opt} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \tilde{\mu}^2}}. \quad (5.70)$$

5. Fortsetzung der Berechnung des *SOR*-Algorithmus mit dem bestimmten ω_{opt}

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bestimmung von ω_{opt} aller zwölf Iterationen die besten Ergebnisse erzielt [81]. Die Lösung des Gleichungssystems konvergiert schneller und es müssen weniger Iterationen durchgeführt werden. Dieses hat signifikanten Einfluss auf die Rechenzeit. Bei steigender Systemgröße verstärkt sich die relative Einsparung der Rechenzeit zusätzlich. Somit ist der SOR-Algorithmus mit ω_{opt} sehr gut für große lineare Gleichungssysteme geeignet. Kommt es bei der Berechnung zu Instabilitäten, kann das *JACOBI*-Verfahren zur Lösung verwendet werden, welches dann allerdings langsamer rechnet.

In speziellen Fällen ist es möglich, dass für das zu lösende Gleichungssystem das „starke Zeilensummenkriterium“ [82] nicht erfüllt ist. In diesem Fall ist das Gleichungssystem nicht mehr iterativ lösbar und ein direkter Lösungsweg muss angewandt werden. Aus diesem Grund ist das *GAUSS*'sche Eliminationsverfahren als direkter alternativer Solver integriert. Dieses Verfahren ist zwar deutlich langsamer und benötigt mehr Speicherplatz als das vorgestellte SOR-Verfahren, ist jedoch stabiler.

Somit stehen mehrere Lösungsalgorithmen zur Bestimmung der Einflussgrößen zur Verfügung. In den meisten Fällen sind die iterativen Solver erfolgreich. Für den Fall, dass ein iterativer Solver nicht konvergiert, muss auf den direkten Solver zurückgegriffen und in diesem Fall eine deutlich längere Berechnungszeit in Kauf genommen werden. In der Praxis tritt dieses jedoch nur selten auf und muss von Fall zu Fall entschieden werden.

5.8 Stoffdatenanpassung

Für eine exakte Berechnung der Prozess- und Zustandsgrößen ist eine genaue Kenntnis der Stoffdaten unabdingbar. Die Verfügbarkeit von Messdaten und Bibliotheken für Wasser und Luft ist sehr gut und ausführlich dokumentiert [83]. Somit gibt es auch für die feuchte Luft sehr genaue Stoffdaten. *BACH* [84] hat sich ausführlich mit aktuellen Stoffdatenbanken befasst und die aktuellsten und genauesten zusammengetragen. Die Temperatur- und Druckänderung im Kühlturm ist vergleichsweise gering, so dass der Einfluss der Stoffdaten auf die Simulation ebenfalls als gering angesehen werden kann. Dennoch wird diese mögliche Ungenauigkeit eliminiert.

Im erstellten Simulationsmodell werden nach jeder Iteration die Wärmekapazität c_{pW} , die Verdampfungsenthalpie $\Delta h_{v,G}$ für Wasser, die Wärmekapazität für Wasserdampf c_{pD} und die Wärmekapazität für Luft c_{pL} neu bestimmt. So werden bei nur sehr kleinen Temperaturänderungen immer aktuelle Stoffdaten verwendet, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.

Des Weiteren fließen die im folgenden genannten Konstanten in die Berechnung ein. Für einige dieser Größen gibt es eine Vielzahl von Quellen, die teilweise voneinander abweichen. Basierend auf *BACH* [84] werden folgende Größen als Konstanten verwendet:

- $R_L = 0,287\ 117\ \text{kJ}/(\text{kg K})$ [85],

- $R_W = 0,461\,526 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ [86],
- $M_W = 18,015\,257 \text{ kg}/\text{kmol}$ [68, 87],
- $M_L = 28,958\,601 \text{ kg}/\text{kmol}$ [85].

5.9 Rechentechnische Umsetzung

5.9.1 Speicherplatzreduzierung mittels Listenspeicherung

Da die extensiven wie auch die intensiven Strukturmatrizen nur an definierten Stellen besetzt sind und die übrigen Positionen mit Nullen beschrieben sind, kann eine Speicherplatz einsparende Methodik (Listenspeicherung) angewandt werden [59]. Die zu reduzierende Matrix wird hierzu in zwei Matrizen aufgeteilt. In der ersten wird der Wert der Matrix und in der dazu gehörigen zweiten Matrix die Position in der Spalte (zeilenweise Reduzierung) oder die Position in der Zeile (spaltenweise Reduzierung) gespeichert. Dieses reduziert den Speicherplatzbedarf mit steigender Systemgröße signifikant.

Im aufgezeigten Beispiel mit neun Zellen (siehe Abbildung 5.1) ist die gegebene extensive Strukturmatrix für Wasser und Luft:

$$\underline{\underline{S}}_e = \left[\begin{array}{cccccccccc|cccccccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (5.71)$$

An dieser Darstellung 5.71 wird deutlich welches Einsparungspotential sich ergibt, wenn nur Werte ungleich null gespeichert werden. Es können alle mit null besetzten Positionen eingespart werden. Aus der komplett besetzten Matrix $\underline{\underline{S}}_e$ wird die Wertematrix $\underline{\underline{S}}_{e,1}$ und Positionsmatrix $\underline{\underline{S}}_{e,2}$:

$$\underline{\underline{S}}_{e,1}^{ze} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0,5 \\ 0 & 0 \\ 0,5 & 1 \\ 0,9 & 0 \\ 0,1 & 0,1 \\ 0,9 & 0 \\ 0,9 & 0 \\ 0,1 & 0,1 \\ 0,9 & 0 \\ 1 & 0,5 \\ 0 & 0 \\ 0,5 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{\underline{S}}_{e,2}^{ze} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 2 \\ 0 & 0 \\ 2 & 3 \\ 4 & 0 \\ 4 & 6 \\ 6 & 0 \\ 4 & 0 \\ 4 & 6 \\ 6 & 0 \\ 7 & 8 \\ 0 & 0 \\ 8 & 9 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.72)$$

Neben der soeben vorgestellten *zeilenweisen* Reduzierung ist es, wie bereits erwähnt, auch möglich *spaltenweise* zu reduzieren. In dem Fall bestimmt die Positionsmatrix die Position des Wertes in der jeweiligen Zeile. Im vorgestellten Beispiel würde die Strukturmatrix für eine spaltenweise Reduzierung lauten:

$$\underline{\underline{S}}_{e,1}^{sp} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0,5 & 0,5 \\ 1 & 0 \\ 0,9 & 0,1 \\ 0 & 0 \\ 0,1 & 0,9 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0,9 & 0,1 \\ 0 & 0 \\ 0,1 & 0,9 \\ 1 & 0 \\ 0,5 & 0,5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{\underline{S}}_{e,2}^{sp} = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 4 & 6 \\ 6 & 0 \\ 7 & 8 \\ 0 & 0 \\ 8 & 9 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 2 \\ 0 & 0 \\ 2 & 3 \\ 4 & 0 \\ 4 & 6 \\ 6 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.73)$$

Im erstellten Simulationsmodell werden die Werte- und Positionsmatrix gemeinsam in einem Array mit drei Dimensionen hinterlegt. Dieses Verfahren wird sowohl auf die extensive als auch auf die intensive Strukturmatrix für Wasser und Luft angewandt. Aus Gründen der numerischen Handhabung wird die extensive Strukturmatrix zeilenweise und die intensive Strukturmatrix spaltenweise reduziert.

Es ist ebenso möglich eine spaltenweise Reduzierung in eine zeilenweise Reduzierung oder umgekehrt umzuwandeln. Ein entsprechender Algorithmus ist im Modell hinterlegt. Für die Umwandlung muss zunächst das gesamte System für Wasser und Luft aufgestellt werden.

Bei genauer Betrachtung der Positionsmatrizen fällt auf, dass sich bei der Umwandlung von der zeilenweisen Reduzierung auf die spaltenweise Reduzierung die Positionsmatrizen von Wasser und Luft vertauscht haben. Es gilt allgemein für die Positionsmatrizen:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{x,2}^{ze}(L) &= \underline{S}_{x,2}^{sp}(W), \\ \underline{S}_{x,2}^{ze}(W) &= \underline{S}_{x,2}^{sp}(L). \end{aligned} \quad (5.74)$$

Allerdings ist dieses nicht für die Wertematrizen gültig:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{x,1}^{ze}(L) &\neq \underline{S}_{x,1}^{sp}(W), \\ \underline{S}_{x,1}^{ze}(W) &\neq \underline{S}_{x,1}^{sp}(L). \end{aligned} \quad (5.75)$$

Der Index x steht hier exemplarisch für den Verweis auf die extensive (Index e) oder intensive (Index i) Strukturmatrix. Für die Umwandlung der Wertematrizen $\underline{S}_{x,1}^{ze}(L)$ für Luft und $\underline{S}_{x,1}^{ze}(W)$ gelten diese Regeln nicht. Beim Durchlaufen der Matrix ist der Wert der Positionsmatrix der zeilenweisen Speicherung gleich der Position des Wertes in der Zeile der spaltenweisen Speicherung. Die Position der spaltenweisen Speicherung hingegen ist die Position, in der der entsprechende Wert gefunden wurde. Die Gleichungen 5.72 und 5.73 verdeutlichen dieses für ein Beispiel mit neun Zellen. Der Programmteil *Cooling Tower Generator* erstellt zunächst alle reduzierten Strukturmatrizen in der Form der spaltenweisen Speicherung. Anschließend wird die extensive Strukturmatrix in die zeilenweise Speicherung umgewandelt. Beide werden dann an das *Systemmodell* übergeben.

Durch die reduzierte Speicherung wird eine signifikante Speicherplatzeinsparung ermöglicht. Während bei der Speicherung der gesamten Matrix $n \times n$ Positionen gespeichert werden müssen, sind bei der Listenspeicherung nur noch $n \times 4$ Positionen notwendig (siehe Tabelle 5.1). Zwei Positionen werden für die Wertematrix und weitere zwei für die Positionsmatrix benötigt. Beide haben die Länge n . Zudem beschleunigt dieses auch die Berechnung, da anstatt der gesamten Matrix nur ein Bruchteil durchlaufen werden muss.

Tabelle 5.1: Speicherplatzeinsparung durch Listenspeicherung

| Zellen | n x n | | n x 4 | |
|-----------|-------------------|----------------|------------|----------------|
| | Positionen | Speicher in MB | Positionen | Speicher in MB |
| 10 | 100 | 0,0008 | 40 | 0,00032 |
| 100 | 10.000 | 0,08 | 400 | 0,0032 |
| 1.000 | 1.000.000 | 8 | 4.000 | 0,032 |
| 10.000 | 100.000.000 | 800 | 40.000 | 0,32 |
| 100.000 | $1 \cdot 10^{10}$ | 80.000 | 400.000 | 3,2 |
| 1.000.000 | $1 \cdot 10^{12}$ | 8.000.000 | 4.000.000 | 32 |

Die Tabelle 5.1 verdeutlicht, dass eine Berechnung von großen nicht speicherplatzreduzierten Modellen an einem Computer aus dem Consumer-Bereich derzeit gar nicht durchführbar ist. Dieses Beispiel zeigt den Speicherplatz einer einzigen Matrix. Für die Simulation ist jedoch die Speicherung mehrerer Matrizen (unter anderem intensive Strukturmatrix, extensive Strukturmatrix, *JACOBI*-Matrix) und Vektoren notwendig. Alle in der Berechnung vorkommenden Matrizen sind diagonaldominante Matrizen (zum Beispiel die *JACOBI*-Matrix). Es ist zu keinem Zeitpunkt notwendig eine gesamte Matrix mit $n \times n$ Positionen zu speichern. Speicherplatzoptimierte Methoden ermöglichen es, Modelle mit vielen Zellen zu erstellen und dabei wenig Speicherplatz zu benötigen.

Ein Nachteil ist, dass die in dem Abschnitt 5.7.2 vorgestellten, angewandten Lösungsverfahren auf die reduzierte Speicherung aufwändig angepasst werden müssen. Zudem muss in der gesamten Berechnung berücksichtigt werden, dass nicht mit Standard-Matrizen gearbeitet wird. Dieses betrifft auch Matrizenmultiplikationen, die Erstellung der *JACOBI*-Matrix und alle weiteren Aufrufe einer Matrix.

Da viele Funktionen und Operationen häufiger vorkommen, wurde eine eigene Programm-bibliothek erstellt, auf die im Modell zurückgegriffen wird. Sie ermöglicht in diesem Fall die Simulation der im Kühlturm ablaufenden Prozesse an Computern aus dem Consumer-Bereich, ohne dass auf Großrechner zurückgegriffen werden muss.

5.9.2 Netzstudie – Ermittlung der optimalen Zellenanzahl

Um zu ermitteln wie viele Zellen für eine genaue Betrachtung notwendig sind, wurde eine Netzstudie durchgeführt. In dieser wird bei konstanten Randbedingungen die Zellenanzahl schrittweise erhöht. In der Abbildung 5.5 sind die Ausgangstemperatur von Luft und Wasser eines Beispiels in Abhängigkeit der Zellenanzahl dargestellt.

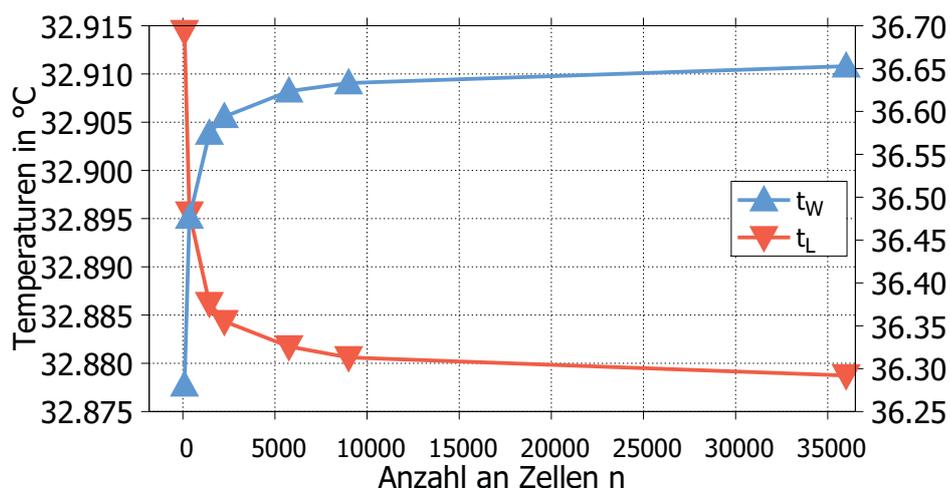


Abbildung 5.5: Netzstudie - Einfluss der Zellenanzahl

Es zeigt sich, dass beide Temperaturen zu einem Niveau streben. Eine weitere Verfeinerung des Netzes ist darüber hinaus unnötig. Deutlich wird, dass schon mit einer Modellierung des Kühlturms mit wenigen Zellen (< 2.000) der Bereich der Messgenauigkeit ($\pm 0,1$ K) erreicht wird. Daher wird festgelegt, dass ab einer Anzahl von 2.000 Zellen die Berechnung hinreichend genaue Ergebnisse liefert.

Maßgeblich für die notwendige Zellenanzahl ist ebenso die Möglichkeit der Darstellbarkeit der Einbaustrukturen. Mit nur wenigen Zellen lässt sich die komplexe Struktur nur schwer darstellen. Bezogen auf den Anwendungsfall muss ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit gefunden werden.

5.9.3 Sensitivitätsanalyse der Iterationsgrenzen

Da in der Berechnung eine Vielzahl an Iterationen durchgeführt werden, steckt in der Wahl der Abbruchkriterien ebenfalls Optimierungspotential. Im vorhandenen Simulationsmodell weisen folgende Prozeduren Abbruchkriterien auf:

- Gesamtmodell: $\epsilon = 1 \cdot 10^{-6}$
- *JACOBI*-Matrix: $\epsilon_{JACOBI} = 1 \cdot 10^{-7}$
- Zellenmodell: $\epsilon_{Zelle} = 1 \cdot 10^{-13}$
- Solver: $\epsilon_{Solver} = 1 \cdot 10^{-12}$

Für die folgende Abbildung 5.6 wurden alle einzelnen Konvergenzziele getrennt voneinander variiert. Es wurde eine auf Erfahrung basierende Konfiguration von Konvergenzparametern (siehe oben) gewählt, welcher jeder für sich jeweils um 10er-Potenzen nach unten und oben vergrößert und verkleinert wurde. Auf diese Weise ist es möglich den Einfluss jedes einzelnen Parameters herauszufinden.

Bereiche in denen keine Werte eingetragen sind, stehen dafür, dass das Modell bei dieser Konfiguration nicht mehr stabil war oder keine sinnvollen Ergebnisse mehr liefern konnte.

Generell gilt, dass bei einem kleineren Abbruchkriterium auch die Rechenzeit steigt, analog dazu sinkt die Rechenzeit bei größerem Abbruchkriterium. Das spiegelt die Erwartungen und Erfahrungen aus anderen Simulationen wider. Zu beachten ist, dass die Genauigkeit der Ergebnisse stets hoch ist. Sobald keine physikalische Relevanz erkennbar ist, gilt die getroffene Konfiguration als nicht mehr anwendbar.

Aus der Abbildung 5.6 geht hervor, dass die Änderung des Parameters für die *JACOBI*-Matrix nahezu keinen Einfluss hat. Hingegen steigt die Rechenzeit mit dem Konvergenzziel des Gesamtmodells. Ebenso hat das Abbruchkriterium des Zellenmodells Einfluss auf die Rechenzeit. Bei geringerem Parameter sinkt die Rechenzeit τ , obwohl nur sehr geringe Änderungen im Ergebnis deutlich werden. So zeigt sich, dass es von Vorteil ist dem Zellenmodell ein niedrigeres Konvergenzziel zuzuordnen, um das Gesamtsystem zu beschleunigen.

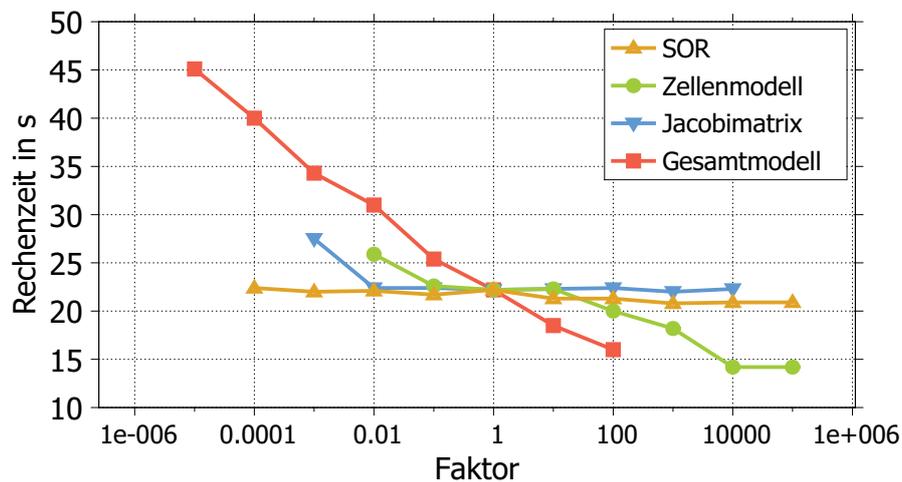


Abbildung 5.6: Einfluss der unterschiedlichen Konvergenzkriterien auf die Rechenzeit

Abbildung 5.6 zeigt ebenso, dass das Gesamtsystem problemlos bis zu einem Wert von $1 \cdot 10^{-10}$ konvergiert. Dennoch ist es fraglich, in welchem Rahmen eine Steigerung der Genauigkeit noch sinnvoll ist.

Es wurden folgende Parameter für die Simulation festgelegt, welche einen optimalen Kompromiss aus Rechenzeit und zufriedenstellender Genauigkeit bieten:

- Gesamtmodell: $\epsilon = 1 \cdot 10^{-5}$
- *JACOBI*-Matrix: $\epsilon_{Jacobi} = 1 \cdot 10^{-7}$
- Zellenmodell: $\epsilon_{Zelle} = 1 \cdot 10^{-9}$
- Solver: $\epsilon_{Solver} = 1 \cdot 10^{-9}$

Mit der Kombination der Parameter ist eine signifikante Rechenzeiteinsparung zu erreichen. Die Rechenzeit τ im vorliegenden Beispiel konnte von anfänglich $\tau = 22,2$ s auf $\tau = 9,8$ s mehr als halbiert werden. Dieses konnte anhand weiterer gerechneter Beispiele bestätigt werden. Es ist zu beachten, dass der Einfluss bei steigender Anzahl an Zellen immer mehr an Bedeutung gewinnt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die systematische Wahl von Iterationsgrenzen erheblichen Einfluss auf die Rechenzeit τ des Modells hat.

5.10 Systembeispiel

Im Folgenden wird anhand des in Abbildung 5.1 dargestellten Modells die Berechnungsgrundlage des Systemmodells erläutert. Die Strukturerstellung und das Vorgehen innerhalb des Berechnungsmodells wird hier verdeutlicht.

Die fünfte Zelle stellt in diesem Beispiel eine Zelle mit Hindernis, zum Beispiel einen Struktureinbau, im Kühlturm dar. Zur übersichtlicheren Darstellung wird hier angenommen, dass die Zelle nicht durchflossen werden kann. Sie stellt somit einen Einbau mit der Dicke der Zelle selbst dar. Es sind grundsätzlich aber auch Einbauten mit der Dicke null möglich. Durch diese Zelle ist somit kein Masse- oder Wärmetransport möglich. Der Massestrom teilt sich gleichmäßig auf die daneben liegenden Zellen auf (2. Regel). Der Verteilungskoeffizient wird auf $x_{vk} = 0,1$ festgelegt. Das bedeutet, dass beispielsweise 10 % des Wassers direkt in die nächste nebenliegende Zelle fließen, der übrige Anteil in die direkt darunter liegende Zelle.

Da sich die Temperatur und die Masse bei der Aufteilung auf die nachfolgenden Zellen nicht gleich verteilen, ist eine getrennte Betrachtung der Strukturen notwendig. Für die Masse (extensiv) und für die Temperatur (intensiv) müssen getrennte Struktur-, Input- und Outputmatrizen erstellt werden.

Es wird zunächst nur die wasserseitige Durchströmung des Modells betrachtet. Bei dem gegebenen Beispiel werden die strukturbeschreibenden Matrizen der extensiven Zustandsgrößen wie folgt durch das extensive Strukturmodell gebildet:

$$\underline{S}_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \underline{I}_e = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.76)$$

$$\underline{O}_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Die Summe jeder **Spalte** inklusive Output- und Inputmatrix ist immer eins. Eine Ausnahme bildet die Zelle 5, da in dieser ein Einbau vorliegt. Die Summe dieser Spalte ist null.

Für alle intensiven Zustandsgrößen gilt hingegen ein intensives Strukturmodell:

$$\begin{array}{l}
 \underline{\underline{S}}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 \underline{\underline{O}}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} .
 \end{array}
 \quad \underline{\underline{I}}_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.77)$$

Hier ist die Summe jeder **Zeile** inklusive Output- und Inputmatrix gleich eins. Eine Ausnahme bildet wieder die fünfte Zeile des Einbaus. Die Summe dieser Zeile ist gleich null. Durch die Bedingung, dass die jeweilige Spalte (extensives Strukturmodell) oder Zeile (intensives Strukturmodell) immer gleich eins sein muss, lässt sich das erstellte Modell leicht prüfen und eventuelle Fehler werden schnell gefunden. Zu beachten ist jedoch, dass bei einem vorliegenden Einbauelement die Summe immer gleich null ist, wie im aktuellen Beispiel gezeigt wurde.

Das aufgezeigte Beispiel macht deutlich wie die Geometrie des Kühlturms beschrieben wird. Es ist dabei nicht nur der Versuchskühlturm darstellbar. Theoretisch ist fast jede erdenkliche Geometrie durch flexible Verschaltung der Zellen darstellbar. So ist es möglich weitere Geometrien beispielsweise von Naturzugkühltürmen oder Hybridkühltürmen nachzubilden. Die Geometrieerstellung durch das beliebige Verschalten einzelner Modellzellen zu einem Gesamtsystem beliebiger Geometrie macht das Simulationsmodell universell einsetzbar.

Die Anzahl der Zellen ist dabei für die Genauigkeit der Darstellung entscheidend. Bei zu wenigen Zellen ist eine hinreichend genaue Darstellung nicht mehr möglich. Hier gilt es einen Kompromiss zwischen Rechenzeit, die mit größer werdender Zellenanzahl steigt, und Genauigkeit zu finden. Aus diesem Grund wurden Netzstudien (siehe Abschnitt 5.9.2) durchgeführt um eine optimale Anzahl an Zellen zu bestimmen. Es wird in dem Abschnitt 5.9.1 diskutiert, wie eine speicheroptimierte Behandlung dieser Matrizen möglich ist.

Vor der Generierung der Strukturmatrizen werden die Informationen über den Einbau dargestellt und implementiert. Im Programmteil *Cooling Tower Generator* werden die erstellten strukturbeschreibenden Matrizen der entsprechenden Geometrie inklusive Einbauten in reduzierter Form aufgestellt und in Form von ASCII-Dateien gespeichert. Auf diese Weise haben alle nachfolgenden Programmteile Zugriff auf diese Dateien. Es wird dabei für jede Wertematrix und die dazu gehörige Positionsmatrix eine einzelne Datei erstellt.

Es wird auf die wichtigsten Größen zu Vergleichszwecken eingegangen. Die reduzierte *JACOBI*-Matrix nach der letzten Iteration lautet nach der Gleichung 5.51:

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| 1 | -0,1 | 28,76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | -0,05 | -0,05 | 13,25 | 13,25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | -0,1 | 28,76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0,79 | -0,39 | 1 | -0,35 | -0,17 | -30 | -15 | 60,26 | 30,13 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0,39 | -0,79 | 1 | -0,17 | -0,35 | -15 | -30 | 30,13 | 60,26 | 0 |
| -0,7 | 1 | -6,73 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0,23 | -0,23 | 1 | -3,19 | -3,19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0,7 | 1 | -6,73 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | -0,65 | -28,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | -0,2 | -0,2 | -13,2 | -13,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | -0,65 | -28,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0,21 | -0,11 | 1 | -0,65 | -0,33 | 30,01 | 15,01 | -60,3 | -30,1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0,11 | -0,21 | 1 | -0,33 | -0,65 | 15,01 | 30,01 | -30,1 | -60,3 | 0 |
| -0,05 | 1 | 6,733 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0,02 | -0,02 | 1 | 3,192 | 3,192 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0,05 | 1 | 6,733 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2E-06 | 1 | -0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8E-07 | 8E-07 | 1 | -0 | -0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2E-06 | 1 | -0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5E-05 | 2E-05 | 2E-05 | 1E-05 | -1,01 | -0,5 | 1 | -0,02 | -0,01 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2E-05 | 5E-05 | 1E-05 | 2E-05 | -0,5 | -1,01 | 1 | -0,01 | -0,02 | 0 |
| 1E-05 | -0,75 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5E-06 | 5E-06 | -0,25 | -0,25 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1E-05 | -0,75 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0 | 1 | -0,96 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0 | -0 | 1 | -0,47 | -0,47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0 | 1 | -0,96 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0 | -0 | -0 | -0 | 0,046 | 0,023 | 1 | -0,55 | -0,27 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0 | -0 | -0 | -0 | 0,023 | 0,046 | 1 | -0,27 | -0,55 | 0 |
| -0 | 0,013 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0 | -0 | 0,006 | 0,006 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0 | 0,013 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 13 | 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 13 | 15 | 31 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 15 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2 | 4 | 16 | 17 | 19 | 20 | 34 | 35 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 3 | 6 | 17 | 18 | 20 | 21 | 35 | 36 | 0 |
| 4 | 7 | 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 6 | 8 | 22 | 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 9 | 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 13 | 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 13 | 15 | 31 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 15 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2 | 13 | 16 | 17 | 19 | 20 | 34 | 35 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 3 | 15 | 17 | 18 | 20 | 21 | 35 | 36 | 0 |
| 4 | 16 | 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 6 | 17 | 22 | 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 18 | 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 19 | 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 15 | 20 | 31 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 21 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2 | 16 | 17 | 19 | 20 | 22 | 34 | 35 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 3 | 17 | 18 | 20 | 21 | 24 | 35 | 36 | 0 |
| 4 | 22 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 6 | 22 | 24 | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 24 | 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 28 | 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 15 | 29 | 31 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 30 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2 | 16 | 17 | 19 | 20 | 31 | 34 | 35 | 0 |
| 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 3 | 17 | 18 | 20 | 21 | 33 | 35 | 36 | 0 |
| 4 | 22 | 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 6 | 22 | 24 | 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 24 | 36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Die nicht reduzierte Darstellung ermöglicht nur einen unübersichtlichen Blick auf die Matrix. Bei genauer Betrachtung dieser sind jedoch eine Vielzahl von Informationen erkennbar³. Eine kleine Änderung der jeweiligen Zelle im Modell hat direkten Einfluss auf die Zelle selbst. Dieses wird durch Werte nahe eins für alle Einflussgrößen auf der Hauptdiagonalen deutlich.

Weiterhin ist zu erkennen, auf welche Zellen direkt Einfluss genommen wird, wenn eine bestimmte Zelle eine Änderung erfährt. Beispielsweise ist Zelle 1 mit Zelle 4 gekoppelt, da diese direkt übereinander liegen. Somit haben Änderungen der einen Zelle direkten Einfluss auf die jeweils andere. So hat eine Änderung von Zelle 1 auch eine Änderung von Zelle 4 bei allen vier Einflussgrößen zur Folge. Bei Betrachtung des Beispiels in Abbildung 5.1 ist der Einfluss der Zellen untereinander ebenfalls erkennbar.

Zelle 2 hat beispielsweise Einfluss auf Zelle 4 und 6 von Luft und Wasser (erneut sehr kleine Werte bei Wasser), da es sich aufgrund des Einbaus in Zelle 5 auf die Zellen 4 und 6 aufteilt.

³Bei dieser Darstellung sind einige Werte so klein, dass sie nicht mehr dargestellt werden können. Dieses wird durch den Ausdruck „0“ deutlich.

Die *JACOBI*-Matrix kann nach den aufgestellten Regeln bei diesem zweidimensionalen Beispiel maximal neun Spalten besetzen. Dieses entspricht zwei beeinflussten Zellen mit je vier Einflussgrößen und die veränderte Einflussgrößen der Zelle selbst.

Hier wird deutlich, dass eine Listenspeicherung sinnvoll ist, da der größte Teil der Matrix mit Nullen beschrieben ist und nur auf den erwähnten maximal neun Spalten Werte stehen. Ist die *JACOBI*-Matrix im Laufe einer Berechnung auf mehr als neun Spalten besetzt, ist das ein Hinweis auf einen Fehler in der Modellerstellung.

Nach einer Zeit von $\tau = 0,1\text{s}$ auf einem gewöhnlichen Consumer-Computer und weniger als fünf Iterationen wird das Abbruchkriterium von $\epsilon = 1 \cdot 10^{-5}$ unterschritten und die Simulation wird beendet. Der maximale Fehler der Simulation beträgt $F_{MAX} = 9,27 \cdot 10^{-6}$, der Fehler über die kleinsten Fehlerquadrate beträgt $F_{RMS} = 3,6 \cdot 10^{-6}$. Aufgrund der geringen Zellenanzahl in diesem Minimalbeispiel konvergiert das Modell sehr schnell. Die Konvergenzkurve fällt rapide und stetig ab, bis das vorgegebene Konvergenzziel erreicht ist.

Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt:

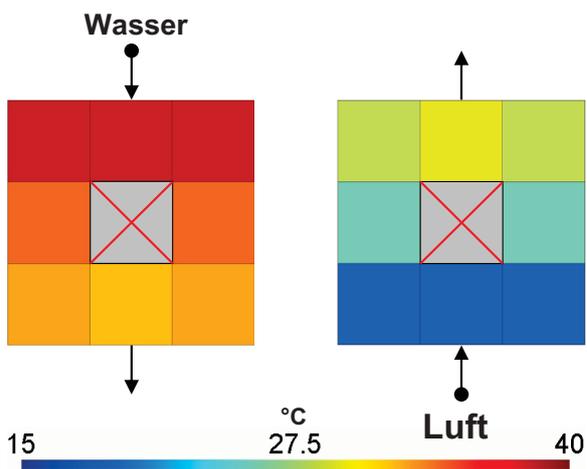


Abbildung 5.7: Minimalbeispiel: Temperaturen t

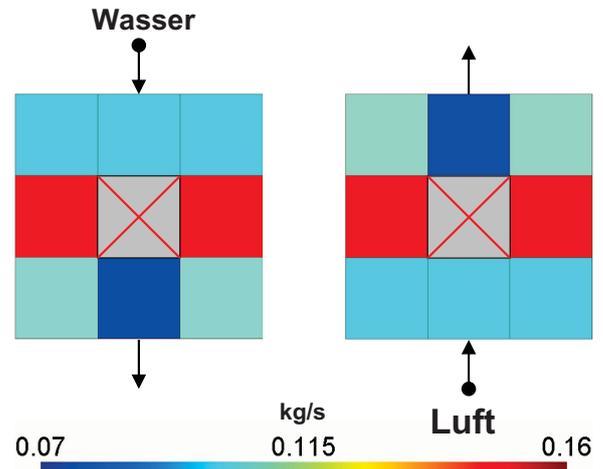
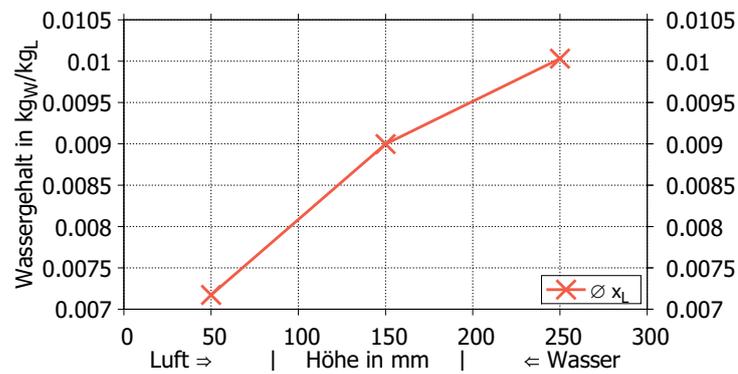
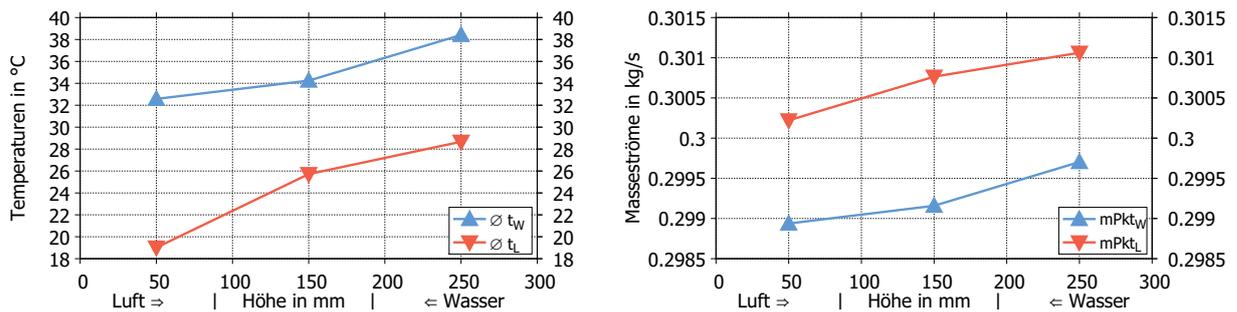


Abbildung 5.8: Minimalbeispiel: Masseströme \dot{m}

Wie erwartet nimmt die Temperatur des Wasser ab, parallel dazu erhöht sich die Temperatur der Luft (siehe Abbildung 5.7). Die Masseströme teilen sich am Einbauelement auf die beiden neben liegenden Zellen auf. Der Massestrom von Wasser nimmt aufgrund der Verdunstung leicht ab, der Massestrom der Luft erhöht sich um den gleichen Betrag (siehe Abbildung 5.8). Dabei steigt erwartungsgemäß der Wassergehalt x_L der Luft. Der Verlauf der Befeuchtung der Luft ist über die Höhe des Kühlturms in der Abbildung 5.9 aufgetragen.

Die dargestellten Werte sind Mittelwerte aller Zellen mit konzentrierten Parametern der entsprechenden Höhe des Kühlturms. Das Wasser strömt somit im Diagramm von rechts nach links, die Luft von links nach rechts. In den Abbildungen 5.10 und 5.11 sind auf die Art die Temperaturen t und Masseströme \dot{m} abgebildet.

Abbildung 5.9: Verlauf des Wassergehalts x_L der Luft für das MinimalbeispielAbbildung 5.10: Verlauf der Temperatur t für das Minimalbeispiel | Abbildung 5.11: Verlauf des Massestroms \dot{m} für das Minimalbeispiel

Alle Ergebnisse zeigen physikalisch plausible Werte und die sehr kleinen Bilanzfehler bestätigen die Funktionalität des Modells. Die Massebilanz weist eine Differenz von unter $f = 1 \cdot 10^{-10}$ auf, die Energiebilanz von $f = 1 \cdot 10^{-5}$. Für den gegebenen Anwendungsbereich sind diese erzielten Werte hinreichend genau.

Die generelle Funktionalität des Modells wurde mit dem Systembeispiel nachgewiesen. Das Modell liefert plausible Ergebnisse, jedoch haben diese noch keinen direkten Bezug zur Realität. Es ist möglich die ablaufenden Prozesse der Verdunstungskühlung qualitativ abzubilden. Allerdings ist das Niveau durch die zu vielen unbekanntenen Größen im System noch unbekannt. Um eine genaue Darstellung des Gesamtsystems zu erhalten, ist eine Kalibrierung des jeweiligen Betriebszustandes notwendig. Im folgenden Abschnitt 5.11.1 wird darauf eingegangen.

5.11 Ermittlung unbekannter Modellparameter

5.11.1 Relevante Modellparameter

Einige zu wählende Größen in der Simulation sind unbekannt. Um ein Simulationsmodell zu erhalten, das nicht nur die kausalen Wirkstrukturen der Transportvorgänge abbildet sondern ebenfalls das gleiche Verhalten zeigt wie das Realsystem, müssen diese Modellparameter

angepasst werden. Dieses geschieht mittels am Realsystem gewonnener Messdaten. Die in Versuchsreihen gewonnenen Messdaten (siehe Kapitel 3) ermöglichen eine Kalibrierung von Simulationsmodellen des gekoppelten Wärme- und Stofftransports mittels Anpassungsrechnungen. Da die physikalischen Vorgänge qualitativ abgebildet werden, muss nur die Intensität der Wirkungen im Modell angepasst werden.

Die veränderbaren Größen im Systemmodell sind:

- die Übertragungsfläche zwischen Luft und Wasser pro Zelle A ,
- der Flächenvergrößerungsfaktor durch den Einbau A_f ,
- die Verteilungskoeffizienten für Luft und Wasser x_{vk} ,
- der Wärmeübergangskoeffizient α und
- der Stoffübergangskoeffizient β .

Diese Parameter sind für die Modellierung theoretisch unbekannt. Somit kann hier eine n -dimensionale Optimierung angewandt werden. Es ist jedoch möglich einen oder mehrere dieser Parameter einen konstanten Wert oder einer Funktion zuzuordnen und nur die restlichen Parameter anzupassen. Es hat den Vorteil, dass sich die Kalibrierung mit sinkender Anzahl an Parametern stabiler und vor allem schneller durchführen lässt. Im Folgenden werden daher einige Größen näherungsweise definiert.

Übertragungsfläche A

Die Übertragungsfläche A ist mit geringem Aufwand abschätzbar. Grundlage ist die *YOUNG-LAPLACE*-Gleichung mit einem maximalen Tropfendurchmesser von circa $d = 5$ mm [88]. Gedanklich wird eine Zelle vollständig mit nicht versetzt angeordneten, kugelförmigen Tropfen gefüllt, dabei ergibt sich eine theoretisch maximal mögliche Übertragungsfläche pro Zelle. Die Übertragungsfläche setzt sich aus der Summe aller Tropfen in der Zelle zusammen. Aus diesem Zusammenhang lässt sich eine Funktion $A = f(k)$ bestimmen. Die Übertragungsfläche A in Abhängigkeit der Kantenlänge k einer Zelle wird über folgende ermittelte Funktion bestimmt:

$$\frac{A}{m^2} = 6 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{k^3}{mm}. \quad (5.78)$$

Somit ist ein direkter Zusammenhang von Zellengröße und Übertragungsfläche gefunden. Ein möglichst exakter Wert ist nicht notwendig. Essenziell ist die Minimierung der zu optimierenden Parameter. Diesem Sachverhalt ist hinzuzufügen, dass in der Praxis 60 % der in der Gleichung 5.78 ermittelten Übertragungsfläche pro Zelle genutzt werden, da nicht davon auszugehen ist, dass jede Zelle immer komplett mit Tropfen ausgefüllt ist.

Flächenvergrößerungsfaktor A_f

Der Flächenvergrößerungsfaktor A_f ist ebenfalls abschätzbar. Wie bereits für die Übertragungsfläche erörtert, geht *HAUENSCHILD* für den Tropfen im Kühlturm von einer Kugelform und von einem mittleren Tropfendurchmesser von $d = 3 - 4$ mm aus [11]. Die Gleichung nach *YOUNG-LAPLACE* beschreibt einen maximalen Tropfendurchmesser von circa $d = 5$ mm [88]. Fällt dieser auf eine ebene Oberfläche, bildet sich ein Film mit einem definierten Durchmesser. In Versuchen wurde deutlich, dass dieser von der Fallhöhe nahezu unabhängig ist. Im Mittel ergibt sich ein Durchmesser des Films von $d = 20$ mm, was bei einem mittleren Tropfendurchmesser von $d = 4$ mm zu einer Filmdicke von $\delta = 0,1$ mm führt. Dieses lässt sich durch Werte aus der Literatur bestätigen [89]. Aus dem Verhältnis der Oberfläche von Tropfen und Film lässt sich dann ein angenäherter Flächenvergrößerungsfaktor abhängig vom Tropfendurchmesser im Bereich von $A_f = 6 - 9$ bestimmen.

Simulationen eines kalibrierten Zustandes vom Regenraum mit der Geometrie des Referenzeinbaus ergaben, dass für die Übertragungszahl mit $A_f = 8$ sehr gute Übereinstimmungen der gemessenen Zustände vom Referenzeinbau und der Simulation erzielt werden können. Aus diesem Grund wird der Flächenvergrößerungsfaktor, zusätzlich gestützt durch eine Messung, auf $A_f = 8$ festgelegt.

Verteilungskoeffizienten x_{vk}

Die Verteilung der Strömung von Luft und Wasser lässt sich über ein Verteilungsmodell angeben [59]. Dieses Modell basiert auf einer dimensionslosen Kennzahl, dem Verteilungskoeffizienten x_{vk} . Er gibt an wie sich der aus einer Zelle austretende Massestrom auf die nachfolgenden Zellen aufteilt.

Simulationen haben gezeigt, dass der auf den Gesamtmassestrom der Zelle normierte Wert der Verteilungskoeffizienten x_{vk} nur einen geringen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat. Deshalb wird auf eine genaue Bestimmung verzichtet und für Luft und Wasser der konstanter Wert von $x_{vk} = 0,25$ festgelegt.

Wärmeübergangskoeffizient α und Stoffübergangskoeffizient β

Die Wärme- und Stofftransportgrößen sind die komplett unbekanntes Modellparameter der Modellierungsaufgabe. Die Transportgrößen, der Wärmeübergangskoeffizient α und der Stoffübergangskoeffizient β , lassen sich nicht genau abschätzen. Dieses sind somit die Größen mit denen das Modell kalibriert wird.

Die Kalibrierung entspricht somit einer zweidimensionalen Optimierung. Von einer Funktion, die durch die Abweichung der modellierten Werte zu den real gemessenen Werten gebildet wird, wird das absolute Minimum gesucht. Es können die Abweichungen zur Wasser-Austritts-Temperatur t_W^A und zusätzlich zur Luft-Austritts-Temperatur t_L^A (sofern

zuverlässige Messungen vorliegen) zum Vergleich genommen werden. Ein weiterer Vergleich der schwer zu messenden Luft-Austritts-Temperatur bieten die Messdatenauswertemethoden nach *MEHLIG* und *POPPE*, wie in dem Abschnitt 2.3 diskutiert. In folgender Form wird die Funktion mit Hilfe der kleinsten Fehlerquadrate gebildet:

$$f_{RMS} = \left(\sqrt{(t_{W,mess}^A - t_{W,simu}^A)^2 \cdot \eta_W + (t_{L,mess}^A - t_{L,simu}^A)^2 \cdot \eta_L} \right)^n . \quad (5.79)$$

Mittels η_W und η_L ist es möglich den Schwerpunkt der Fehlerbetrachtung zu gewichten. In der Regel wird der Wert des Wassers höher gewichtet, da die Messung der Wasser-Austritts-Temperatur t_W^A sehr zuverlässig erfolgt ($\eta_W = 0,8$, $\eta_L = 0,2$). Mit dem Exponenten n ist es möglich die Steigung und somit den Einfluss der Änderungen zu erhöhen, falls der Verlauf der Kurven zu flach sein sollte. Dieses ist aber in den meisten Fällen nicht notwendig ($n = 1$) und nur bedingt zu empfehlen, da die erzielten Ergebnisse dadurch ungenauer werden.

Für ein Beispiel ist in der Abbildung 5.12 der Fehler in Abhängigkeit vom Wärmeübergangskoeffizient α und vom Stoffübergangskoeffizient β aufgetragen.

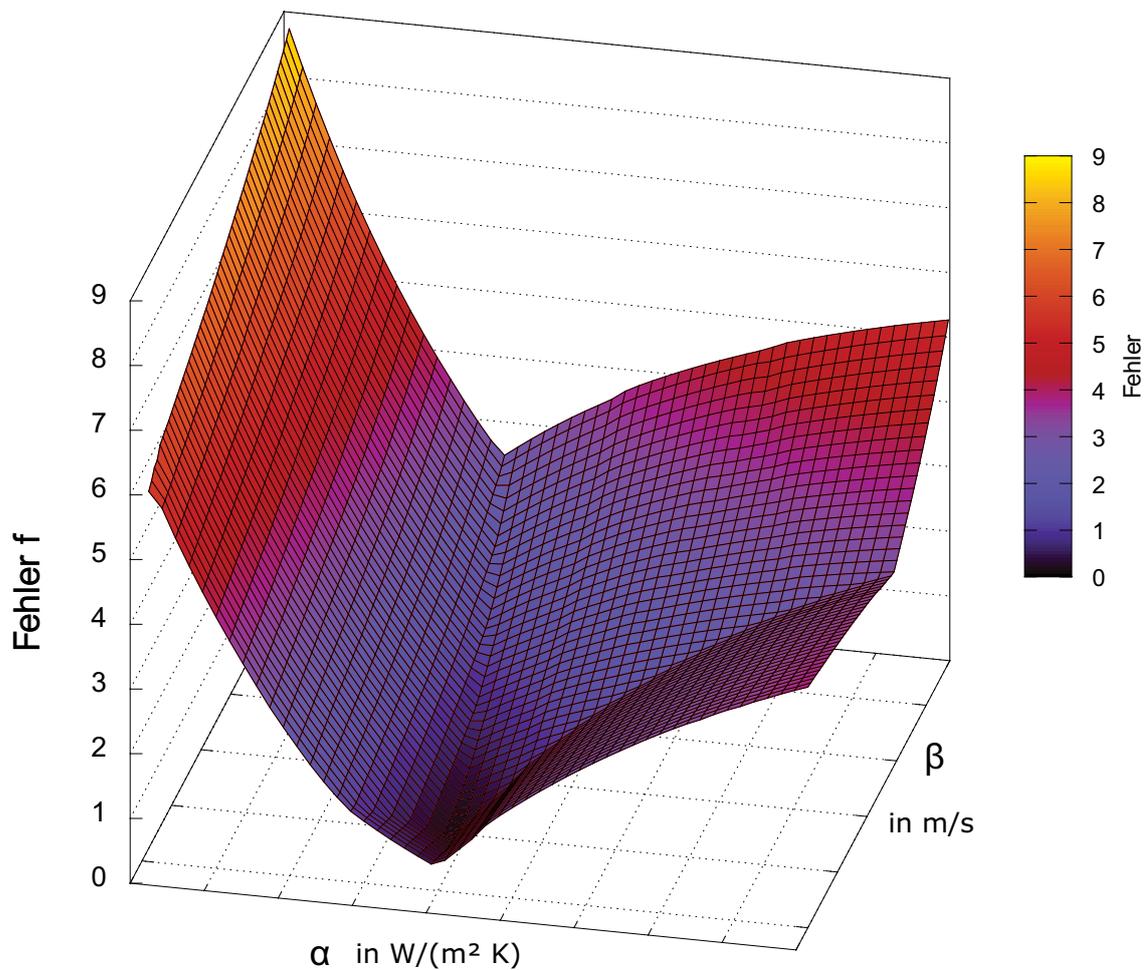


Abbildung 5.12: Fehler in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten α und des Stoffübergangskoeffizienten β

Es ist zu erkennen, dass die aufgespannte Fläche ein lokales Minimum hat. Des Weiteren hat der Wärmeübergangskoeffizient α größeren Einfluss als der Stoffübergangskoeffizient β . Durch die Einteilung der Koeffizienten in 100 mal 100 Schritte (10 000 Berechnungen) konnte ein minimaler Fehler von $f = 0,0133$ erreicht werden.

5.11.2 Beispiel einer Validierung mittels *Downhill-Simplex-Verfahren* nach *NELDER-MEAD*

Das *Downhill-Simplex-Verfahren* nach *NELDER* und *MEAD* ist für die Parameterbestimmung von nicht linearen Modellen gut geeignet [90]. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es ohne Ableitungen der Funktion nach den Parametern auskommt [91]. Die mehrdimensionale Optimierung über Ableitungen ist oft zielführend, jedoch bei nur geringen Steigungen nicht stabil. Im Anwendungsfall hat sich eine Kalibrierung über Ableitungen als nicht effizient erwiesen. Das *Downhill-Simplex-Verfahren* hingegen ist sehr stabil, leicht zu implementieren

und findet bei nicht optimal gewählten Startparametern ein Minimum. Ein Nachteil ist, dass es im Vergleich relativ langsam konvergiert [92].

Grundlage des Verfahrens ist eine geometrische Suche im Parameterraum, wie er schon in der Abbildung 5.12 dargestellt ist. Es werden die $m + 1$ -Eckpunkte eines Simplex bestimmt und der Funktionswert, in diesem Fall Fehler, an dieser Stelle errechnet. Durch Spiegelung, Streckung und Kontraktion wird immer der schlechteste Wert minimiert. So wird der Fehler immer kleiner und der Simplex schließt sich. Auf diese Weise können die Parameter für das Minimum in wenigen Schritten bestimmt werden [58]. Eine ausführliche Beschreibung und Hinweise zur Anwendung sind im VDI-Wärmeatlas [18] zu finden. In der Abbildung 5.13 ist gut zu erkennen wie sich das Verfahren beim vorliegenden Beispiel entlang des aufgespannten Parameterraums in circa 20 Schritten zum Minimum bewegt. Der Fehler ist nur noch $f = 0,00868$.

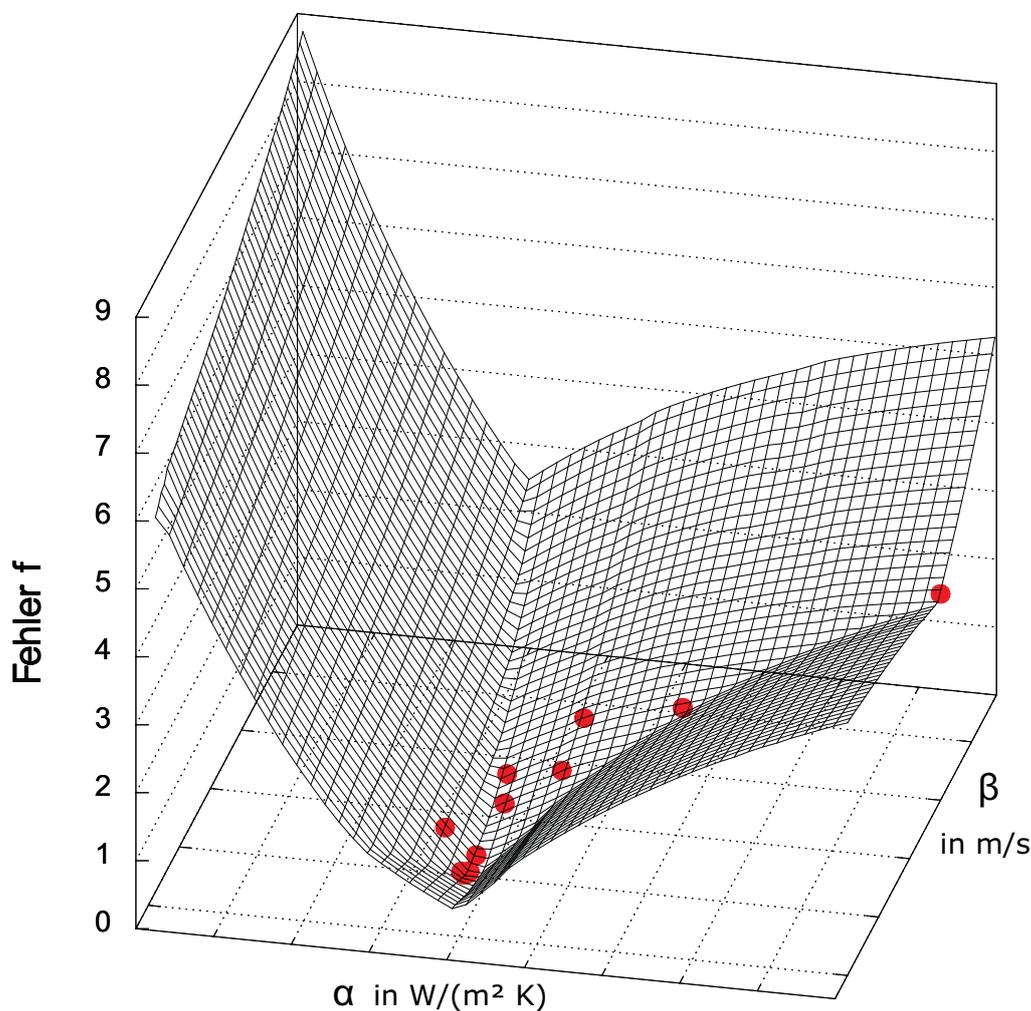


Abbildung 5.13: Kalibrierung des Wärmeübergangskoeffizienten α und des Stoffübergangskoeffizienten β mit dem *Downhill-Simplex-Verfahren*

Die Gefahr, dass ein lokales Minimum, also nicht das absolute Minimum gefunden wird, besteht aufgrund der Parameterverläufe nicht, da es wie in der Abbildung 5.12 zu erkennen nur ein absolutes Minimum gibt. In dem Abschnitt 6.1 werden die errechneten Ergebnisse weiter diskutiert.

Das *Downhill-Simplex-Verfahren* konvergiert schnell in wenigen Schritten für das betreffende Modell. Auf diese Weise können anhand der Messdaten die unbekanntes Modellparameter bestimmt und so das Modell kalibriert werden.

Dabei ist zu beachten, dass nach jeder Änderung der Geometrieingaben (Zellenanzahl n , Übertragungsfläche A , Flächenvergrößerungsfaktor A_f oder Verteilungskoeffizienten x_{vk}) die Modellparameter neu kalibriert werden müssen.

6 Validierung des Modells *Virtueller Kühlturm*

Das erstellte Simulationsmodell *Virtueller Kühlturm* wird in diesem Kapitel auf Validität, Konvergenz und Rechenzeit geprüft. Das in Kapitel 5 vorgestellte allgemeine Modell des *Virtuellen Kühlturms* wird hierzu auf den in Kapitel 3 vorgestellten Versuchskühlturms der Technischen Universität Dresden übertragen. Die Validierung erfolgt für zwei Fälle:

1. Versuchskühlturm ohne Struktureinbauten (Regenraum) in Kapitel 6.1
2. Versuchskühlturm mit Struktureinbauten in Einbauzone in Kapitel 6.2

In der Vergangenheit wurden umfangreiche Messkampagnen für beide Zustände durchgeführt, so dass Messdaten des Realsystems für die Validierung des mathematischen Modells zur Verfügung stehen.

Die Geometrie des Versuchskühlturms wird in ein zweidimensionales Zellenmodell überführt. Der Simulationsraum stellt so einen vertikalen Querschnitt des realen Kühlturms dar. Bei gleichen Randbedingungen von Simulation und Messung ist ein direkter Vergleich der Ausgangsgrößen möglich.

6.1 Validierung über den Kühlturm ohne Struktureinbau

Im ersten Schritt wird das Verhalten des Kühlturms ohne Einbauten – der Regenraum – Gegenstand der Untersuchungen sein. Es wurde ein zweidimensionales Modell des Versuchskühlturms erstellt.

Üblicherweise wird die Übertragungszahl K über die *Luftzahl* λ aufgetragen. Sie gibt das Verhältnis der Massenströme von Luft und Wasser in folgender Form wieder [34]:

$$\lambda = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_W}. \quad (6.1)$$

Als erste Messung wurde ein Zustand bei einer Luftzahl λ nahe eins gewählt. Die Massenströme von Luft \dot{m}_L und Wasser \dot{m}_W sind also annähernd gleich. Folgende Eingangsgrößen sind durch die Messung vorgegeben:

Tabelle 6.1: Parameter einer Regenraummessung, Nr. 23, Messung A

| Parameter | Symbol | Wert | Einheit |
|------------------------|--------------------|-------------|----------------------------------|
| Temperatur des Wassers | $t_W^E =$ | 36,81 | °C |
| Temperatur der Luft | $t_L^E =$ | 22,64 | °C |
| Wassergehalt der Luft | $x_L^E =$ | 0,006 533 8 | kg _W /kg _L |
| Luftdruck | $p_U =$ | 99,9 | kPa |
| Massestrom des Wassers | $\dot{m}_W^E =$ | 3,3201 | kg/s |
| Massestrom der Luft | $\dot{m}_{fL}^E =$ | 3,4730 | kg/s |
| Luftzahl | $\lambda =$ | 1,0393 | |
| Feuchtkugeltemperatur | $t_F =$ | 14,07 | °C |

Die Randbedingungen für die Simulation wurden, wie in der Tabelle 6.2 aufgelistet, definiert.

Tabelle 6.2: Randbedingungen der Simulation, Nr. 23, Messung A

| Parameter | Symbol | Wert | Einheit |
|------------------------------|------------------|-----------|----------------|
| Zellenanzahl | $n =$ | 3360 | |
| Kantenlänge pro Zelle | $k =$ | 25 | mm |
| Verteilungskoeffizient | $x_{vk} =$ | 0,25 | |
| Übertragungsfläche pro Zelle | $A =$ | 0,005 625 | m ² |
| Massestrom des Wassers | $\dot{m}_W =$ | 0,041 501 | kg/s |
| Massestrom der Luft | $\dot{m}_{fL} =$ | 0,043 413 | kg/s |

Der zu simulierende Kühlturm hat von Wasserein- bis Wasseraustritt damit eine Höhe von $h = 4200$ mm, was dem realen Regenraum im Versuchskühlturm entspricht. Die Kühlturbreite wurde auf $b = 500$ mm halbiert, da keine horizontalen Gradienten zu erwarten sind. Der Simulationsraum ist in der Abbildung 6.1 als rot markierte Fläche gekennzeichnet. Die Masseströme von Luft \dot{m}_L und Wasser \dot{m}_W wurden entsprechend der Halbierung des Kühlturms und an die zweidimensionale Darstellung angepasst.

Die gemessenen Ausgangstemperaturen von Luft t_L^A und Wasser t_W^A wurden zur Kalibrierung des Simulationsmodells genutzt, wobei der Schwerpunkt nach der Gleichung 5.79 auf der Wassertemperatur t_W^A lag. Der Wärmeübergangskoeffizient α und der Stoffübergangskoeffizient β wurden auf diese Weise mit dem in Abschnitt 5.11.2 vorgestellten *Downhill-Simplex-Verfahren* ermittelt.

Nach einer Berechnungszeit von circa $\tau = 25$ h wurde in 50 Iterationen des *Downhill-Simplex-Verfahrens* mit 85 Durchgängen des Simulationsmodells der vorgegebene Fehler von $F_{RMS} = 1 \cdot 10^{-4}$ unterschritten und so das Modell kalibriert. Die Abweichung nach der Gleichung 5.79 beträgt nur noch $F_{RMS} = 0,000\,099$ und ist somit kleiner als 0,01 %. Bei geringeren Ansprüchen an die Genauigkeit sind auch deutlich schnellere Kalibrierungen

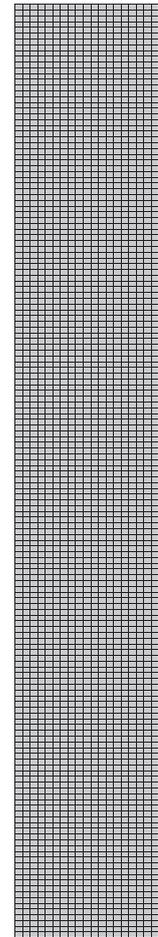
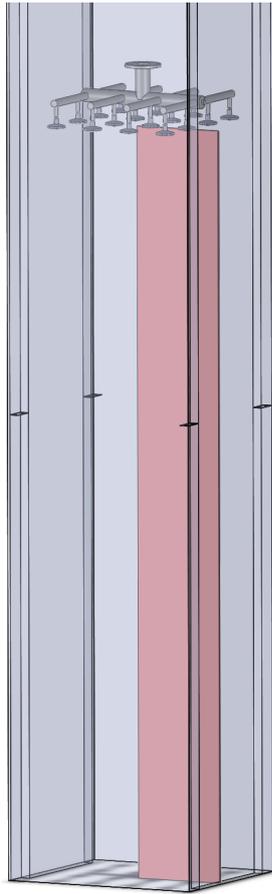


Abbildung 6.1: Simulationsraum des Regenraums Abbildung 6.2: Zellenmodell des Regenraums mit 3360 Zellen

möglich. Ebenso sind bei größerem Zeitaufwand noch höhere Genauigkeiten möglich, dieses ist aber aufgrund von Messtoleranzen zu Vergleichszwecken nicht mehr sinnvoll. Die Tabelle 6.3 zeigt die gemessenen und simulierten Ergebnisse im direkten Vergleich.

Tabelle 6.3: Vergleich der Ausgangsgrößen vom Regenraum, Nr. 23, Messung A

| Parameter | Symbol | aus Messung | aus Simulation | Einheit |
|---|---------------|---------------|----------------|----------------------------------|
| Temperatur des Wassers | $t_W^A =$ | 26,63 | 26,63 | °C |
| Temperatur der Luft | $t_L^A =$ | 27,63 | 27,62 | °C |
| Temperatur der Luft nach <i>KINKELDEI</i> | $t_L^A =$ | 27,88 | | °C |
| Temperatur der Luft nach <i>MEHLIG</i> | $t_L^A =$ | 27,41 | | °C |
| Wassergehalt | $x_L^A =$ | 0,021 057 * | 0,021 148 | kg _W /kg _L |
| Verdunstete Wassermenge | $\dot{m}_D =$ | 0,000 603 5 * | 0,000 630 3 | kg/s |
| Übertragungszahl (Gl. 2.50) | $K_{Po} =$ | 0,887 | 0,897 | |

* berechnet über Näherungsgleichung nach *POPPE* [33]

Die Übertragungszahlen K_{Po} wurden entsprechend des in Abschnitt 2.3.6 vorgestellten Verfahrens nach *POPPE* mit den jeweiligen Ausgangsgrößen der Messung und Simulation ermittelt.

Die dabei in der Tabelle 6.3 angegebene verdunstete Wassermenge \dot{m}_D bezieht sich auf die Geometrie des *Virtuellen Kühlturms* (4200 mm x 500 mm x 25 mm). Skaliert auf die Geometrie des gesamten Kühlturms (4200 mm x 1000 mm x 1000 mm) nimmt das Ergebnis der Berechnung nach *POPPE* um den Faktor 40 zu: $\dot{m}_D = 0,048\,28\text{ kg/s}$ im Vergleich zur Simulation mit $\dot{m}_D = 0,050\,43\text{ kg/s}$.

Der Temperaturverlauf von Luft und Wasser ist in der folgenden Abbildung 6.3 dargestellt. Das Wasser kühlt sich entsprechend der festgelegten Kühlzonenbreite um circa $z = 10\text{ K}$ ab, die Luft erwärmt sich dabei um circa $\Delta T_L = 5\text{ K}$. Es zeigt sich ein symmetrisches und horizontal homogenes Temperaturfeld. Der Verlauf der Temperaturen im Kühlturm stellt einen für einen Gegenstrom-Wärmeübertrager typischen Verlauf dar.

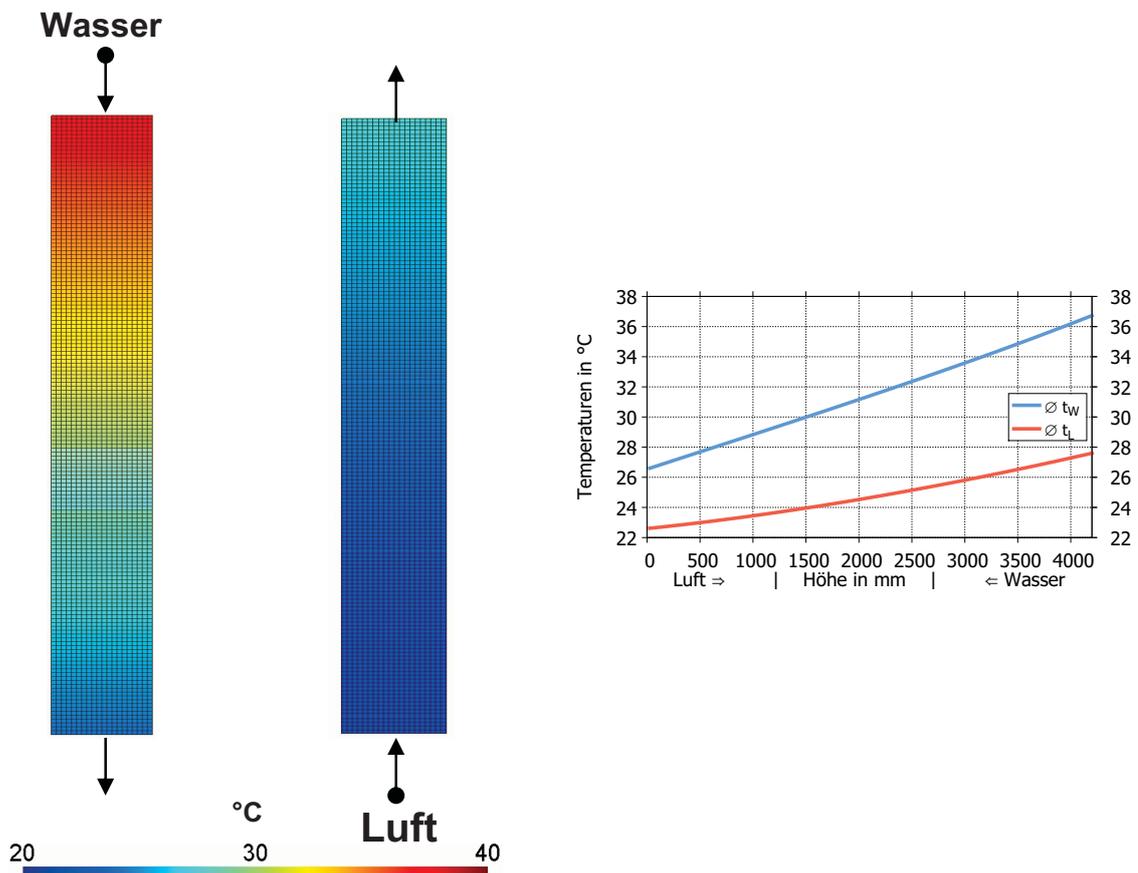
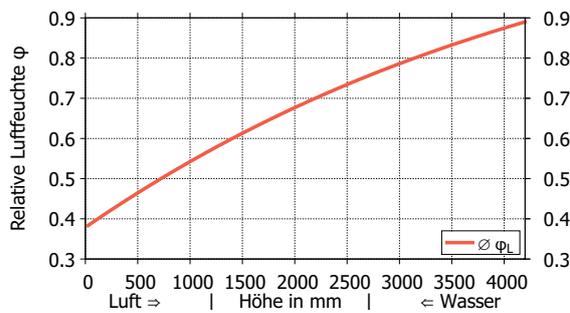
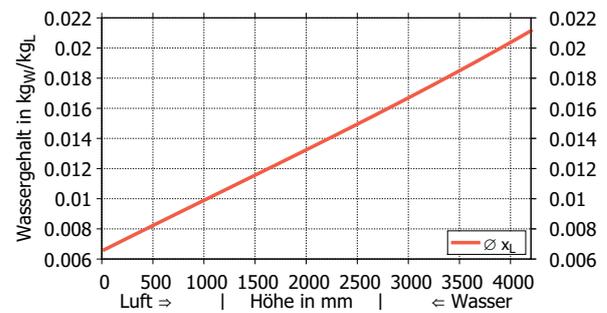


Abbildung 6.3: Simulation Regenraum: Verlauf der Temperaturen, Nr. 23, Messung A

Der Zustandsverlauf der Luft ist in den Abbildungen 6.4 und 6.5 zu erkennen. Es zeigt sich, dass die Luft annähernd gesättigt aus dem Kühlturm austritt. Die Messdatenauswertung nach *POPPE* bestätigt dieses. Der Wassergehalt x_L steigt parallel an, da stetig Wasser in die Luft verdunstet.

Abbildung 6.4: Verlauf von φ Abbildung 6.5: Verlauf von x_L

Simulation Regenraum, Nr. 23, Messung A

Die Masseströme nehmen um den gleichen Betrag ab/zu, das entspricht der verdunsteten Wassermenge \dot{m}_D (siehe Abbildung 7.11). Der sich in der Simulation ergebende Wassergehalt am Austritt x_L^A stimmt mit den Messdaten überein, obwohl dieser keine Zielgröße der Kalibrierung war. Dieses lässt auf eine qualitativ richtige Modellvorstellung schließen.

Der Vergleich zwischen den Ausgangsgrößen der Simulation und den gemessenen Ausgangsgrößen zeigt sehr gute qualitative und quantitative Übereinstimmungen. Die Ausgangstemperaturen stimmen exakt überein, während alle weiteren Größen nur sehr geringe Abweichungen zeigen.

Das erstellte Simulationsmodell ist somit in der Lage den Prozess im Regenraum sehr genau abzubilden. Die Validität des Modells für die Anwendung auf den Regenraum ist bestätigt.

6.2 Validierung des Modells über den Kühlturm mit Struktureinbau

Im zweiten Schritt wird in das Modell ein Struktureinbau integriert. Dabei wird die Geometrie von einem aus Messdaten bekannten Einbau modelliert und mit den dazugehörigen Messdaten verglichen. Ein Kühlturmeinbau vom Typ *Low Fouling Fill*, dessen Leistung durch eine sehr große Anzahl an Messungen bekannt ist, wurde als Referenz für die Simulation gewählt.

Aus der Simulation des Regenraums, siehe Abschnitt 6.1, ist bekannt, dass bereits mit wenigen Zellen genaue Ergebnisse erzielt werden. Diese Tatsache gilt bei der Simulation mit Einbauten nur bedingt. Zwar lassen sich bereits mit wenigen Zellen Ergebnisse erzielen, die den Messdaten entsprechen, allerdings lassen wenige Zellen keine Darstellung der Einbaugeometrie zu. Da aber die Geometrie bei der Bewertung der Einbauten eine wichtige Rolle spielt, ist es in diesem Fall notwendig mehr Zellen einzusetzen.

Eine Simulation des gesamten Kühlturms mit Struktureinbau ist anfangs nicht zu vermeiden. Ein Regenraum mit $n = 26\,880$ Zellen, die jeweils eine Kantenlänge von $k = 12,5$ mm

haben, wurde erstellt. Die Höhe des Kühlturms bleibt bei $h = 4200$ mm und die Breite entspricht der des gesamten Versuchskühlturms mit $b = 1000$ mm.

Aus dem Abschnitt 6.1 und durch Messdaten ist die Übertragungszahl K_{Po} vom Regenraum hinreichend untersucht und somit bekannt. Es wurde der Einbau mit einer Höhe von $h_{Fill} = 1200$ mm in diesen *Virtuellen Kühlturm* integriert, wie in den Abbildungen 6.6 und 6.7 zu erkennen ist. Der Einbau und die Einbaukanäle werden in beiden Abbildungen gelb hervorgehoben. Im Modell haben die Wände des Einbaus die Dicke null und stellen eine adiabate und stoffdichte Grenze dar. Der zweidimensionale Simulationsraum (rot hervorgehoben in der Abbildung 6.6) wird durch die $n = 26\,880$ Zellen beschrieben.

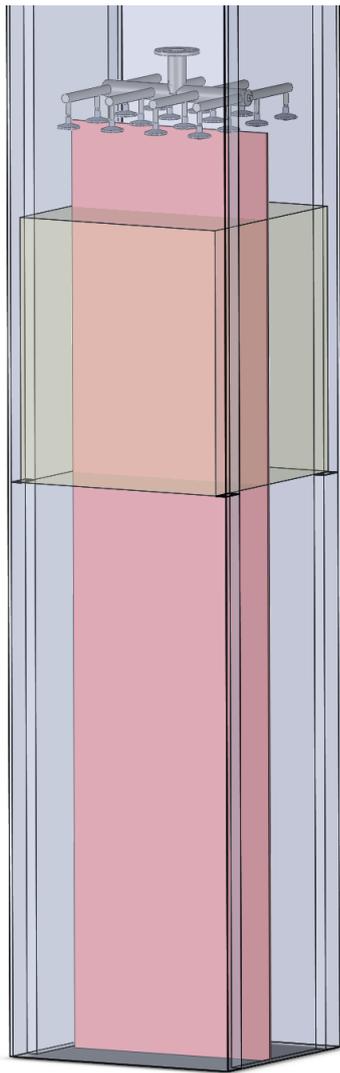


Abbildung 6.6: Simulationsraum des kompletten Kühlturms

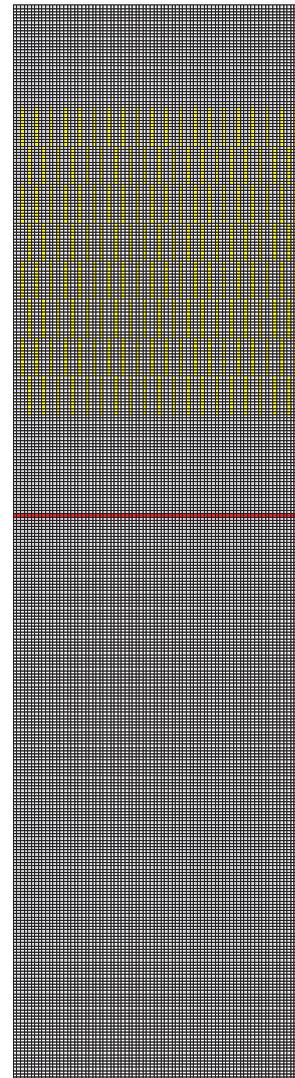


Abbildung 6.7: Zellenmodell mit Referenzeinbau mit 26 880 Zellen

Anhand der Messdaten des Referenzeinbaus können die Ergebnisse überprüft werden. Mit den ermittelten Transportkoeffizienten des Regenraums und den Randbedingungen von Versuch Nr. 23 der Messung A ($r_{12} z_{10}$)¹ bei einer Luftzahl von $\lambda \approx 1$ wurde die

¹Regendichte $r = 12 \frac{t}{m^2 h}$, Kühlzonenbreite $z = 10$ K

Geometrie des Einbaus in den Regenraum integriert. Auf diese Weise ist der Einfluss des Kühleinbaus auf den Kühlprozess direkt zu ermitteln.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass die Übertragungszahl nach *POPPE* von $K_{Po} = 0,897$ für den Regenraum auf $K_{Po} = 2,068$ steigt. Die Übertragungszahl nach *MEHLIG* liegt bei $K_{Me} = 1,96$. Die auf Messdaten basierende Regressionsgerade, die ebenfalls auf nach *MEHLIG* ausgewerteten Daten basiert, hat bei einer Luftzahl von $\lambda = 1$ einen Wert von $K_{Me,1} = 1,95$. Mit dem festgelegten Flächenvergrößerungsfaktor von $A_f = 8$ erzielt die Simulation sehr gute Ergebnisse ohne für den Referenzeinbau gezielt kalibriert zu werden. Allein durch eine geeignete Wahl des Flächenvergrößerungsfaktors A_f wird die gleiche Übertragungszahl K_{Po} wie in der Messung erreicht.

Es muss allerdings erwähnt werden, dass nur bei einer Luftzahl von $\lambda = 1$ eine Übereinstimmung erreicht wird. Die Steigung der Leistungskurve des Referenzeinbaus weicht von der Steigung der Leistungskurve des Regenraums ab, siehe Anhang D.6 Abbildung 13. Nur bei einer Luftzahl von $\lambda = 1$ fällt dieses mathematisch nicht ins Gewicht.

6.2.1 Vergleich mit Messdaten des Referenzeinbaus

Für eine genauere Untersuchung der Geometrie des Kühleinbaus wurde im nächsten Schritt ein real gemessener Zustand (siehe Anhang E.5) des Referenzeinbaus untersucht. Folgende Randbedingungen galten bei der Messung:

Tabelle 6.4: Parameter einer Messung des Referenzeinbaus, Nr. 14, Messung C

| Parameter | Symbol | Wert | Einheit |
|------------------------|--------------------|-----------|----------------------------------|
| Temperatur des Wassers | $t_W^E =$ | 32,53 | °C |
| Temperatur der Luft | $t_L^E =$ | 20,77 | °C |
| Wassergehalt der Luft | $x_L^E =$ | 0,008 812 | kg _W /kg _L |
| Luftdruck | $p_U =$ | 99,1 | kPa |
| Massestrom des Wassers | $\dot{m}_W^E =$ | 3,3057 | kg/s |
| Massestrom der Luft | $\dot{m}_{fL}^E =$ | 3,3780 | kg/s |
| Luftzahl | $\lambda =$ | 1,013 | |
| Feuchtkugeltemperatur | $t_F =$ | 15,34 | °C |

Die für die Simulation gültigen Parameter lauten:

Tabelle 6.5: Randbedingungen der Simulation, Nr. 14, Messung C

| Parameter | Symbol | Wert | Einheit |
|------------------------------|------------------|-------------|----------------|
| Zellenanzahl | $n =$ | 26,880 | |
| Kantenlänge pro Zelle | $k =$ | 12,5 | mm |
| Verteilungskoeffizient | $x_{vk} =$ | 0,25 | |
| Übertragungsfläche pro Zelle | $A =$ | 0,000 703 1 | m ² |
| Massestrom des Wassers | $\dot{m}_W =$ | 0,041 32 | kg/s |
| Massestrom der Luft | $\dot{m}_{fL} =$ | 0,042 22 | kg/s |

Bei der Simulation eines gemessenen Zustandes des Referenzeinbaus zeigen sich gute Übereinstimmungen, siehe Tabelle 6.6. Da die Luftzahl nahe eins liegt, ergeben sich nach der Kalibrierung des Zustandes ähnliche Werte für die Transportgrößen α und β wie durch die Ermittlung über den Regenraum.

Tabelle 6.6: Vergleich der Ausgangsgrößen des Referenzeinbaus, Nr. 14, Messung C

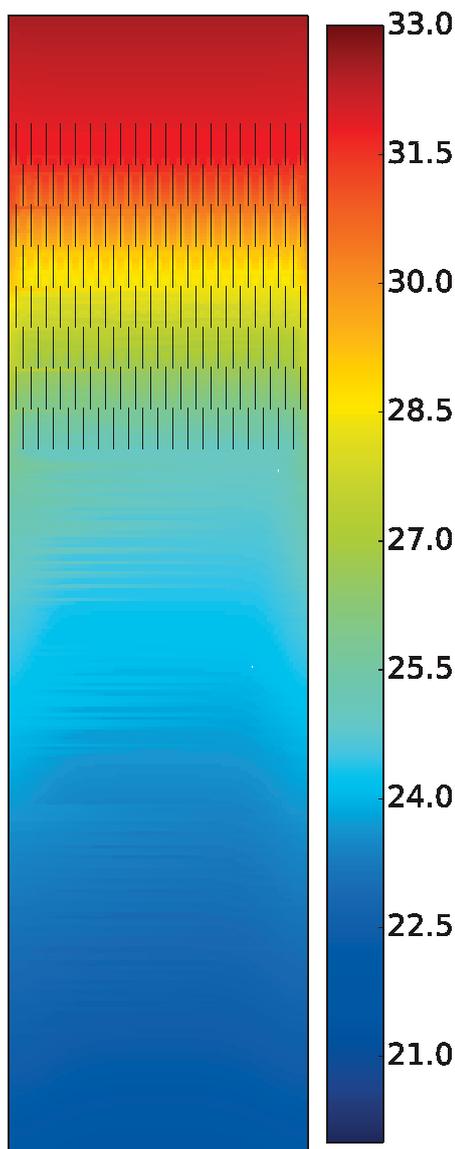
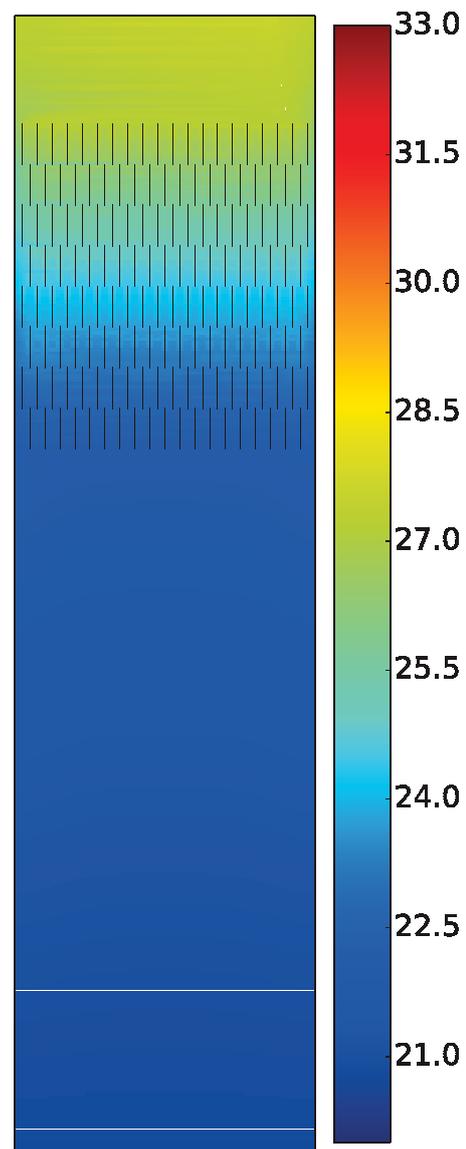
| Parameter | Symbol | aus Messung | aus Simulation | Einheit |
|---|---------------|---------------|----------------|----------------------------------|
| Temperatur des Wassers | $t_W^A =$ | 21,92 | 21,93 | °C |
| Temperatur der Luft | $t_L^A =$ | 27,60 | 27,56 | °C |
| Temperatur der Luft nach <i>KINKELDEI</i> | $t_L^A =$ | 27,38 | | °C |
| Temperatur der Luft nach <i>MEHLIG</i> | $t_L^A =$ | 27,15 | | °C |
| Wassergehalt | $x_L^A =$ | 0,023 88 * | 0,023 61 | kg _W /kg _L |
| Verdunstete Wassermenge | $\dot{m}_D =$ | 0,000 623 0 * | 0,000 619 4 | kg/s |
| Übertragungszahl (Gl. 2.50) | $K_{Po} =$ | 2,067 | 2,112 | |

* berechnet über Näherungsgleichung nach *POPPE* [33]

Die Abbildungen 6.8 und 6.9 zeigen den Temperaturverlauf von Luft und Wasser im Kühlturm. Ebenso wie bei der Simulation des Regenraums zeigt sich hier vertikal ein nahezu homogenes Temperaturfeld. Nur im Randbereich treten kleine Gradienten im Temperaturfeld auf.

Um den Simulationsaufwand zu reduzieren wurde die Regenzone des *Virtuellen Kühlturms* auf $h_R = 400$ mm verkürzt. Dadurch verringert sich die Anzahl an Zellen, die den Kühlturm darstellen, auf $n = 12\,800$ und die Rechenzeit sinkt von circa $\tau = 18$ h auf circa $\tau = 6$ h. In der Abbildung 6.7 ist die Verkürzung der Regenzone durch eine rote Linie gekennzeichnet. Der entstandene Simulationsraum im Kühlturm ist in der Abbildung 6.10 rot hervorgehoben.

Wichtig ist, dass die Zustandsgrößen der Luft am Eintritt angepasst werden. Die Luft hat schon einen Teil der Regenzone durchströmt. Dadurch hat sich sowohl die Temperatur t_L als auch der Wassergehalt der Luft x_L verändert. Die Randbedingungen der Simulation ändern sich entsprechend der Tabelle 6.7.

Abbildung 6.8: Verlauf von t_W in °CAbbildung 6.9: Verlauf von t_L in °C

Simulation Referenzeinbau, Nr. 14, Messung C

Tabelle 6.7: Angepasste Parameter des Referenzeinbaus mit verkürzter Regenzone, Nr. 14, Messung C

| Parameter | Symbol | Wert | Einheit |
|-----------------------------------|-----------|-----------|----------------------------------|
| Temperatur der Luft am Eintritt | $t_L^E =$ | 21,85 | °C |
| Wassergehalt der Luft am Eintritt | $x_L^E =$ | 0,001 281 | kg _W /kg _L |
| Feuchtkugeltemperatur am Eintritt | $t_F^E =$ | 19,0 | °C |

Diese Eintrittsparameter der Luft für das reduzierte Modell sind dem Simulationsmodell des gesamten Kühlturms entnommen (siehe Abbildung 6.7). Sie stellen Mittelwerte über den Querschnitt des Kühlturms dar. Die Masseströme und Parameter für Wasser bleiben unverändert, da diese weiterhin an der gleichen Stelle in das Modell eintreten. Aus der verkleinerten Version des virtuellen Referenzeinbaus wurden nachfolgende Werte berechnet:

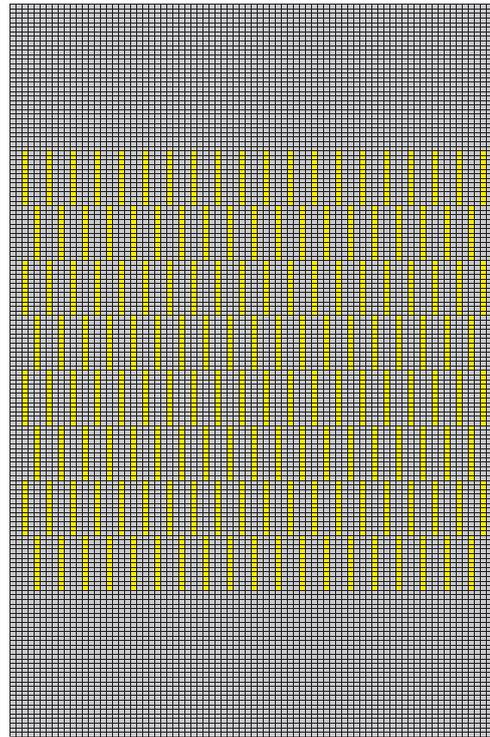
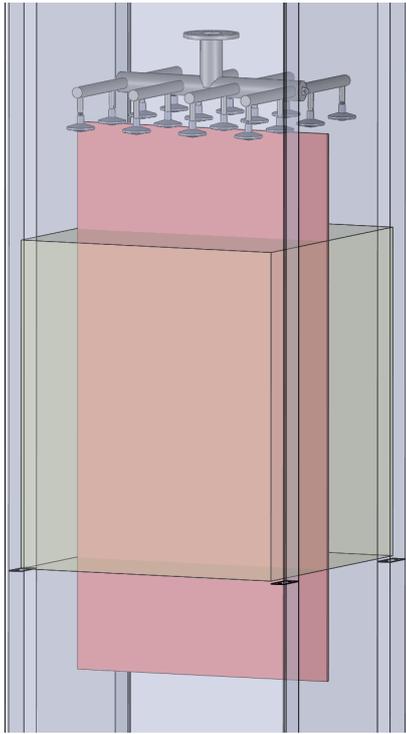


Abbildung 6.10: Simulationsraum mit verkürzter Regenzone

Abbildung 6.11: Zellenmodell mit verkürzter Regenzone mit 12800 Zellen

Tabelle 6.8: Vergleich der Ausgangsgrößen des Referenzeinbaus mit verkürzter Regenzone, Nr. 14, Messung C

| Parameter | Symbol | aus Messung | aus Simulation | Einheit |
|---|---------------|---------------|----------------|----------------------------------|
| Temperatur des Wassers | $t_W^A =$ | 21,9 | 24,59 | °C |
| Temperatur der Luft | $t_L^A =$ | 27,6 | 27,64 | °C |
| Temperatur der Luft nach <i>KINKELDEI</i> | $t_L^A =$ | 27,38 | | °C |
| Temperatur der Luft nach <i>MEHLIG</i> | $t_L^A =$ | 27,2 | | °C |
| Wassergehalt | $x_L^A =$ | 0,023 88 * | 0,023 66 | kg _W /kg _L |
| Verdunstete Wassermenge | $\dot{m}_D =$ | 0,000 623 0 * | 0,000 452 6 | kg/s |
| Übertragungszahl (Gl. 2.50) | $K_{Po} =$ | 2,067 | 1,586 | |

* berechnet über Näherungsgleichung nach *POPPE* [33]

Es zeigt sich bei der Lufttemperatur t_L^A wieder eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten. Die Ausgangstemperatur des Wasser t_W^A hat sich verändert, da der Austritt des Wassers nicht mehr dem Austritt des Realmodells entspricht. Daraus resultierend ändert sich auch die verdunstete Wassermenge \dot{m}_D und die Übertragungszahl K_{Po} . Die Verkürzung der Regenzone um $h_R = 2200$ mm hat eine Verringerung der Übertragungszahl um $\Delta K_{Po} = 0,526$ zur Folge.

Die Abbildung 6.12 zeigt den Verlauf der relativen Luftfeuchte φ im verkürzten *Virtuellen Kühlturm*. Es ist gut zu erkennen, wie die Steigung des Verlaufs der relativen Luftfeuchte φ im Kühleinbau zunimmt. Die Luft tritt nahezu gesättigt aus dem Kühlturm aus. Weiterhin ist zu erkennen, dass im Zentrum des Einbaus eine höhere relative Luftfeuchte φ als in den Randbereichen des Kühlturms vorherrscht.

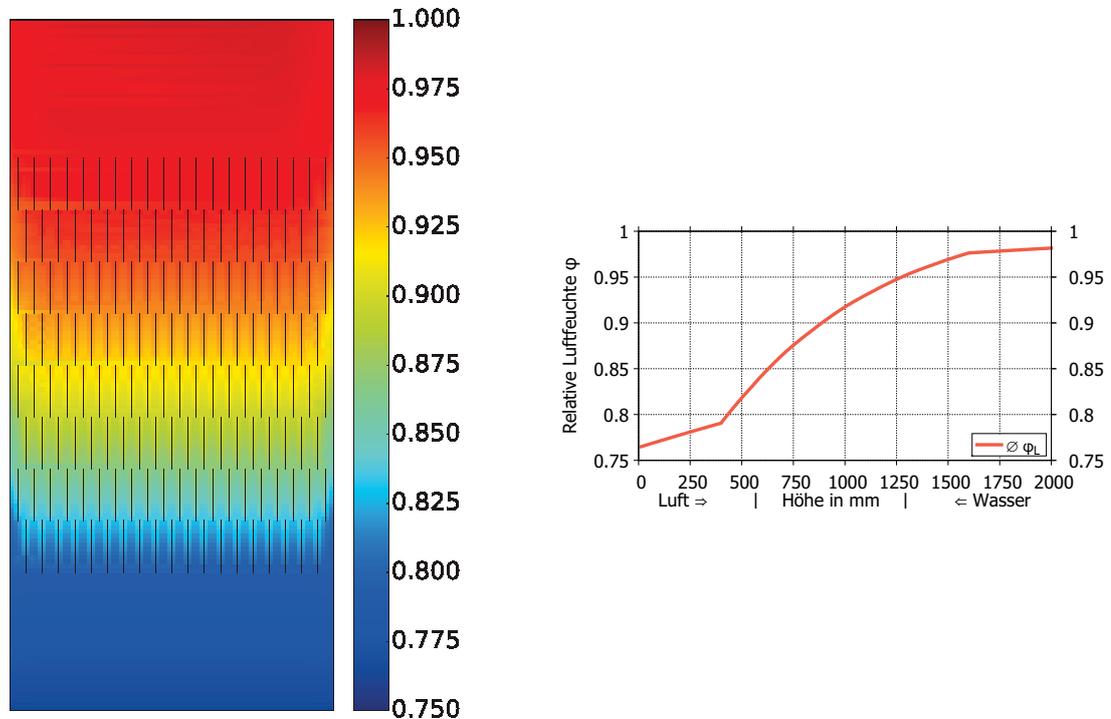


Abbildung 6.12: Verlauf der relativen Luftfeuchte φ , Simulation Referenzeinbau mit verkürzter Regenzone, Nr. 14, Messung C

Der Verlauf der Temperaturen t und des Wassergehalts x_L ist dem Anhang D.6 zu entnehmen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung von Simulation und Messung. Das Verhalten des Referenzeinbaus kann in gutem Maße wiedergegeben werden und es wurde so ein validiertes Modell erstellt, welches sich auf weitere Zustände bei anderen Luftzahlen λ übertragen lässt.

Es wurde des Weiteren versucht einen Struktureinbau vom Typ *Cross Corrugated Foil Fill* mit schräger Kanalführung zu modellieren. Nach erfolgreicher Modellerstellung kam es dabei jedoch zu Problemen in der numerischen Behandlung. Aufgrund vereinzelt starker Kondensation in einigen Zellen, gab es Probleme bei der Lösung des Gleichungssystems.

7 Weitere Untersuchungen mit dem Modell *Virtueller Kühlturm*

Mit dem validen Modell *Virtueller Kühlturm* des Versuchskühlturms sind viele Untersuchungen möglich, die mit dem realen Versuchstand nicht möglich oder sehr aufwändig sind. Dazu gehört vor allem der Blick auf die inneren Vorgänge des Kühlturms.

Wie im vorherigen Kapitel erfolgt auch hier die Unterteilung in zwei Untersuchungsschwerpunkte:

1. Die Untersuchung des Regenraums des Versuchskühlturms in Abschnitt 7.1
2. Die Untersuchung des Referenzeinbaus im Versuchskühlturm in Abschnitt 7.2

Dabei werden zusätzliche Untersuchungen aufbauend auf den Betriebszuständen des vorherigen Kapitel durchgeführt.

7.1 Simulation des Regenraums

7.1.1 Verlauf der Zustandsgrößen im Kühlturm

Für die weiteren Untersuchungen wird der für die Validierung gewählte Zustand Messung A des Regenraums aus Abschnitt 6.1 näher untersucht. Bei der Untersuchung sind die Zustände der Fluidströme sowie der Einfluss der Eingangsparameter auf die Übertragungszahl K_{Po} von besonderem Interesse.

Die im Abschnitt 6.1 angewandte Vorgehensweise wurde mit einer Vielzahl von Messungen bei unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt. Eine ausführliche Darstellung der Messdaten ist im Anhang E zu finden. Es wurden die Kühlzonenbreite z und die Luftzahl λ in der Messung variiert und eine Vielzahl von Zuständen im Simulationsmodell kalibriert. Grundsätzlich konnte bei allen Beispielen eine sehr gute Übereinstimmung erreicht werden. Dieses führt zu einer Datenbank von kalibrierten Modellen für viele verschiedene Eingangsparameter des Kühlturms. Die Abbildung 7.1 zeigt beispielhaft den Vergleich einer Messung mit den Simulationsergebnissen über die Luftzahl λ bei einer Regendichte von $r = 12 \frac{t}{m^2 h}$ für eine Kühlzonenbreite $z = 10 K$ ($r12 z10$).

In der Abbildung 7.1 wurde bewusst auf die übliche doppelt logarithmische Darstellung der Übertragungszahl verzichtet, da die sehr kleinen Differenzen mit der doppelt logarithmischen

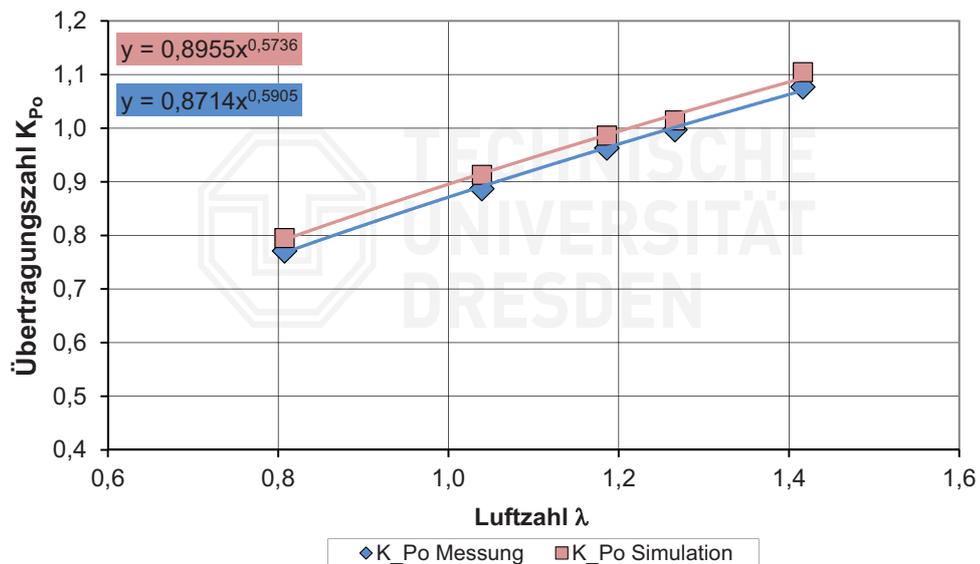
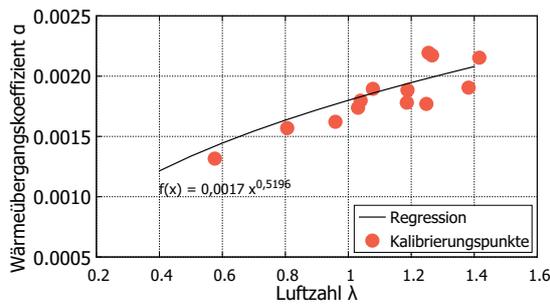
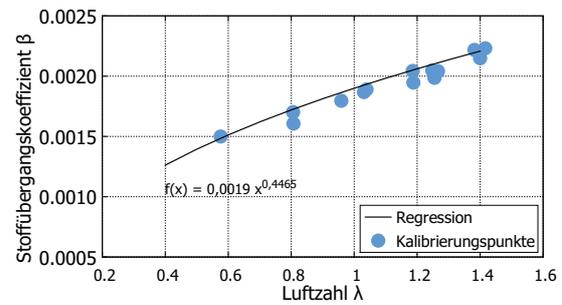


Abbildung 7.1: Vergleich von Messung und Simulation r12 z10

Darstellung nicht sichtbar wären. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Simulation. Tendenziell liegen die Übertragungszahlen der Simulation jedoch immer etwas höher als die der Messung, obwohl die Ausgangstemperaturen und der Wassergehalt nahezu gleich sind. Da in der Simulation für jede einzelne Zelle eine Übertragungszahl K_{Po} bestimmt wird und alle einzelnen anschließend aufsummiert werden, ist eine feinere Auflösung der Übertragungszahl K_{Po} möglich. Daher ist die Berechnung der Übertragungszahl K_{Po} im Modell genauer. Dieses führt schließlich meist zu höheren Übertragungszahlen K_{Po} des Simulationsmodells.

7.1.2 Funktionen der Transportgrößen

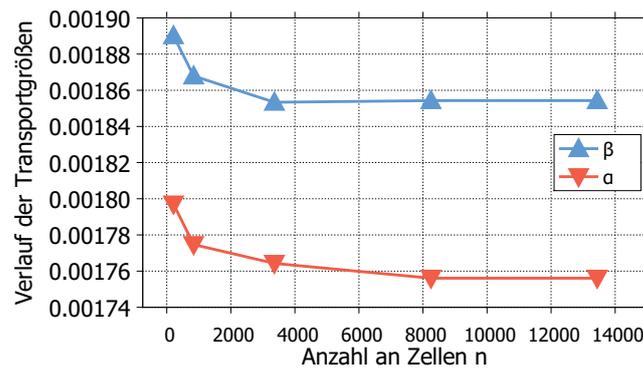
Das Simulationsmodell wurde für viele gemessene Zustände bei verschiedenen Kühlzonenbreiten z und Luftzahlen λ kalibriert. Es stellte sich heraus, dass für eine konstante Regendichte r bei gleicher Luftzahl λ immer ähnliche Transportkoeffizienten das Ergebnis der Kalibrierung waren. Die Abbildungen 7.2 und 7.3 zeigen den Verlauf vom Wärmeübergangskoeffizienten α und Stoffübergangskoeffizienten β über der Luftzahl λ für einige durchgeführte Messungen der Regendichte $r = 12 \frac{t}{m^2 h}$.

Abbildung 7.2: Wärmeübergangskoeffizient α über Luftzahl λ Abbildung 7.3: Stoffübergangskoeffizient β über Luftzahl λ

Die Verläufe der Transportkoeffizienten lassen sich über Potenzfunktionen in Abhängigkeit von der Luftzahl $f(\lambda)$ beschreiben:

$$\alpha(\lambda) = 0,0017 \cdot \lambda^{0,5196} \quad \text{und} \quad \beta(\lambda) = 0,0019 \cdot \lambda^{0,4465}. \quad (7.1)$$

Über diese Funktionen sind der Wärmeübergangskoeffizient α und der Stoffübergangskoeffizient β für jeden beliebigen Wert von der Luftzahl λ mit guter Näherung bestimmt. Es wurde so ein universelles Modell generiert, das für alle Zustände der Regendichte $r = 12 \frac{\text{t}}{\text{m}^2 \text{h}}$ kalibriert ist. Von der Kühlzonenbreite z sind die Funktionen annähernd unabhängig. Die ermittelten Funktionen sind nur für die festgelegten Modellparameter der Simulation gültig. Wird die Übertragungsfläche pro Zelle A verändert, ergeben sich andere Funktionen. Der Verteilungskoeffizient x_{vk} hat hingegen nur einen sehr geringen Einfluss. Bei einer Veränderung der Zellenanzahl n stellt sich der in der Abbildung 7.4 dargestellte Verlauf ein.

Abbildung 7.4: Abhängigkeit der Transportgrößen α und β von der Anzahl der Zellen n

Es wird deutlich, dass sich die Transportgrößen ab einer gewissen Anzahl an Zellen nicht mehr ändern. Ähnlich wie bei der Ermittlung der optimalen Zellenanzahl (siehe Abschnitt 5.9.2), zeigt sich schon ab einer geringen Zellenanzahl n ein annähernd konstanter Verlauf der Transportgrößen. Dieses bestätigt die Festlegung, dass ab 2.000 Zellen für die Simulationen hinreichend genaue Ergebnisse erzielt werden.

Es fällt ebenso auf, dass der Wärmeübergangskoeffizient α und Stoffübergangskoeffizient β in etwa die gleiche Größenordnung haben. Dieses unterstützt die Theorie, dass der *LEWIS*'sche-Faktor $z = \frac{\alpha}{\beta \cdot \rho_L \cdot c_{pL}}$, der das Verhältnis des Wärme- zum Stoffübergang ausdrückt, beim Verdunstungsvorgang immer nahe eins liegt [37].

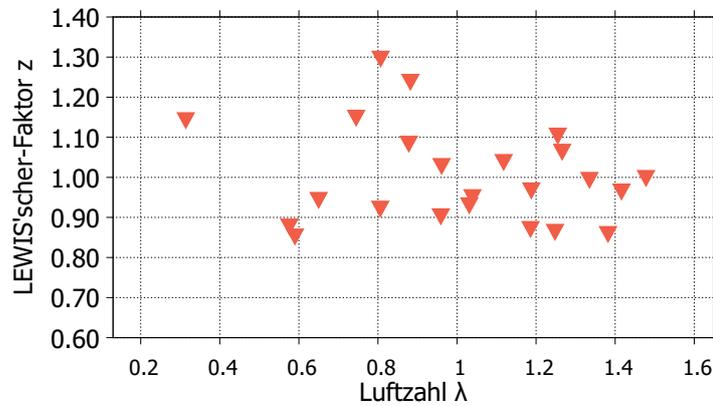


Abbildung 7.5: *LEWIS*'sche-Faktor z in Abhängigkeit der Luftzahl λ

Die Abbildung 7.5 zeigt, dass der *LEWIS*'sche-Faktor z bei allen untersuchten Beispielen nicht exakt eins ist, wie in der *MERKEL*'schen Theorie vorausgesetzt. Da die Simulation durch die Messung kalibriert wurde, könnte dieses jedoch durch Schwanken bei den Messungen erklärt werden. Im Mittel ergibt sich ein *LEWIS*'sche-Faktor von $z = 1$. Zudem ist keine Regel erkennbar über die sich die Abhängigkeit des *LEWIS*'schen-Faktors von der Luftzahl λ beschreiben lässt.

Anhand der aufgestellten Gleichungen 7.1 wird der Verlauf der Übertragungszahl K_{Po} über die Luftzahl für jeden Zustand einer Regendichte abgebildet. Die Abbildung 7.6 zeigt den Vergleich des simulierten Verlaufs mit den aufgestellten Transportfunktionen im Vergleich zur Messung r12 z10.

Es wird eine sehr gute Übereinstimmung deutlich, während die Simulation aus bereits erörterten Gründen leicht höhere Übertragungszahlen K_{Po} berechnet. Dieses ist auf alle Zustände der Regendichte $r = 12 \frac{t}{m^2 h}$ übertragbar.

Bei der Anwendung der erstellten Funktionen auf Simulationen mit anderer Regendichte r zeigten sich im Vergleich mit Messungen keine guten Übereinstimmungen. Es wird deutlich, dass die ermittelten Funktionen der Transportgrößen nur für eine bestimmte Regendichte Gültigkeit besitzen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieses allerdings nicht vollständig geprüft (siehe Anhang D.2, Abbildung 2). Für eine generelle Aussage sind noch weitere Untersuchungen und Messungen bei verschiedenen Regendichten notwendig.

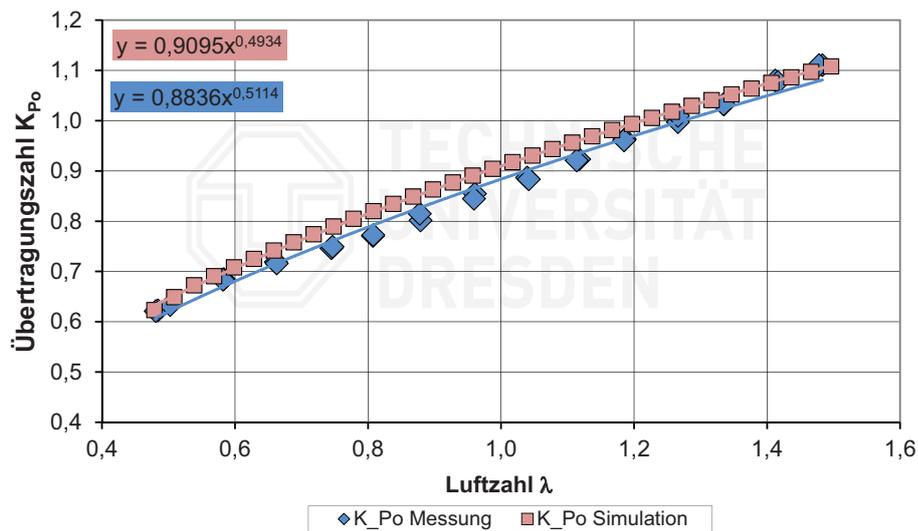


Abbildung 7.6: Vergleich von Messung und Simulation mit Regressionsfunktionen

7.1.3 Luft-Austritts-Stand im *Virtuellen Kühlturm*

Im nächsten Schritt wurde ein weiterer gemessener Zustand mit den ermittelten Transportfunktionen aus Abschnitt 7.1.2 mit dem Simulationsmodell näher überprüft. Ein Messpunkt wurde mit folgenden in der Tabelle 7.1 dargestellten Randbedingungen simuliert.

Tabelle 7.1: Parameter einer Regenraummessung, Nr. 19, Messung B

| Parameter | Symbol | Wert | Einheit |
|------------------------|-----------------|-----------|----------------------------------|
| Temperatur des Wassers | $t_W^E =$ | 36,41 | °C |
| Temperatur der Luft | $t_L^E =$ | 16,87 | °C |
| Wassergehalt der Luft | $x_L^E =$ | 0,008 381 | kg _W /kg _L |
| Luftdruck | $p_U =$ | 99,3 | kPa |
| Massestrom des Wassers | $\dot{m}_W^E =$ | 3,2974 | kg/s |
| Massestrom der Luft | $\dot{m}_L^E =$ | 3,7239 | kg/s |
| Luftzahl | $\lambda =$ | 1,12 | |
| Feuchtkugeltemperatur | $t_F =$ | 13,47 | °C |

An den Randbedingungen für die Modellerstellung gab es bis auf die geringfügige Änderung der Masseströme keine Anpassung gegenüber dem Beispiel aus Abschnitt 6.1, siehe Tabelle 7.2.

Tabelle 7.2: Randbedingungen der Simulation, Nr. 19, Messung B

| Parameter | Symbol | Wert | Einheit |
|------------------------------|------------------|-----------|----------------|
| Zellenanzahl | $n =$ | 3360 | |
| Kantenlänge pro Zelle | $k =$ | 25 | mm |
| Verteilungskoeffizient | $x_{vk} =$ | 0,25 | |
| Übertragungsfläche pro Zelle | $A =$ | 0,005 625 | m ² |
| Massestrom des Wassers | $\dot{m}_W =$ | 0,041 22 | kg/s |
| Massestrom der Luft | $\dot{m}_{fL} =$ | 0,046 55 | kg/s |

Der Vergleich der Simulation mit den Messdaten in der Tabelle 7.3 zeigt, dass die Genauigkeit abnimmt, jedoch immer noch im akzeptablen Bereich liegt. Eine geringe Abweichung entsteht dadurch, dass sich der Massestrom des Wassers \dot{m}_W geringfügig von der ersten Messung A unterscheidet. Der Fehler nach der Gleichung 5.79 liegt bei $F_{RMS} = 0,156$, was einer relativen Abweichung der Wasser-Austritts-Temperatur t_W^A von unter 1,5 % entspricht.

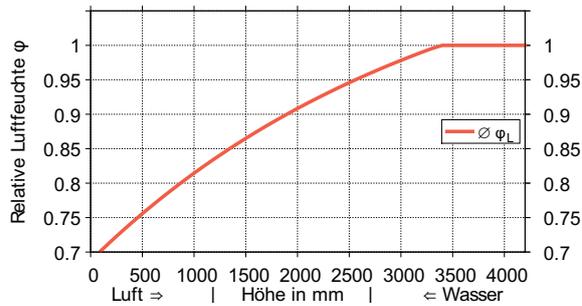
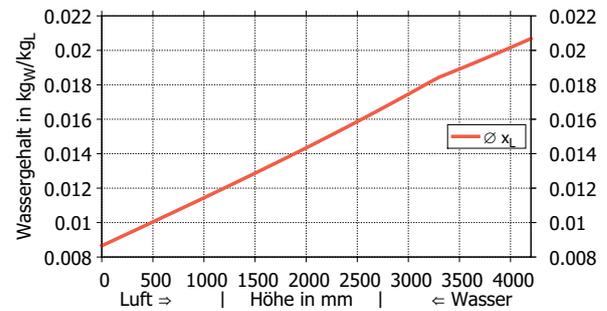
Tabelle 7.3: Vergleich der Ausgangsgrößen vom Regenraum, Nr. 19, Messung B

| Parameter | Symbol | aus Messung | aus Simulation | Einheit |
|---|---------------|-------------|----------------|----------------------------------|
| Temperatur des Wassers | $t_W^A =$ | 25,93 | 26,27 | °C |
| Temperatur der Luft | $t_L^A =$ | 25,08 | 24,95 | °C |
| Temperatur der Luft nach <i>KINKELDEI</i> | $t_L^A =$ | 24,94 | | °C |
| Temperatur der Luft nach <i>MEHLIG</i> | $t_L^A =$ | 25,02 | | °C |
| Wassergehalt | $x_L^A =$ | 0,021 11 * | 0,020 42 | kg _W /kg _L |
| Verdunstete Wassermenge | $\dot{m}_D =$ | 0,002 101 * | 0,002 223 | kg/s |
| Übertragungszahl (Gl. 2.50) | $K_{Po} =$ | 0,929 | 0,888 | |

* berechnet über Näherungsgleichung nach *POPPE* [33]

Allerdings wurde das Modell nicht neu kalibriert, sondern mit den ermittelten Transportfunktionen aus den Gleichungen 7.1 berechnet. Da sich die Strömungsbedingungen aufgrund des ähnlichen Wassermassestroms \dot{m}_W kaum ändern, ist dieses möglich. Die Übertragungskoeffizienten lassen sich durch die ermittelten Funktionen bestimmen. Bei einer größeren Änderung des Wassermassestroms \dot{m}_W muss das Modell neu kalibriert werden.

Hervorzuheben ist hier der Verlauf der relativen Feuchte φ beziehungsweise des Wassergehalts der Luft x_L . In den Abbildungen 7.7 und 7.8 ist zu erkennen, dass die Luft nach circa einer Höhe von $h = 3400$ mm des Regenraums den Sättigungspunkt x_5 erreicht hat. Dieses wird durch die Berechnung des Wassergehalts am Austritt x_L^A nach *POPPE* bestätigt. Am Sättigungspunkt x_5 kann entsprechend der Erwärmung der Luft weniger Wasser aufgenommen werden und somit ändert der Verlauf des Wassergehalts x_L im Kühlturm seine Steigung.

Abbildung 7.7: Verlauf von φ Abbildung 7.8: Verlauf von x_L

Simulation Regenraum, Nr. 19, Messung B

Gleichzeitig fällt die Übertragungszahl K_{Po} beim Erreichen des Sättigungszustandes auf ein niedrigeres Niveau (siehe Anhang D.3, Abbildung 3).

Der Sättigungswassergehalt der Luft am Austritt x_S lässt sich über die Gleichung 7.2 berechnen [69].

$$x_S = \frac{M_W}{M_L} \cdot \frac{p_S(t_L)}{p_U - p_S(t_L)}. \quad (7.2)$$

Bei einer beispielhaften Betrachtung der simulierten Austrittstemperatur der Luft t_L^A ergibt sich für den Sättigungswassergehalt $x_S = 0,02042 \text{ kg}_W/\text{kg}_L$. Hierbei handelt es sich um den berechneten Wassergehalt am Austritt x_L^A . Diese Rechnung wird mit beliebig vielen Punkten entlang des Temperaturverlaufs der Luft wiederholt. Der Zustandsverlauf der Luft verläuft dabei entlang der Sättigungslinie. Ist die Luft gesättigt, ist die direkte Triebkraft des Stoffübergangs (siehe Gleichung 5.25) gleich null. Jedoch besteht noch eine Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser (Verlauf der Temperaturen im Anhang D.3, Abbildung 4), die zu einem Wärmeübergang führt. Erst durch die Änderung der Temperatur der Luft kann wieder Wasserdampf aufgenommen werden. Mit steigender Temperatur der Luft entfernt sich der Zustand von der Sättigungslinie, dadurch entsteht wieder ein Gefälle des Wasserdampfpartialdrucks zwischen flüssigem Wasser und der feuchten Luft. Nur auf diese Weise ist wieder Stoffübergang möglich. An der Sättigungslinie ist also die Temperaturdifferenz nur eine *indirekte* Triebkraft für den Stoffübergang. Gedanklich verläuft der Zustandsverlauf der Luft in „kleinen Treppenstufen“ mit der Breite der jeweiligen Zelle entlang der Sättigungslinie (siehe Abbildung 7.9).

Somit verläuft der Zustand der Luft entsprechend der Modellgenerierung im Abschnitt 5.3 dem bereits von MEHLIG [32] postuliertem Verlauf entlang der Sättigungslinie der Luft. Die Messung der Temperatur der Luft am Austritt t_L^A bestätigt diese Annahme. Über den Verlauf der Masseströme ist eine leichte Änderung der Steigung von Luft und Wasser beim Erreichen des Sättigungspunktes zu beobachten.

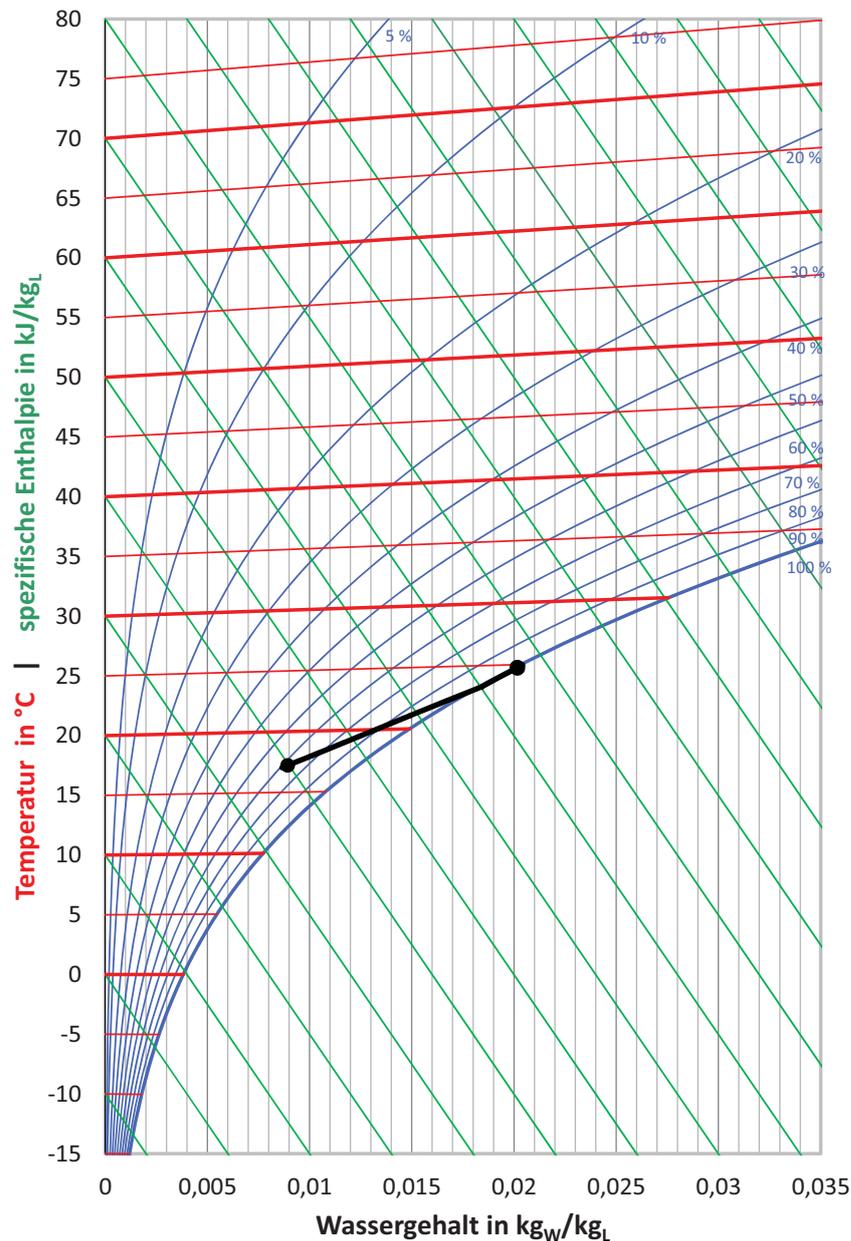
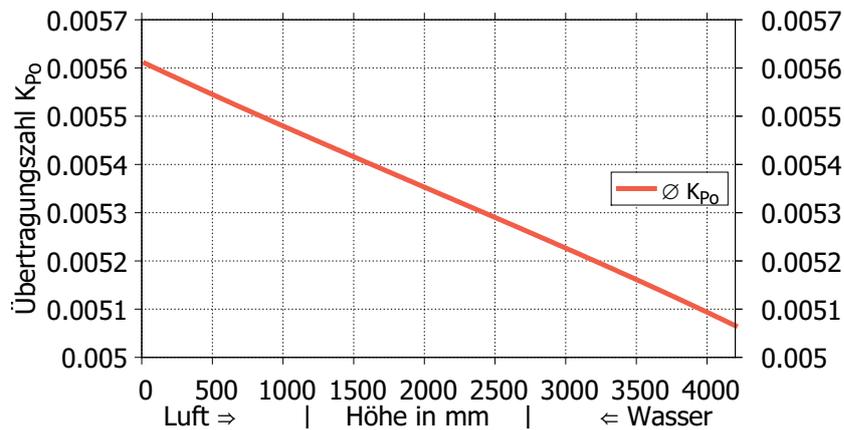


Abbildung 7.9: Simulation Regenraum: Zustandsverlauf der Luft, Nr. 19, Messung B

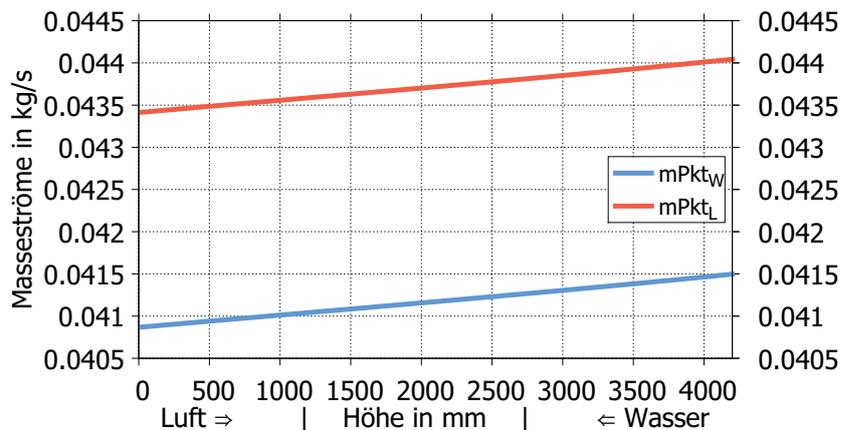
7.1.4 Verlauf der Übertragungszahl K_{P_0} im *Virtuellen Kühlturm*

Ein wesentlicher Vorteil der Modellierung ist es, dass der Zustand der Luft und des Wassers an jeder Stelle im Kühlturm bekannt ist. Daher kann die *MERKEL*'sche Hauptgleichung 2.39 direkt gelöst werden. Es ist möglich für jede einzelne Zelle eine Übertragungszahl K_{P_0} zu bestimmen sowie Mittelwerte für Ebenen zu ermitteln. Auf diese Weise können Bereiche mit guter Kühlung und Bereiche mit schlechtem Wärme- und Stoffübergang identifiziert werden. Für das aktuelle Beispiel Regenraummessung A zeigt die Abbildung 7.10 den Verlauf der gemittelten Übertragungszahl K_{P_0} nach *POPPE* für jede Höhe des Kühlturms.

Es ist zu erkennen, dass die Übertragungszahl K_{P_0} am unteren Ende des Kühlturms geringfügig höher ist und in diesem Fall einen gegenläufig linearen Verlauf zum Wasser-

Abbildung 7.10: Simulation Regenraum: Verlauf der Übertragungszahl K_n , Nr. 23, Messung A

massenstrom hat (vergleiche Abbildung 7.11). Die Güte der Verdunstungskühlung verhält sich also gegenläufig proportional zum Wassermassenstrom \dot{m}_W , was entsprechend durch den linken Term der Gleichung 2.50 ($K_{Po} = \frac{\sigma \cdot A}{\dot{m}_W}$) bestätigt wird. Bei geringerem Wassermassenstrom \dot{m}_W – am Eintritt der Luft – ist die Übertragungszahl K_{Po} größer, da durch den Wassermassenstrom \dot{m}_W geteilt wird. Umgekehrt sinkt die Übertragungszahl K_{Po} mit steigendem Wassermassenstrom \dot{m}_W .

Abbildung 7.11: Simulation Regenraum: Verlauf der Masseströme \dot{m} , Nr. 23, Messung A

Die Übertragungszahl K_{Po} ist wie aus der Gleichung 2.50 bereits deutlich geworden ist, direkt abhängig vom Wassermassenstrom \dot{m}_W . Die geringen Masseänderungen im Kühlturm durch Verdunstung haben direkten Einfluss auf den Verlauf der Übertragungszahl K_{Po} .

Im umgekehrten Fall steigt bei steigendem Wassermassenstrom \dot{m}_W im Kühlturm gegenläufig die Übertragungszahl K_{Po} über den Verlauf des Kühlturms, siehe Anhang D.4. Für einen Kühlturm ist dieses allerdings ein untypischer Verlauf.

Bei Aufsummierung aller gemittelten Übertragungszahlen über die gesamte Höhe ergibt sich die Übertragungszahl K_{Po} des gesamten Kühlturms, die durch die im Abschnitt 2.3 vorgestellten Messdatenauswertungsmethoden ermittelt wird. Die numerische Integration der

Übertragungszahl nach *POPPE* (siehe Gleichung 2.50) ergibt für die Messdaten einen Wert von $K_{Po} = 0,887$. Die aus der Simulation ermittelte Übertragungszahl ist $K_{Po} = 0,897$. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Der Vorteil der Simulation ist jedoch, dass für jede Zelle eine Übertragungszahl K_{Po} ermittelt werden kann. Es ist somit möglich die Prozesse innerhalb der Kühlturms zu betrachten und Bereiche entsprechend ihrer Güte zu charakterisieren. Das ist vor allem bei der Modellierung der Kühlturmeinbauten von besonderer Bedeutung.

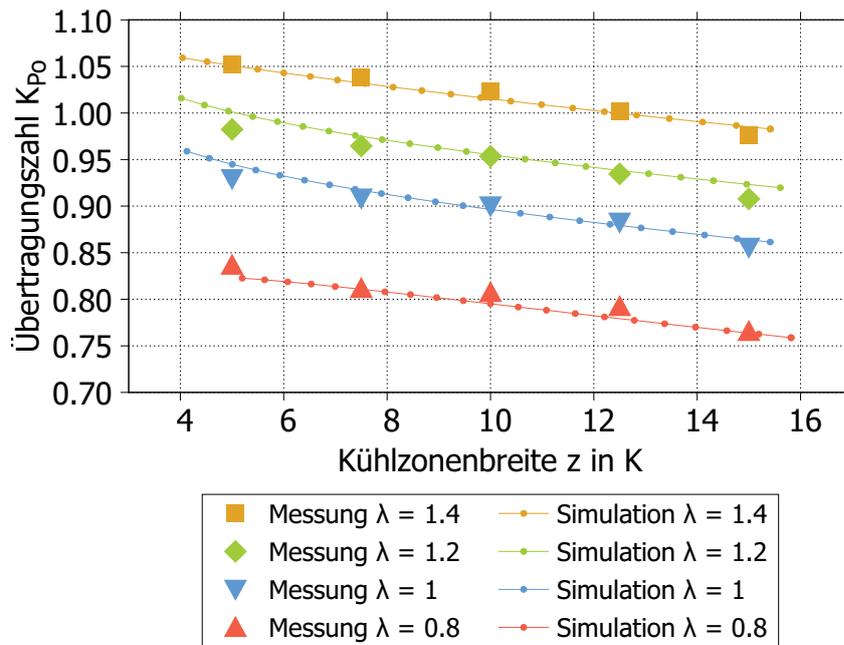
Eine genauere Ermittlung der Übertragungszahl K_{Po} ist aufgrund der feineren zweidimensionalen Bestimmung vieler lokaler Übertragungszahlen möglich. Aus diesem Grund ist die in der Simulation ermittelte Übertragungszahl K_{Po} geringfügig größer als die aus Messdaten ermittelte Übertragungszahl K_{Po} , obwohl die Ein- und Ausgangsgrößen nahezu identisch sind.

An dieser Stelle ist zu ergänzen, dass im Simulationsmodell sowohl die Übertragungszahl nach *POPPE* K_{Po} als auch nach *MEHLIG* K_{Me} (siehe Gleichung 2.49) bestimmt werden. Grundsätzlich zeigen beide die gleichen Abhängigkeiten, mit dem Unterschied, dass die Übertragungszahl nach *POPPE* K_{Po} , wie im Abschnitt 2.3 erläutert, etwas höher als die Übertragungszahl nach *MEHLIG* K_{Me} liegt. Da die Auswertung nach *POPPE* genauere Ergebnisse liefert, wird an dieser Stelle nur die Übertragungszahl nach *POPPE* K_{Po} verwendet.

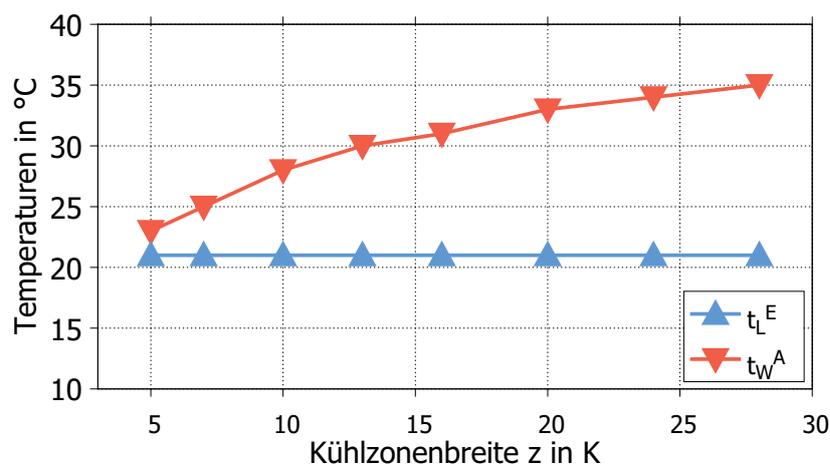
7.1.5 Einfluss der Kühlzonenbreite z

Bei der Variation der Eingangstemperaturen von dem eintretenden Wasser t_W^E wird die Abhängigkeit der Übertragungszahl K_{Po} von der Kühlzonenbreite z deutlich. Alle anderen Eingangsparameter der Simulationen wurden konstant gelassen. Es ergaben sich für jeden Punkt andere Ausgangstemperaturen für Luft t_L^A und Wasser t_W^A . Bei der Ermittlung der Übertragungszahl K_{Po} zeigte sich, dass sich auch diese geringfügig verändert. Mit steigender Kühlzonenbreite z fällt die Übertragungszahl K_{Po} ab. Dieses Verhalten konnte bereits bei Messungen beobachtet werden. Die Abbildung 7.12 zeigt die Abhängigkeit der Übertragungszahl K_{Po} von der Kühlzonenbreite z für Messungen bei unterschiedlichen Luftzahlen λ im Vergleich zur Simulation. Die aus Messdaten erstellten Funktionen können im Anhang E.6 eingesehen werden.

Aus der Abbildung 7.12 ist zu erkennen, dass die gemessene Abhängigkeit der Übertragungszahl K_{Po} von der Kühlzonenbreite z bei allen Simulationen nachgebildet werden konnte. Durch die Kalibrierung des Modells am Realsystem zeigt der *Virtuelle Kühlturm* das gleiche Verhalten wie der reale Versuchsstand. Diesem Sachverhalt ist hinzuzufügen, dass die Simulation nur an einem einzigen Punkt kalibriert wurde. Alle anderen Werte lassen sich dann berechnen, da die Transportkoeffizienten nur in geringem Maße von den Temperaturen abhängig sind.

Abbildung 7.12: Abhängigkeit der Übertragungszahl K_{Po} von der Kühlzonenbreite z

Es wird deutlich, dass die Übertragungszahl K_{Po} für verschiedene Luftzahlen λ und verschiedene Zustände abfällt. Dieses lässt sich physikalisch damit erklären, dass beim Gegenstromkühlturm bei größerer Temperaturdifferenz zwischen Wasser-Austritt t_W^A und Luft-Eintritt t_L^E die Triebkraft des Wärme- und Stoffübergangs größer ist (siehe Abbildung 7.13). Am Beispiel der Regenraummessung A sind Wassergehalt x_L^E und die Temperatur t_L^E der eintretenden Luft konstant (vergleiche Tabelle 6.1) und die Wasser-Austritts-Temperatur t_W^A steigt mit größer werdender Kühlzonenbreite z stetig an. Das bedeutet, dass bei einem besseren Wärme- und Stofftransport der Sättigungswassergehalt x_S der Luft eher im Kühlturm erreicht wird (siehe Abbildung 7.14).

Abbildung 7.13: Temperaturdifferenz zwischen Luft t_L^E und Wasser t_W^A

Obwohl die Luft auch deutlich wärmer aus dem Kühlturm austritt, ist jedoch bei größerer Kühlzonenbreite z , wie in der Abbildung 7.14 zu sehen ist, immer der Sättigungszustand der Luft x_S erreicht. Dieses dämpft den gesamten Übertragungsprozess und führt schließlich dazu, dass die Übertragungszahl K_{Po} geringfügig kleiner ist.

Eine weitere Erklärung ist der Wärmeübergang im Tropfen selbst, welcher in der Simulation und der Auswertung nach *POPPE* keine Berücksichtigung findet. Bei hohen Kühlzonenbreiten z ist es notwendig das Wasser mit hohen Temperaturen in den Kühlturm einzuleiten, um die geforderte Kühlzonenbreite z zu erreichen. Die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser steigt, wie in der Abbildung 7.13 dargestellt, mit größer werdender Kühlzonenbreite z an. Eine stärkere Kühlung des Tropfens im Randbereich führt zu einem höheren Temperaturgradienten im Tropfen selbst. Dieser wird also im Randbereich stärker gekühlt, als im Inneren. Aus diesem Grund ist die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Phasengrenze geringer, was wiederum den Wärme- und Stoffübergang dämpft. Da dieser Effekt nicht mit in die Auswertung einfließt und mit steigender Kühlzonenbreite z stärker wird, könnte dieses ebenfalls eine Erklärung für den Einfluss der Kühlzonenbreite z auf die Übertragungszahl K_{Po} sein.

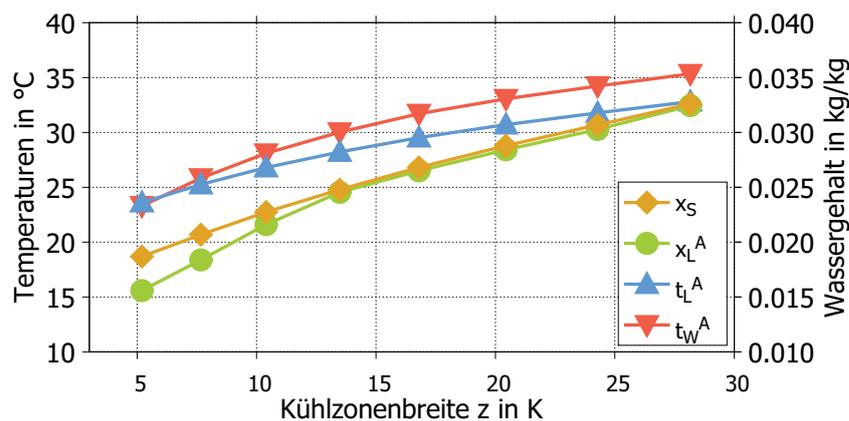


Abbildung 7.14: Verlauf der Ausgangsgrößen über der Kühlzonenbreite z

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass der Einfluss der Kühlzonenbreite z auf die Übertragungszahl K_{Po} gering, aber dennoch nachweisbar ist. Die Übertragungszahl K_{Po} ist linear proportional abhängig von der Kühlzonenbreite z . Die Steigung aller gemessenen und simulierten Verläufe ist annähernd identisch. Daraus lässt sich folgern, dass sich die Abhängigkeit der Übertragungszahl K_{Po} von der Kühlzonenbreite z gemittelt über alle untersuchten Fälle mit der folgenden Gleichung beschreiben lässt:

$$\Delta K_z = -0,0078 \cdot \frac{\Delta z}{K} \quad (7.3)$$

Der Einfluss der Kühlzonenbreite z liegt also pro Kelvin Temperaturdifferenz bei circa 0,8 %.

7.1.6 Einfluss der Luft-Eintritts-Enthalpie h_L

Der Vorteil der Simulation ist, dass ohne großen Aufwand alle Eingangsparameter verändert werden können. So kann auch der Zustand der eintretenden Luft variiert werden, was bei einer Messung sehr schwer möglich ist. Zudem können die Parameter Temperatur t_L^E und Wassergehalt der Luft x_L^E getrennt verändert und deren jeweiliger Einfluss auf die Übertragungszahl K_{Po} bestimmt werden.

Im Folgenden wird der Wassergehalt der eintretenden Luft x_L^E schrittweise verändert und für jeden Punkt die Übertragungszahl K_{Po} ermittelt. Die Luft-Eintritts-Temperatur t_L^E bleibt dabei konstant. Da sich mit der Änderung des Wassergehalts x_L^E auch die Kühlzonenbreite z leicht ändert, sind die dargestellten Übertragungszahlen K_{Po} bereits mit der vorgestellten Gleichung 7.3 korrigiert. Der Verlauf der Zustandsgrößen ist im Anhang D.5 in Abbildung 7 dargestellt.

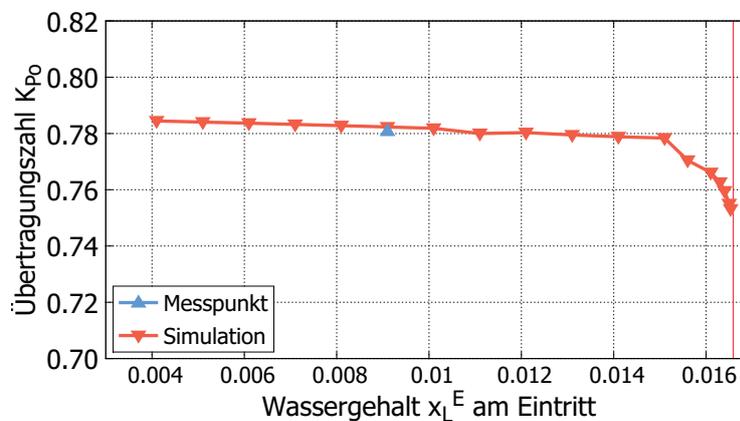


Abbildung 7.15: Verlauf der Übertragungszahl K_{Po} über dem Wassergehalt x_L^E

Die Abbildung 7.15 zeigt, dass die Übertragungszahl K_{Po} mit steigendem Eintritts-Wassergehalt x_L^E der Luft leicht abfällt. Bei einer Annäherung an den Sättigungswassergehalt x_S der Eintrittstemperatur t_L^E (rote Linie in der Abbildung 7.15) wird dieser Effekt verstärkt. Da die Differenz der Partialdrücke die treibende Kraft des Stoffübergangs ist, erscheint dieser Verlauf der Übertragungszahl K_{Po} plausibel. Die Differenz des Wassergehalts x_L bis zum Erreichen des Sättigungspunktes x_S sinkt mit steigendem Eintritts-Wassergehalt x_L^E an und somit sinkt auch die Übertragungszahl K_{Po} .

Bei Betrachtung der absoluten Werte der Übertragungszahl K_{Po} ist dieser Effekt allerdings so gering, dass hier bis kurz vor Erreichen des Sättigungspunktes x_S der jeweiligen Temperatur t_L von einer Unabhängigkeit der Übertragungszahl K_{Po} vom Wassergehalt der Luft am Eintritt x_L^E gesprochen werden kann. Ebenso verhält es sich mit der Abhängigkeit der Übertragungszahl K_{Po} von der Lufttemperatur am Eintritt t_L^E . In der Simulation wurde nach rechnerischer Eliminierung des Einflusses der Kühlzonenbreite z keine Änderung der Übertragungszahl bei Veränderung der Luft-Eintritts-Temperatur t_L^E festgestellt. Allerdings

ist der Verlauf der Zustandsgrößen – in der Abbildung 7.16 dargestellt – hier von besonderem Interesse.

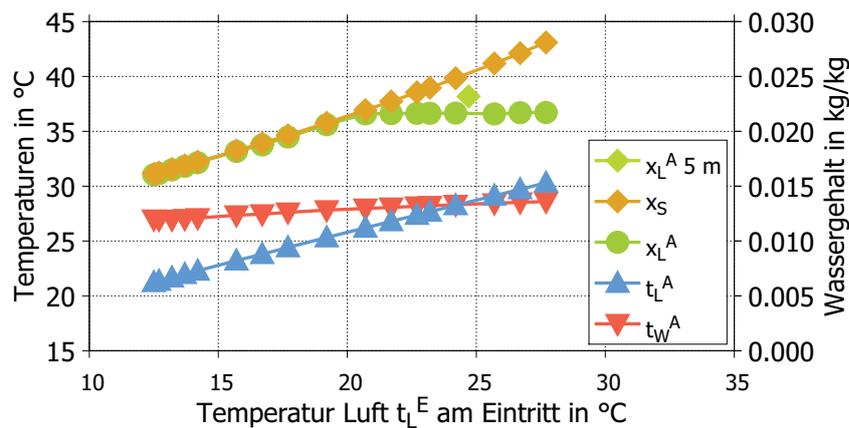


Abbildung 7.16: Verlauf der Zustandsgrößen in Abhängigkeit von der Luft-Eintritts-Temperatur t_L^E

Es ist zu erkennen, dass der Austritts-Wassergehalt der Luft x_L^A ab einer bestimmten Luft-Eintritts-Temperatur t_L^E nicht mehr den Sättigungspunkt der Austrittstemperatur $x_S(t_L^A)$ erreicht. Eine Erklärung ist, dass mit steigender Luft-Austritts-Temperatur t_L^A die Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann, jedoch die Leistungsgrenze des Kühlturms bereits erreicht ist. Die Höhe und somit die Übertragungsfläche A des Kühlturms reicht zur Sättigung der Luft nicht aus. In der Simulation lässt sich dieses leicht bestätigen, indem das virtuelle Modell des Kühlturms verlängert wird. Statt der in allen Simulationen konstanten Höhe von $h = 4200$ mm wird der Kühlturm auf eine Höhe von $h = 5000$ mm verlängert. Dadurch steigt der Austritts-Wassergehalt x_L^A weiter an (siehe Abbildung 7.16) und nähert sich somit dem Sättigungswassergehalt x_S , der aufgrund der höheren Luft-Austritts-Temperatur t_L^A etwas höher liegt. Gleichzeitig ergibt sich damit eine Steigerung der Übertragungszahl K_{Po} .

Die Ergebnisse zeigen, dass die Übertragungszahl K_{Po} von dem Zustand der eintretenden Luft nahezu unabhängig ist. Die Kühlzonenbreite z sinkt beim Verlauf des Wassergehalts x_L^E und der Luft-Eintritts-Temperatur t_L^E leicht, durch die ermittelte Gleichung 7.3 ist diese Änderung der Übertragungszahl bereits berücksichtigt. Die Übertragungszahl K_{Po} ändert sich nicht aufgrund der Enthalpieänderung der Luft Δh_L^E , sondern durch die hieraus resultierte Änderung der Kühlzonenbreite z . Wird dieser Effekt für eine genaue Bestimmung der Übertragungszahl K_{Po} mitberücksichtigt, ist der Einfluss der Luft-Eintritts-Enthalpie h_L^E auf die Übertragungszahl K_{Po} vernachlässigbar gering. Bei der Beobachtung von Messungen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen konnten ebenfalls keine Abhängigkeiten festgestellt werden. Zudem führen schon geringe Messungenauigkeiten dazu, dass die hier in der Simulation ermittelten nur sehr kleinen Änderungen nicht nachweisbar sind. Daraus lässt sich eindeutig schließen, dass für die Berücksichtigung der Enthalpieänderung der Luft Δh_L^E keine Notwendigkeit besteht. Zu der gleichen Schlussfolgerung kam auch RÜLKE bei umfangreichen Recherchen und messtechnischen Untersuchungen [93].

7.2 Simulation der Referenzeinbaus

7.2.1 Variation der Übertragungsfläche

Ein Vorteil der Simulation ist es ohne großen Aufwand geometrische Veränderungen durchzuführen und ihren Einfluss abzuschätzen. Bei Variation der gesamten wärme- und stoffübertragenden Fläche A_{ges} ist eine Veränderung der Übertragungszahl K_{Po} zu erwarten. Eine Möglichkeit die Übertragungsfläche A_{ges} zu verändern, ist die Kühleinbauhöhe h_{fill} zu variieren. Statt der üblichen zwei Lagen mit je $h_{fill} = 600$ mm wurden null bis vier Lagen des bereits in Abschnitt 6.2 vorgestellten Referenzeinbaus in den *Virtuellen Kühlturm* implementiert. Die Übertragungsfläche A kann auch durch Variation der Kanalbreite verändert werden. Durch Verkleinerung der Kanalbreite b werden mehr Kanäle in den Kühlturm integriert, durch Vergrößerung weniger. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine Veränderung der Kanalbreite Einfluss auf die Strömung im Kanal hat. Die Transportfunktionen, welche durch die Kalibrierung ermittelt wurden, besitzen dann keine Gültigkeit mehr. Aus diesem Grund ist die Veränderung der Anzahl der Einbaulagen vorzuziehen um den Einfluss der Übertragungsfläche A_{ges} zu untersuchen. Ein einfacher Vergleich mit Messdaten ist ein weiteres Argument für diese Vorgehensweise.

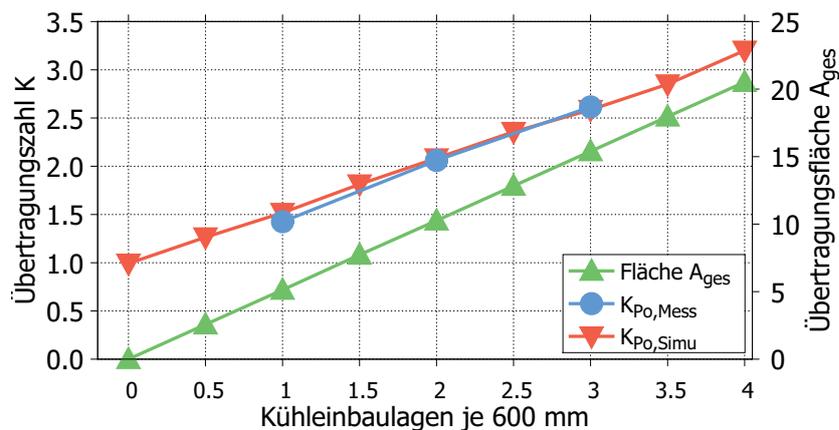


Abbildung 7.17: Übertragungszahl K_{Po} in Abhängigkeit der Kühleinbauhöhe h

Aus der Abbildung 7.17 wird deutlich, dass die Übertragungszahl K_{Po} mit steigender Einbauhöhe h_{fill} erwartungsgemäß ansteigt. Wie auch bei der Übertragungsfläche A_{ges} ist dieser Einfluss linear. Diese Aussage wird durch die aufgenommenen Messdaten gestützt. Die Steigerung der Übertragungszahl K_{Po} verläuft in der Simulation proportional zur Übertragungsfläche A_{ges} .

Es ist zu beachten, dass die beschriebene Übertragungsfläche A nicht die tatsächliche Fläche des Kühleinbaus ist. Mit anderen Randbedingungen, beispielsweise einer anderen Übertragungsfläche pro Zelle oder anderen Transportkoeffizienten resultiert eine andere Übertragungsfläche A_{ges} .

7.2.2 Bewertung einzelner Zonen im Kühlturm

Aus der Simulation des kompletten Kühlturms lassen sich die Einflüsse der einzelnen Zonen sehr gut ableiten. In der Abbildung 7.18 ist der Verlauf der horizontal gemittelten Übertragungszahl K_{Po} im Kühlturm mit zwei Lagen des Referenzeinbaus zu erkennen.

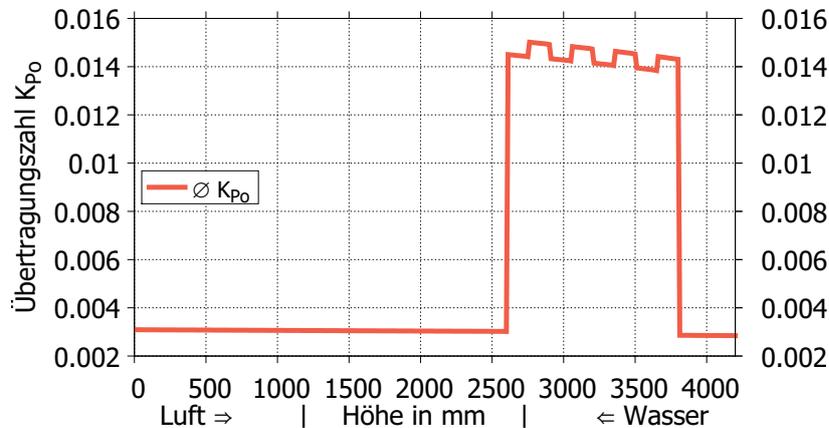


Abbildung 7.18: Verlauf der Übertragungszahl im Kühlturm mit zwei Lagen Referenzeinbau

Der Bereich des Einbaus hebt sich durch höhere Übertragungszahlen K_{Po} deutlich vom Rest des Kühlturms ab. Wie schon bei der Übertragungszahl K_{Po} des Regenraums festgestellt wurde, ist auch hier ein leichtes Abfallen der Übertragungszahl K_{Po} mit Fortschreiten der Luft im Kühlturm zu beobachten. Es ist durch den trapezförmigen Verlauf der Übertragungszahl K_{Po} im Bereich des Kühleinbaus zu erkennen, dass die einzelnen Bereiche eine unterschiedliche Anzahl an Kanälen aufweisen. Die Ebenen, die einen Kanal mehr besitzen, haben auch eine größere Übertragungszahl K_{Po} .

Um die Abgrenzung der einzelnen Zonen zu verdeutlichen, zeigt die Abbildung 7.19 den Einfluss der Versprühzone und der Regenzone im Vergleich zum Struktureinbau.

Wie bereits festgestellt, hat der Kühleinbau betragsmäßig den größten Anteil an der Übertragungszahl K_{Po} . Aus den Werten für die Regenzone lässt sich eine Übertragungszahl pro Meter Regenzone K_R ermitteln. Die Regenzone der aktuellen Simulation wurde schrittweise verändert, so dass der Einfluss der Regenzone deutlich wurde.

Aus der Abbildung 7.20 geht hervor, dass sich die Übertragungszahl der Regenzone $K_{Po,R}$ mit steigender Länge linear vergrößert. Die Ergebnisse zeigen eine geringe Abweichung zu früheren Untersuchungen von *GNAUCK*. Diese ergaben keinen linearen Einfluss der Regenzone auf die Übertragungszahl K_{Po} . Die Ergebnisse der damals durchgeführten Untersuchungen basieren allerdings nur auf drei Messpunkten, von denen der mittlere von *GNAUCK* selbst als Messfehler beschrieben wurde. Von einer genauen Bestimmung des Einflusses kann in diesem Fall nicht ausgegangen werden. Die Ergebnisse aus der Simulation sind eindeutig und passen zu den bisher ermittelten Übertragungszahlen, die durch Messungen bestätigt wurden.

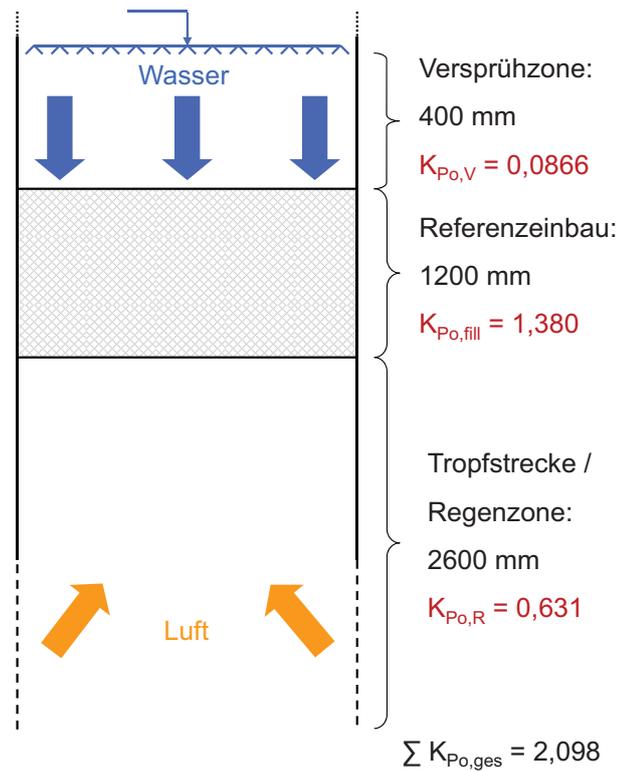
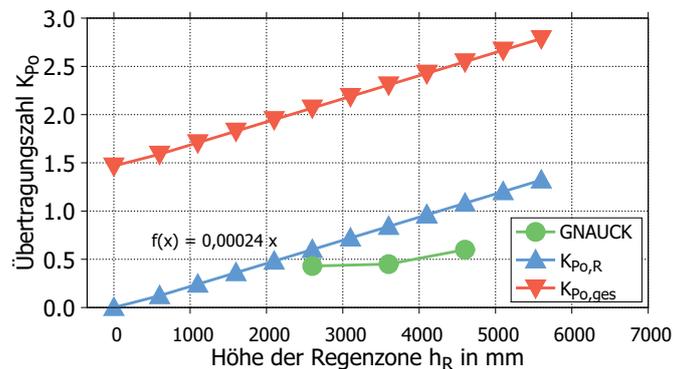


Abbildung 7.19: Einfluss der einzelnen Zonen

Abbildung 7.20: Einfluss der Höhe der Regenzone h_R

Es kann basierend auf den Simulationsergebnissen folgende lineare Funktion für den Einfluss der Höhe der Regenzone h_R aufgestellt werden:

$$\Delta K_R = 0,24 \cdot \frac{\Delta h_R}{m} \quad (7.4)$$

Es konnte der Einfluss der Höhe der Regenzone h_R auf die Übertragungszahl K_{Po} genau bestimmt werden. Mit zunehmender Höhe der Regenzone h_R steigt die Übertragungszahl K_{Po} entsprechend der Gleichung 7.4.

8 Diskussion

8.1 Versuchsbegleitende Simulation und Anforderungen an entsprechende Simulationsmodelle

Mit einem mathematischen Simulationsmodell, welches die Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge im Kühlturm darstellt, soll die Einsparung von Versuchen ermöglicht werden. Durch die Kombination mit Messungen soll das Simulationsmodell validiert werden. Ein so kalibriertes System zeigt qualitativ und quantitativ das gleiche Verhalten wie der reale Kühlturm.

Mit diesem Vorgehen sind bei konstanten Strömungsbedingungen weitere Untersuchungen möglich, ohne dafür Versuche am Realsystem durchführen zu müssen.

Daneben soll das Modell geeignet sein, Eingriffs- und Entwicklungsmöglichkeiten aufzudecken, die im Betrieb am Versuchskühlturm verwehrt sind. Beispielsweise soll der Einblick in das Innere des Kühlturms möglich sein, um lokale Zustandsgrößen und Übertragungszahlen K zu bestimmen.

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen für das Simulationsmodell:

- Das Modell soll struktur- und verhaltensgültig sein und dabei empirische Gültigkeit aufweisen [3].
- Ein entsprechendes Simulationsmodell soll in angemessener Berechnungszeit (maximal zwölf Stunden) auf Computern aus dem Consumer-Segment Ergebnisse liefern.
- Dabei soll gegenüber der Messung am realen Versuchsstand ein Mehrwert an Informationen geliefert werden.
- Zudem soll durch eine flexible Gestaltung der Struktur und der Randbedingungen in kürzerer Zeit eine Vielzahl an Untersuchungen ermöglicht werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden hierzu CFD-Modelle und ein gleichungsorientiertes Modell hinsichtlich ihrer Eignung zur Lösung dieser Zielstellung vorgestellt und kritisch untersucht.

8.2 Eignung und Validität von CFD-Modellen

Die Bearbeitung dieser Problemstellung mit der CFD-Software ANSYS CFX stellte sich als sehr aufwändig heraus. Die Abbildung der Durchströmung des Kühlturms lässt sich nur als Strömungsproblem formulieren.

Nur mit sehr vielen Vereinfachungen ist es gelungen ein numerisch stabiles Modell des Kühlturms zu erstellen. Aufgrund dieser Vereinfachungen wurden mit der Simulation nur geringe Genauigkeiten im Vergleich mit den Messdaten erzielt.

Es ist zwar möglich, die grundsätzlichen Prozesse des Verdunstungsprozesses darzustellen, allerdings kann die Simulation mit ANSYS CFX den Stoffübergang nur mit großem Aufwand und nur in eine Richtung beschreiben. Eventuell auftretende Kondensationseffekte können bei den Modellen für den Verdunstungsvorgang nicht mit berücksichtigt werden. Dabei sind die Rechenzeiten der Simulationen mit realen Abmessungen in ANSYS CFX mit $\tau = 20 - 30$ h sehr hoch.

Für das Ziel versuchsbegleitende Simulation ist CFD-Software somit nicht geeignet. Durch die aufgezwungene Strömungssimulation der Software erfordert die Modellerstellung und Lösung zu viel Aufwand.

Zudem sind für ein Modell mit ausreichender Genauigkeit nur wenige Vereinfachungen zugelassen, was die Berechnung zusätzlich erschwert. Die Darstellung von Struktureinbauten in dem dreidimensionalen Modell ist nur über Ersatzmodelle möglich. Für eine exakte Modellierung ist die Geometrie zu komplex.

Aus diesen Gründen ist die versuchsbegleitende Simulation mit CFD-Software nicht zweckmäßig und somit nicht zu empfehlen.

8.3 Eignung und Validität des vorgestellten Modells

8.3.1 Gleichungsorientierte Simulation

Das verwendete Modellkonzept basiert auf der Trennung von Funktion und Struktur, um die vielen Bilanzgleichungen und deren komplexe Kopplungen handhabbar zu machen.

Trotz des Verzichts einer Strömungssimulation ist die Modellerstellung sehr aufwändig. Ein Modell, welches alle physikalisch möglichen Prozesse im Kühlturm darstellt, erfordert eine aufwändige mathematische Behandlung. Die nichtlinearen Vorgänge der Verdunstung erschweren eine einfache Lösung.

Für die Modellerstellung wurden Ansätze aus der Systemtechnik (Netzwerkbeschreibung, Trennung von Struktur und Funktion, Graphentheorie) genutzt [59]. Im Allgemeinen ist die Systemtheorie für nichtlineare Systeme wesentlich komplexer als die Systemtheorie für lineare Systeme. Zudem lassen sich Ansätze der linearen Systemtheorie nicht direkt

auf nichtlineare Systeme anwenden. Das Modellkonzept, basierend auf der Trennung von Funktion und Struktur, stellte sich als geeignetes Mittel heraus, dieses Problem zu lösen.

Bei nichtlinearen Problemstellungen kann die Funktion oft vor der Berechnung am Berechnungspunkt linearisiert werden, indem das nichtlineare Modell durch ein lineares Modell approximiert wird [94]. Die Linearisierung der Zustandsgleichung ergibt unter der Annahme, dass alle partiellen Ableitungen existieren, die *JACOBI*-Matrix.

Die Funktionalität ist aufgrund des Verdunstungsvorgangs ein nichtlinearer Vorgang. Die Ausgangsgrößen verhalten sich abhängig von den eingehenden Zustandsgrößen nicht proportional. Insbesondere das Erreichen des Sättigungspunktes stellt eine Unstetigkeit in der Funktion dar [3]. Die Komplexität der Berechnung hängt stark von der Nichtlinearität der einzelnen Zellen ab [95].

Bei der aktuellen Problemstellung bedeutet dieses, dass die aufzustellende Funktion keine konstanten Koeffizienten besitzt und diese immer wieder angepasst werden müssen. Zielsetzung der Arbeit war die Modellierung eines nichtlinearen Systems mit Hilfe lokal gültiger linearer Ansätze, deren Verhalten bei nur kleinen Abweichungen vom Berechnungspunkt dem des nichtlinearen Systems entspricht. Auf diese Weise gelang es, Methoden für lineare Systeme auf ein nichtlineares Gesamtsystem, bestehend aus vielen Teilsystemen, anzuwenden und die Vorteile der mathematischen Handhabung linearer Systeme zu nutzen [91].

Die unabhängige Behandlung der nichtlinearen, funktionellen Vorgänge der Wärme- und Stoffübertragungsprozesse in einer Modellzelle lässt eine Lösung für jede Bilanzzelle zu. Durch Zusammenführung mit dem linearen Strukturmodell ergibt sich ein Gesamtmodell, welches sich numerisch lösen lässt. Dabei ist eine rein iterative Lösung nur durch wieder Einsetzen nicht möglich. Erforderlich ist daher eine gezielte Iterationsstrategie. Das bekannte *NEWTON*-Verfahren erwies sich hierfür als geeignet.

8.3.2 Validität des Modells *Virtueller Kühlturm*

Nach der Kalibrierung des Modells am Realsystem wird eine sehr hohe Genauigkeit der Simulation erreicht. Bei der Untersuchung verschiedener Zustände des Kühlturms zeigen die Ergebnisse eine sehr gute qualitative und quantitative Übereinstimmung zu den am Versuchskühlturm gemessenen Ausgangsgrößen. Das macht deutlich, dass nach anfänglicher Kalibrierung das Simulationsmodell verschiedene Betriebszustände des Kühlturms darstellen kann. Kleine Abweichungen sind auf die nicht immer exakt gleichen Masseströme von Wasser \dot{m}_W bei den Versuchen zurückzuführen.

Mit den aufgestellten Transportfunktionen ist es möglich, weitere Zustände zu untersuchen, ohne dafür Versuche durchführen zu müssen. Das Modell kann das Verhalten des Versuchskühlturms mit hoher Genauigkeit vorhersagen. Bei einer ungefähren Messdauer

von einer Stunde pro Messpunkt (um einen stationären Zustand zu erreichen) spart die Simulation Ressourcen und erheblichen Aufwand im Versuchsbetrieb.

Es ist in weiterführenden Untersuchungen gelungen, für eine konstante Regendichte r Funktionen für die Transportkoeffizienten in Abhängigkeit von der Luftzahl λ aufzustellen. Alle gemessenen Abhängigkeiten wie beispielsweise die Abhängigkeit der Übertragungszahl K_{Po} von der Kühlzonenbreite z konnten durch das Modell bestätigt werden. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Luft-Eintritts-Enthalpie h_L^E keinen Einfluss auf die Übertragungszahl K hat.

Die in der Simulation ermittelten Übertragungszahlen K decken sich mit den aus den Messdaten berechneten Übertragungszahlen K . Es ist möglich, den Verlauf der Übertragungszahl K und aller anderen Zustandsgrößen von Luft und Wasser auch innerhalb des Kühlturms darzustellen.

Bei der Simulation des Referenzeinbaus war die Nachbildung eines aus Messungen bekannten Kühlturmeinbaus erfolgreich. Um den Verlauf der Übertragungszahl K_{Po} aufgetragen über der Luftzahl λ für den Referenzeinbau zu ermitteln, müssen weitere Punkte kalibriert und für den Einbau die Transportgrößen aufgestellt werden. Es ist zu vermuten, dass auch diese über Funktionen beschrieben werden können. Bei einem Test mit den Transportfunktionen des Regenraums konnten jedoch nur ungenaue Ergebnisse erzielt werden, da die Steigung der Übertragungszahl des Einbaus K_{Po} gegenüber der des Regenraums variiert.

Nach Variation der Übertragungsfläche A konnte ein direkter Zusammenhang zur Übertragungszahl K_{Po} aufgezeigt werden. Des Weiteren konnte so der Einfluss der einzelnen Zonen des Kühlturms ermittelt werden. Insbesondere der Einfluss der Regenzone zeigt bei der Vergrößerung eine lineare Steigerung der Übertragungszahl K .

Bei der Simulation von Struktureinbauten mit schrägen Kanälen (Typ *Cross Corrugated Foil Fill*) zeigten sich Probleme in der Berechnung. Aufgrund der Tatsache, dass durch die schrägen Kanäle in vereinzelt Zellen kleine Luftmassenströme \dot{m}_L auf große Wassermassenströme \dot{m}_W treffen, wird in diesen Zellen sehr schnell der Sättigungswassergehalt x_S erreicht. Dieses führte zu großen Gradienten in den Koeffizientenmatrizen und schließlich zum Absturz aller implementierten Solver. Für eine Lösung können weitere Solver, beispielsweise die QR-Zerlegung oder das *KRYLOW*-Unterraum-Verfahren, untersucht werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Gleichungssystem vor der Lösung so zu manipulieren, dass diese Effekte verhindert werden.

Es stellten sich ebenso Probleme bei früh gesättigten Luftzuständen innerhalb des Kühlturms ein. Bei Sättigung der Luft am Ende des Kühlturms rechnete das Modell stabil und korrigierte sich über die *JACOBI*-Matrix automatisch. Bei Luftzuständen, die schon kurz nach Eintritt der Luft in den Kühlturm gesättigt waren, kam es zu numerischen Instabilitäten. Es wurde versucht dieses mittels einer Korrekturfunktion abzufangen, jedoch führte das nur zu einer geringen Verbesserung.

Die Ergebnisse aller Untersuchungen zeigen, dass das erstellte Modell grundsätzlich geeignet ist die wesentlichen Vorgänge des Kühlprozesses wiederzugeben. Eine aufwändige Strömungssimulation mit Grenzschichtbetrachtung ist für die vorliegende Problemstellung nicht notwendig und unzweckmäßig.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modellkonzept *Virtueller Kühlturm* wurde durch seine Anwendung auf den Versuchskühlturm der Technischen Universität Dresden validiert. Die quantitative und qualitative Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messdaten am Versuchskühlturm ist sehr gut.

8.3.3 Rechentechnische Umsetzung und Rechenzeiten des Modells

Durch die Anwendung speicheroptimierter Methoden ist es gelungen, auch größere Modelle zu erstellen und diese handhabbar zu machen. Durch die Listenspeicherung werden nur Werte ungleich null gespeichert. Aufgrund der Diagonaldominanz der Koeffizientenmatrizen spart dieses Speicherplatz und beschleunigt die Berechnung.

Die zweidimensionale Modellierung des Kühlturms ermöglicht es, horizontale Gradienten aller Parameter zu modellieren. Damit ist es auch möglich, ungleichmäßig verteilte Masseströme \dot{m} , Temperaturen t und einen nicht gleichmäßigen Wassergehalt x_L zu implementieren und die Auswirkungen auf den Kühlprozess zu simulieren. Ebenso können Struktureinbauten, deren Aufbau nicht horizontal symmetrisch ist, erstellt werden.

Theoretisch ist auch eine dreidimensionale Modellierung des Kühlturmprozesses möglich. Allerdings muss dafür das gesamte Modell angepasst werden, was jedoch aufgrund der Netzstruktur mit relativ geringem Aufwand realisierbar wäre. Dabei wird die Strukturerstellung wesentlich komplexer. Der gravierendste Aspekt ist jedoch die signifikante Erhöhung der Systemgröße und somit der Rechendauer. Sinnvoller ist eine weitere Beschleunigung des Modells, beispielsweise durch Auslagerung von Routinen in DLLs in C++, um die mögliche Zellenanzahl zu vergrößern. Dieses ermöglicht es die Struktur des Einbaus noch detaillierter abzubilden. Es kann dabei insbesondere auf sehr kleine Details – zum Beispiel Wellen in der Folie, aus der die Einbauten gefertigt werden (Mikrowellen) – in der Einbaugeometrie eingegangen werden. Erfahrungen mit anderen Simulationsprogrammen haben gezeigt, dass die Rechenzeit dadurch bis auf ein Drittel der ursprünglichen Rechenzeit reduziert werden kann. Zudem ist es mit DLLs in C++ möglich, einzelne Routinen zu parallelisieren. Das bedeutet, es kann auf mehr als nur einem Prozessorkern gerechnet werden. Auf diese Weise ist eine weitere Beschleunigung der Berechnung möglich.

Ziel der hier vorgestellten zweidimensionalen Modellerstellung ist es, mit akzeptablem Aufwand erkenntnisreiche Ergebnisse zu erzielen. Dabei sollen Computer aus dem Consumer-Segment für die Berechnung ausreichend sein. Als maximal vertretbare Rechenzeit werden Simulationen mit circa zwölf Stunden Rechenzeit angesehen. Die Dauer der Simulation hängt signifikant von der Modellgröße und somit von der Anzahl der Zellen ab.

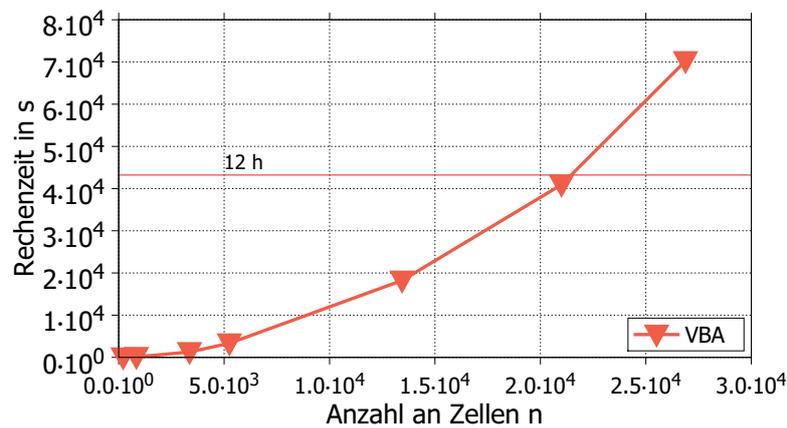


Abbildung 8.1: Abhängigkeit der Rechenzeit in VBA von der Zellenanzahl n

Zur Anwendung kam unter anderem ein *Intel® Core™ i7-980X @ 3,33 GHz Prozessor* (single Core), der sich im gehobeneren Bereich der Consumer-Computer einordnet. Aus der Abbildung 8.1 geht hervor, dass bei circa 3.500 Zellen, die in den meisten Untersuchungen des Regenraums zur Anwendung kamen, die Berechnungszeit mit weniger als $\tau = 30$ min deutlich unter der gelegten Grenze liegt. Die Simulation des Referenzeinbaus lag mit circa $\tau = 18$ h über der festgelegten Zeitspanne, jedoch konnte die Rechenzeit durch das reduzierte Modell des Referenzeinbaus auf $\tau = 6$ h verbessert werden. Vorschläge für eine weitere Beschleunigung der Berechnung wurden in diesem Abschnitt bereits gegeben.

Für eine Kalibrierung des Modells ist es notwendig, 50 – 100 Simulationsläufe durchzuführen. Die Kalibrierung stellt daher den größten Aufwand bei den Untersuchungen dar. Mit den aufgestellten Funktionen für die Transportgrößen ist eine Kalibrierung für den Regenraum jedoch nur selten notwendig, in einigen Fällen aber nicht zu vermeiden. Für jeden Einbau muss eine Kalibrierung durchgeführt werden. Nach der Ermittlung der Transportkoeffizienten sind, wie in Abschnitt 7.2 gezeigt wurde, in kurzer Zeit viele weitere Untersuchungen möglich.

8.3.4 Vergleich der Modellansätze *Virtueller Kühlturm* mit bekannten Berechnungsmethoden

Zu beachten ist, dass die in Kapitel 2.3 vorgestellten Verfahren, unter anderem von *MERKEL*, *MEHLIG* und *POPPE*, Auswertemethoden für Messdaten des Versuchskühlturms sind. Sie ermitteln über Näherungsverfahren die Übertragungszahl K des Kühlturms. Es werden die Ausgangsgrößen gemessen, im Gegensatz dazu werden am erstellten Zellenmodell die Ausgangsgrößen selbst berechnet. Die Gegenüberstellung der Methoden dient lediglich der Diskussion der getroffenen Vereinfachungen.

Bei Betrachtung der „erweiterten Hauptgleichung“ (Gleichung 2.40) wird deutlich, dass nur der wasserseitige Wärmeübergang innerhalb eines Tropfens vernachlässigt wird. Es

wird die verdunstete Wassermenge berücksichtigt und ein *LEWIS*'scher-Faktor ungleich eins ist möglich. Dieses entspricht im Wesentlichen den Vereinfachungen, die auch *POPPE* (vergleiche Abschnitt 2.3.6) in seiner Berechnungsmethodik zu Grunde gelegt hat.

In der nachfolgenden Tabelle 8.1 sind die Bilanzgleichungen der gängigen Auswertemethoden von *POPPE* und *MEHLIG* dem im Zellenmodell verwendeten Ansatz gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass neben den gleichen Annahmen wie *POPPE*, auch die im Zellenmodell verwendeten Bilanzen im Wesentlichen denen von *POPPE* entsprechen. Ein Unterschied in der Bilanz besteht bei der Bestimmung der Verdampfungsenthalpie. Im Zellenmodell wird die Verdampfungsenthalpie des Wassers bei der Grenztemperatur $t_G = t_W$ verwendet. Das entspricht dem Ansatz nach *HAUENSCHILD* [11], nach dem auch *KLENKE* [10] und *MEHLIG* [32] rechnen.

Tabelle 8.1: Vergleich der unterschiedlichen Bilanzen der Methoden

| Enthalpiebilanz Wasser | <i>MEHLIG</i> | <i>POPPE</i> | <i>ZELLENMODELL</i> |
|---------------------------|-----------------------------|--|--|
| mit $\dot{m}_W dh_W =$ | $d\dot{Q} + d\dot{m}_D h_D$ | $d\dot{Q} + d\dot{m}_D h_D - h_W d\dot{m}_D$ | $d\dot{Q} + d\dot{m}_D h_D - h_W d\dot{m}_D$ |
| $d\dot{Q} =$ | $\alpha (t_G - t_L) dA$ | $\alpha (t_G - t_L) dA$ | $\alpha (t_G - t_L) dA$ |
| $d\dot{m}_D =$ | $\sigma (x_G - x_L) dA$ | $\sigma (x_G - x_L) dA$ | $\beta_p (p_{H_2O,G} - p_{H_2O,L}) dA$ |
| $h_D =$ | $\Delta h_{v,0}$ | $\Delta h_{v,0} + c_{pD} \cdot t_W$ | $\Delta h_{v,G}$ |

Neu an der Betrachtung ist, dass nicht der gesamte Kühlturm eindimensional als Gesamtbilanzzelle betrachtet wird, sondern der Kühlturm aus einer Vielzahl von gekoppelten diskreten Bilanzzellen erstellt wird. Das Zellenmodell liefert für jede Zelle deren Zustandsgrößen, aus denen dann lokale Übertragungszahlen K berechnet werden. Dieses ermöglicht eine deutlich genauere Betrachtungsweise des Kühlprozesses. Der Kühlturm wird „gläsern“.

8.4 Übertragbarkeit auf weitere Prozesse

Durch den modularen Aufbau des Simulationsmodells ist eine Erweiterung mit relativ wenig Aufwand möglich. Mittels der Verschaltung der Zellen über strukturbeschreibende Matrizen sind, neben der vorgestellten Referenzgeometrie, auch weitere Geometrien realisierbar. Eine Änderung der Strömungsführung ist durch eine angepasste Verschaltung der Zellen möglich. Damit ist es denkbar, ebenso Kühltürme mit Kreuzstromführung zu untersuchen.

Weiterhin können Prozesse der Trockenkühlung simuliert werden. Bei einem Stoffübertragungskoeffizienten von $\beta = 0$ m/s wird nur der konvektive Wärmeübergang berechnet. Durch einen Verteilungskoeffizienten des Wasser von $x_{vk} = 0$ ist die Darstellung von Rohren möglich. Es kann ein äquivalenter Wärmeübergangskoeffizient bestimmt werden oder das Modell anhand von Messungen kalibriert werden.

Grundsätzlich bietet die Beschreibung des gekoppelten Wärme- und Stoffübergangs im Zellenmodell die Möglichkeit alle Phasenübergänge zwischen Luft und Wasser mit hoher Genauigkeit wiederzugeben. Liegen Stoffdatenfunktionen vor, ist die Berechnung mit anderen Stoffen ebenso realisierbar. Das in Kapitel 5.3 gezeigte Vorgehen für das Zellenmodell sieht den Fall der Unterschreitung des Gefrierpunktes nicht vor. Das könnte jedoch modelltechnisch ergänzt werden.

9 Zusammenfassung

9.1 Fazit

Die Weiterentwicklung von Kühlturmeinbauten und die Untersuchung der den Kühlprozess beeinflussenden Faktoren erfolgt bisher nur empirisch, was eine Vielzahl von Versuchen notwendig macht. Die Fertigung von Kühleinbau-Prototypen und deren Vermessung im Versuchskühlturm ist zeit- und kostenintensiv. Die numerische Simulation des Kühlprozesses kann diese Messungen unterstützen und so helfen, eine Vielzahl an Versuchen einzusparen. Die Simulation wird dabei Messungen nicht komplett ersetzen können. Es scheint möglich, für eine bestimmte Regendichte r mit nur wenigen gemessenen Luftzahlen λ die übrigen Werte über das Simulationsmodell zu ermitteln. Dieses Vorgehen kann bei der Untersuchung von bisher unbekanntem Einbauten Versuche einsparen. Des Weiteren können mit einem kalibrierten Modell weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Beispielsweise ist es möglich, die Eingangstemperaturen von Wasser t_W^E zu variieren, um so den Einfluss der Kühlzonenbreite z zu ermitteln, ohne Versuche durchführen zu müssen. Zudem kann der Einfluss mehrerer Lagen eines im Kühlturm installierten Struktureinbaus ermittelt werden, ohne diese selbst zu vermessen.

In dieser Arbeit wurden zwei unabhängige Ansätze der numerischen Simulation hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf diese Problemstellung untersucht.

CFD-Simulationssoftware wie beispielsweise ANSYS CFX kann zwar den grundlegenden Prozess der Verdunstungskühlung modellieren, jedoch ist ein Stoffübergang nur in eine Richtung möglich. Geometrische Vereinfachungen bewirken in der Strömungssimulation erhebliche Einschränkungen. Simulationen des Kühlturms mit ANSYS CFX sind aufwändig und kostenintensiv (Fachpersonal, Rechenkapazitäten und Lizenzkosten). Bei der durchgeführten Untersuchung (vergleiche Kapitel 4) konnten keine validen Ergebnisse erzielt werden.

Die Untersuchungen mit dem vorgestellten Modell *Virtueller Kühlturm* haben gezeigt, dass ein vereinfachtes Modell schnell und zuverlässig die Einflüsse veränderter Parameter abschätzen kann. Eine komplexe Strömungssimulation ist für aussagekräftige Ergebnisse nicht notwendig.

Ein kalibriertes Modell liefert eine sehr gute quantitative und qualitative Übereinstimmung mit den Messdaten des Versuchskühlturms, welches auch für andere Betriebspunkte Validität aufweist. Die funktionale Abhängigkeit der Transportkoeffizienten von der Strö-

mungsgeschwindigkeit kann durch empirisch ermittelte Gleichungen dargestellt werden. Grundsätzlich ist es möglich, diese Abhängigkeit in das Modell zu implementieren.

In der vorliegenden Arbeit wurde die methodische Entwicklung eines Simulationsprogramms für die Untersuchung des Kühlprozesses vorgestellt. Für die Entwicklung wurden allgemeine Methoden der gleichungsorientierten Simulation technischer Systeme verwendet. Die physikalischen Prozesse wurden in einer Modellzelle – *Zellenmodell* – mit einem gekoppelten Modell für Wärme- und Stoffübertragung realisiert. Die formale Beschreibung und Verschaltung vieler *Zellenmodelle* über strukturbeschreibende Matrizen stellt das Gesamtmodell – *Virtueller Kühlturm* – dar.

Die mathematischen Modelle sind auf handelsüblichen Consumer-Computern in für eine versuchsbegleitende Simulation geeigneten Rechenzeit lösbar.

Das Modell ermöglicht es, alle Zustände von Wasser und Luft innerhalb und am Austritt des Kühlturms zu bestimmen. Auf diese Weise wurde der Zustand der Luft und der Verlauf der Übertragungszahl K im Kühlturm untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Kühlzonenbreite z auf die Übertragungszahl K nicht vernachlässigbar ist. Hingegen hat die Enthalpie der Luft am Eintritt h_L^E nahezu keinen Einfluss auf die Kühlleistung.

Es ist gelungen, mit dem Modell einen Referenzeinbau darzustellen und den Einfluss der Übertragungsfläche A zu ermitteln. Des Weiteren konnten die einzelnen Zonen des Kühlturms charakterisiert und deren Einfluss bestimmt werden.

9.2 Ausblick

Für eine Weiterentwicklung des vorgestellten Modells sollte zunächst ein Schwerpunkt darauf gelegt werden, die bei früher Sättigung auftretenden, numerischen Instabilitäten abzufangen. Dieses bildete bisher die Hauptschwierigkeit bei der Simulation von Struktureinbauten mit schräger Kanalführung. Damit wäre es möglich, eine Vielzahl verschiedener Struktureinbauten zu simulieren und miteinander zu vergleichen.

Bei der versuchsbegleitenden Simulation ist der Regenraum für die Regendichte $r = 12 \frac{\text{t}}{\text{m}^2 \text{h}}$ über die Transportfunktionen in ein universell kalibriertes Modell überführt worden, welches für verschiedene Luftzahlen λ die Übertragungszahlen K vorhersagen kann. Das spart Zeit und Ressourcen im Versuchsbetrieb bei Untersuchungen des Regenraums.

Bedarf besteht bei Untersuchungen von weiteren Regendichten r . Dieses wurde in der vorliegenden Arbeit nur zum Teil betrachtet. Es wurde aufgezeigt, dass die aufgestellten Funktionen für die Transportgrößen nur für eine Regendichte r gelten. Es wäre also möglich für weitere Regendichten derartige Funktionen zu ermitteln und so die Abhängigkeit des Massestroms der Luft \dot{m}_L und des Wassers \dot{m}_W in das Modell zu implementieren. Die dazu

nötigen Messungen konnten im Rahmen dieser Arbeit nur für einige Punkte durchgeführt werden.

Von Interesse ist ebenfalls die Übertragung des Modellansatzes auf ähnlich gelagerte Problemstellungen. Insbesondere wäre hier die Anwendung auf Kreuzstromkühltürme und Prozesse der Trockenkühlung denkbar.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2009 bis 2014 am Institut für Energietechnik der Technischen Universität Dresden an der Professur für Technische Thermodynamik. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. rer. nat. habil. Cornelia Breitkopf sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Olaf Strelow für die Betreuung dieser Arbeit durch zahlreiche wertvolle Hinweise und Ratschläge.

Ich danke Prof. Dipl.-Ing. Reinhold Altensen für die langjährige Unterstützung und die erfolgreiche Vermittlung nach Dresden. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Jens Meinert, Dipl.-Ing. Matthias Mischke, Dipl.-Ing. Lars Schinke sowie dem gesamten Team der Technischen Thermodynamik, die mich immer unterstützt haben und mir es ermöglichten in Dresden zu promovieren.

Prof. Dr.-Ing. Gerald Kunz und Dipl.-Ing. (FH) Leo Keilmann möchte ich besonders für viele spannende Diskussionen, Anregungen und sehr viel Geduld danken. Viel Wissen aus der Praxis habe ich von Dr.-Ing. Andreas Streng, Dr.-Ing. Falk Mohasseb und Jürgen Hellmold erhalten, meinen herzlichen Dank dafür.

Des Weiteren geht mein Dank an zahlreiche studentische Hilfskräfte, die mich bei unzähligen Messungen am Versuchskühlturm sowie durch Beleg- und Studienarbeiten unterstützt haben (in alphabetischer Reihenfolge): Eric Bach, Max Bachmann, Christoph Dreyer, Konrad Friedrich, Sebastian Günther, Tim Hartwig, Felix Hennig, Tobias Kämmerer, Enrico Klausner, Benjamin Müller, Nico Neubrand, Philipp Pietsch, Leonard Rohde, Andre Röth und Simon Stephan.

Mein herzlicher Dank gilt nicht zuletzt meiner Lebensgefährtin Julia und meiner Familie, die mir bei der Anfertigung dieser Arbeit zur Seite standen und mich stets bei allen meinen Vorhaben unterstützten.

Literaturverzeichnis

- [1] Merkel, Friedrich: *Verdunstungskühlung*. VDI Verlag Berlin GmbH, 1925
- [2] Imboden, Dieter ; Koch, Sabine: *Systemanalyse / Einführung in die mathematische Modellierung natürlicher Systeme*. Springer-Verlag, 2005 (ISBN: 978-3642628788)
- [3] Bossel, Harmut: *Systeme Dynamik Simulation - Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*. Books on Demand GmbH, 2004 (ISBN: 3-8334-0984-3)
- [4] Krabbe, Hans-Jürgen: Kühlkreisläufe im fossil gefeuerten Kraftwerken - Eine Übersicht. In: *Tagungsunterlagen VDI Wissensforum: Kühlkreisläufe im Kraftwerk, Mannheim, 2013*
- [5] Roth, Manfred: Auslegungskriterien für Nasskühltürme in Kraftwerken. In: *Tagungsunterlagen VDI Wissensforum: Kühlkreisläufe im Kraftwerk, Mannheim, 2013*
- [6] Streng, Andreas: *CTS Cooling Tower Solutions GmbH*. Düsseldorf, April 2014
- [7] Kröger, Detlef G.: *Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers - Volume I*. PennWell, 2004 (ISBN: 0-87814-896-5)
- [8] Mollier, Richard: Das h,x-Diagramm für DampfLuftgemische. In: *ZVDI Volume 73 (1923)*, S. 1009–1013
- [9] Breitkopf, Cornelia: Formelsammlung. In: *Technische Thermodynamik / Energielehre, Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Technische Thermodynamik Volume 9 (2011)*, S. 29
- [10] Klenke, Werner: *Die Wärme- und Stoffübertragung bei der Verdunstungskühlung und die Beurteilung von Kühltürmen*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1964
- [11] Hauenschild, Rainer: *Der Einfluss der luft- und wasserseitigen Wärme- und Stoffübertragungsverhältnisse auf die Verdunstungskühlung in Nasskühltürmen*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1985
- [12] Dittmann, Achim ; Fischer, Siegfried ; Huhn, Jörg ; Klinger, Jochen: *Repetitorium der Technischen Thermodynamik*. Teuber Studienbücher, 1995 (ISBN: 978-3519063544)

- [13] Elsner, Norbert ; Dittmann, Achim: *Grundlagen der Technischen Thermodynamik - Energielehre*. Bd. 1. 8. Auflage. Akademie Verlag, 1991
- [14] Berliner, P.: Neue Entwicklungen in der Kühlturmtechnik. In: *Chemie Ingenieur Technik* Volume 32 (1960), S. 260–266
- [15] Streng, Andreas: *Berechnungsmodell der nichtadiabaten Verdunstungskühlung in Fluidkühltürmen und Verdunstungskondensatoren*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1996
- [16] Hieke, Rolf ; Schubert, Manfred: *Verdunstungsvorgänge - Theorie und technische Anwendung*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1976
- [17] Mollier, Richard: Ein neues Diagramm für Dampfluftgemische. In: *ZVDI* Volume 67 (1923), S. 869–872
- [18] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI Wärmeatlas*. Springer Verlag, 10. Auflage, 2006 (ISBN: 978-3642199806)
- [19] Kloppers, Johannes C. ; Kröger, Detlev G.: Cooling tower performance evaluation - Merkel, Poppe, and e-NTU methods of analysis. In: *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* Volume 127 (2005), S. 1–7
- [20] Kloppers, Johannes C. ; Kröger, Detlev G.: Cooling tower performance, a critical evaluation of Merkel assumptions. In: *R&D Journal of SAIMEchE* Volume 20 (2003), S. 6–10
- [21] Kröger, Detlef G.: *Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers - Volume II*. PennWell, 2004 (ISBN: 1-59370-019-9)
- [22] Reuter, Hanno: *Performance evaluation of natural draught cooling towers with anisotropic fills*, University of Stellenbosch, South Africa, Dissertation, Dezember 2012
- [23] Reuter, Hanno ; Kröger, D. G.: A new two-dimensional CFD model to predict the performance of natural draught wet-cooling towers packed with trickle or splash fills. In: *International Heat Transfer Conference, Washington D.C. USA* Volume 14 (2010), S. 021003–1 – 021003–9
- [24] Reuter, Hanno: Parametric evaluation of natural draught wet-cooling towers. In: *5th IAHR Cooling Tower and Air-cooled Heat Exchanger Conference, 23. - 26. Oktober*. Peking, 2011
- [25] Ayed, Haj A. ; Kusterer, Karsten ; Strangfeld, Harmut ; Herinx, Tim: Evaluation of Natural Draft Wet Cooling Tower Performance - Based on Numerical Aero-thermodynamic

- Analyses. In: *International Symposium on Cooling Towers, Cologne Germany* Volume 6 (2012), S. 43–51
- [26] Grasmann, Karsten ; Mohasseb, Falk ; Wieners, Norbert ; Reymann, Gabriel: Plume Simulation of Natural Draught Cooling Towers. In: *International Symposium on Cooling Towers, Cologne Germany* Volume 6 (2012), S. 69–74
- [27] Cao, Fengchan ; Ge, Yao-Jun ; Zhao, Lin: Numerical Investigation of Interference Effects on Wind Pressure on a Group of Large Scale Cooling Towers. In: *International Symposium on Cooling Towers, Cologne Germany* Volume 6 (2012), S. 145–152
- [28] Harte, Reinhard ; Reuter, Hanno ; Wörnann, Ralf: Effects of Atmospheric and Operational Thermal Conditions on the Structural Integrity of Cooling Tower Shells. In: *International Symposium on Cooling Towers, Cologne Germany* Volume 6 (2012), S. 161–170
- [29] Simon, Marc ; Herzog, Nicoleta: Local Stresses at Openings of Cooling Towers due to Wind Action. In: *International Symposium on Cooling Towers, Cologne Germany* Volume 6 (2012), S. 171–178
- [30] Webb, Ralph L. ; Villacres, Alejandro: Performance Simulation of Evaporative Heat Exchangers [Cooling Towers, Fluid Coolers, and Condensers]. In: *Heat Transfer Engineering* Volume 6 (2005), S. 31–38
- [31] Wagner, Walter: *Strömungstechnik und Druckverlustberechnung*. Vogel Buchverlag, 1990 (ISBN: 978-3834332738)
- [32] Mehlig, Johannes G.: *Zur Anwendung der Merkelschen Hauptgleichung in der Kühlturmtechnik*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 1966
- [33] Poppe, Michael: Wärme- und Stoffübertragung bei der Verdunstungskühlung im Gegen- und Kreuzstrom / VDI- Forschungsheft 560. 1973. – Forschungsbericht
- [34] Harting, Peter E.: *Zur einheitlichen Berechnung von Kühltürmen*, Universität Braunschweig, Dissertation, 1977
- [35] Kinkeldei, L.: Das i-t-Diagramm für feuchte Luft und seine Anwendung bei der Berechnung von Kühltürmen. In: *Archiv für die gesamte Wärmetechnik* 1. Jahrgang (1950), S. 190–195
- [36] Lewis, Warren K.: The evaporation of a liquid into a gas. In: *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers (ASME)* Volume 1849 (1922), S. 325–340

- [37] Kloppers, Johannes C. ; Kröger, Detlev G.: The Lewis factor and its influence on the performance prediction of wet-cooling towers. In: *International Journal of Thermal Sciences* Volume 44 (2005), S. 879–884
- [38] Webb, Ralph L. ; Jaber, H.: Design of cooling towers by the effectiveness-NTU method. In: *Journal of Heat Transfer* Volume 11 (1989), S. 837–843
- [39] Yadigaroglu, G. ; J., Pastor E.: An investigation of the accuracy of the Merkel Eq. for evaporative cooling tower calculations. In: *ASME paper no. 74-HT-59* Volume 7 (1974), S. 15–17
- [40] Spangemacher, K.: Lösungsmöglichkeiten der Merckelschen Hauptgleichung zur Berechnung von Kühltürmen und Einspritzkühlern. In: *Brennstoff-Wärme-Kraft 13* Volume 6 (1961), S. 273–275
- [41] Carey, W.F. und Williamson G.: Gas cooling and humidification: Design of packed towers from small-scale tests. In: *Proceedings of the Institution of mechanical Engineers* Bd.163, Nr.1 (1950), S. S.41–53
- [42] Hartwig, Tim: *Messdatenerfassung und -auswertung eines Verdunstungskühlturms mit Struktureinbauten*. Großer Beleg, Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Technische Thermodynamik, 2011
- [43] Kloppers, Johannes C. ; Kröger, Detlev G.: A critical investigation into the heat and mass transfer analysis of counterflow wet-cooling towers. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* Volume 48 (2005), S. 765–777
- [44] Schwarz, Hans R. ; Köckler, Norbert: *Numerische Mathematik*. VIEWEG+TEUBNER, 8. Auflage, 2011 (ISBN: 978-3834815514)
- [45] Merziger, Gerhard ; Wirth, Thomas: *Formeln + Hilfen zur höheren Mathematik*. Binomi-Verlag, 5. Auflage, 2007 (ISBN: 978-3923923366)
- [46] Fischer, Andreas: Mathematik I/1 für Maschinenwesen und Mathematik I für Mechatronik. In: *Skript, Technische Universität Dresden, Institut für Numerische Mathematik* (2008)
- [47] Iske, Armin: Numerische Quadratur, Analysis II. In: *Skript, Universität Hamburg, MIN-Fakultät, Mathematik* (2007)
- [48] Ender, Volker: Zur Wasserchemie in Kühlkreisläufen mit Verdunstungskühlung. In: *Kühlkreisläufe im Kraftwerk, Mannheim Hochschule Zittau/Görlitz*, 2013

- [49] Dreyer, Christoph: *Ermittlung und Untersuchung äußerer und innerer Einflussfaktoren auf die Messungen am Versuchskühlturm der Technischen Universität Dresden*. Großer Beleg, Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Technische Thermodynamik, Juli 2013
- [50] Rohde, Leonard: *Modellierung einer Zwei-Phasen-Strömung mit zwei Komponenten in ANSYS CFX*. Großer Beleg, Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Technische Thermodynamik, 2012
- [51] Klausner, Enrico: *Modellierung von Struktureinbauten im Gegenstrom-Kühlturm*. Großer Beleg, Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Technische Thermodynamik, 2011
- [52] Epple, Bernd ; Leithner, Reinhard ; Linzer, Wladimir ; Walter, Heimo: *Simulation von Kraftwerken und wärmetechnischen Anlagen*. SpringerWienNewYork, 2009 (ISBN: 978-3211296950)
- [53] ANSYS, Inc.: *ANSYS CFX Tutorials*. Release 11.0. Dezember 2006
- [54] Bungart, Hans-Joachim ; Zimmer, Stefan ; Bucholz, Martin ; Pflüger, Dirk: *Modellbildung und Simulation*. Springer Spektrum, 2013 (ISBN: 978-3642376559)
- [55] Scherf, Helmut E.: *Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme*. Oldenbourg Verlag München, 2010 (ISBN 978-3486596557)
- [56] Brack, Georg: *Dynamik technischer Systeme*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1974
- [57] Kahlert, Jörg: *Simulation technischer Systeme*. Vieweg Praxiswissen, 2004 (ISBN: 978-3322802484)
- [58] Kunz, Gerald: *Dynamische Simulation eingeschwungener thermischer Zustände von Druckgießformen*, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Dissertation, 2013
- [59] Gruhn, G. ; Hartmann, K. ; Kardos, J. ; et. al.: *Systemverfahrenstechnik I - Modellierung und Simulation verfahrenstechnischer Systeme*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1976
- [60] Reuber, Sebastian: *Ein systemtechnischer Ansatz zur Ein- und Multikriteriellen Prozessoptimierung von Energiesystemen am Beispiel einer SOFC-Prozesssynthese*, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Dissertation, 2013

- [61] Strelow, Olaf: Allgemeine Theorie technischer Netze. In: *Manuskript, Technische Hochschule Mittelhessen, Institut für Thermodynamik, Energieverfahrenstechnik und SystemAnalyse (THESA)*, 2011
- [62] Janschek, Klaus: *Systementwurf mechatronischer Systeme: Methoden – Modelle – Konzepte*. Springer, 2010 (ISBN: 978-3540788768)
- [63] Gruhn, G. ; Hartmann, K. ; Kardos, J. ; et. al.: *Systemverfahrenstechnik II - Bewertung, Optimierung und Synthese verfahrenstechnischer Systeme*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1978
- [64] Bošnjaković, Fran ; Viličić, Milan ; Slipčević: *Einheitliche Berechnung von Rekuperatoren*. Bd. 432. VDI-Forschungsheft, 1951
- [65] Elsner, Norbert ; Fischer, Siegfried ; Huhn, Jörg: *Grundlagen der Technischen Thermodynamik - Wärmeübertragung*. Bd. 2. 8. Auflage. Akademie Verlag, 1993
- [66] Baehr, Hans D. ; Stephan, Karl: *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer-Lehrbuch, 2013 (ISBN: 978-3642365577)
- [67] Schreckenberg, Wolfgang: *Gase-Handbuch*. Messer Griesheim GmbH, 1970
- [68] Wagner, Wolfgang ; Kruse, Alfred: *Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf - Der Industriestandard IAPWS-IF97 für die thermodynamischen Zustandsgrößen und ergänzende Gleichungen für andere Eigenschaften*. Springer, 1998 (ISBN: 978-3540643395)
- [69] Kretzschmar, Hans-Joachim ; Kraft, Ingo: *Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carls Hanser Verlag, 4., aktualisierte Auflage, 2011 (ISBN: 978-3446426016)
- [70] Schulze, Tobias: Simulation der Transportphänomene in einem Verdunstungskühlturm. In: *Thermodynamik-Kolloquium / Tagungsunterlagen, Frankfurt am Main*, 2011
- [71] Strelow, Olaf: Allgemeine Simulationsverfahren in der Energie- und Gebäudetechnik. In: *FEW-Kolloquium Energiesystemtechnik / Tagungsunterlagen (CD-ROM), Technische Hochschule Mittelhessen, Institut für Thermodynamik, Energieverfahrenstechnik und SystemAnalyse (THESA), Gießen*, 2009
- [72] Strelow, Olaf ; Buß, Frederick: Highspeed-Modell zur dynamischen Simulation von Gebäuden. In: *6. FEW-Kolloquium Energiesystemtechnik / Tagungsunterlagen (CD-ROM), Technische Hochschule Mittelhessen, Institut für Thermodynamik, Energieverfahrenstechnik und SystemAnalyse (THESA), Gießen*, 2003

- [73] Strelow, Olaf: Das Matrix-Modell, ein neues Berechnungsverfahren für die thermodynamische Berechnung und dynamische Simulation von Fernwärmenetzen. In: *XXXIV. Kraftwerkstechnisches Kolloquium / Tagungsband, Dresden, 2002*
- [74] Strelow, Olaf: Eine allgemeine Berechnungsmethode für Wärmübertragerschaltungen. In: *Forschung im Ingenieurwesen* Bd. 63 (1997), S. 1–21
- [75] Faires, Douglas J. ; Burden, Richard L.: *Numerische Methoden*. Spektrum Lehrbuch, 1995 (ISBN: 978-3860251386)
- [76] Hanke-Bourgeois, Martin: *Grundlagen der numerischen Mathematik und des wissenschaftlichen Rechnens*. B.G. Teubner Stuttgart, 3. aktualisierte Auflage, 2008 (ISBN: 978-3834807083)
- [77] Hermann, M.: *Numerische Mathematik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2006 (ISBN: 978-3486708202)
- [78] Young, D. M.: *Iterative methods for solving partial differential equations of elliptic type*, Harvard University, Dissertation, 1950
- [79] Hackbusch, W.: The fast numerical solution of very large elliptic difference schemes. In: *IMA Volume 26* (1980), S. 119–132
- [80] Herrmann, Norbert ; Hannover, Leibniz U. (Hrsg.): *Höhere Mathematik für Ingenieure, Physiker und Mathematiker*. Oldenbourg Verlag München Wien, 2., überarbeitete Auflage, 2007 (ISBN: 978-3486584479)
- [81] Schulze, Tobias: Untersuchungen des SOR-Algorithmus mit ω_{opt} . In: *Wissenschaftliches Seminar / Presentation (Digitale Datenbank), Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Technische Thermodynamik, 2011*
- [82] Kanzow, Christian: *Numerik Linearer Gleichungssysteme: Direkte und iterative Verfahren*. Springer-Lehrbuch, 2005 (ISBN: 978-3540206545)
- [83] Herrmann, Sebastian ; Kretzschmar, Hans-Joachim ; Teske, Viola ; Vogel, Eckhard ; Ulbig, Peter ; Span, Roland ; Gatley, Donald P.: Determination of Thermodynamic and Transport Properties of Humid Air for Power-Cycle Calculations / PTB Report. 2009 (ISBN: 978-3865099174). – Forschungsbericht
- [84] Bach, Eric: *Stoffdaten feuchter Luft - Recherche und Programmierung wichtiger Zustandsgrößen*. Großer Beleg, Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Technische Thermodynamik, 2013

- [85] Lemmon, Eric W. ; Jacobsen, Richard T. ; Penoncello, Steven G. ; Friend, Daniel G.: Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon, and Oxygen From 60 to 2000 K at Pressures to 2000 MPa. In: *Journal of Physical and Chemical Reference Data* Volume 29 (2000), Nr. 3, S. 331–385
- [86] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 4670 - Thermodynamische Stoffwerte von feuchter Luft und Verbrennungsgasen*. 2003
- [87] International Association for the Properties of Water and Steam: *Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam*. <http://www.iapws.org>. Version: August 2007
- [88] Polifke, Wolfgang ; Kopitz, Jan: *Wärmeübertragung - Grundlagen, analytische und numerische Methoden*. Pearson Studium, 2., aktualisierte Auflage, 2009 (ISBN: 978-3827373496)
- [89] Böckh, Peter v.: *Fluidmechanik - Einführendes Lehrbuch*. Springer, 2., neu bearbeitete Auflage, 2004 (ISBN: 978-3540220763)
- [90] Nelder, John A. ; Mead, Roge: A Simplex Method for Function Minimization. In: *Computer Journal* Volume 7 (1965), S. 308–313
- [91] Weiss, S.: *Verfahrenstechnischer Berechnungskatalog*. Teil 6 Verfahren und Anlagen, 1984
- [92] Lagarias, J. C. ; Reeds, J. A. ; Wright, M. H. ; Wright, P. E.: Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in low Dimensions. In: *SIAM Journal on Optimization* Volume 9 (1998), S. 112–147
- [93] Rülke, Kai: *Der Einfluss des Luftzustandes auf die Merkel-Zahl*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Juli 1995
- [94] Adamy, Jürgen: *Nichtlineare Regelungen*. Springer, 2009 (ISBN: 978-3642007934)
- [95] Lunze, Jan: *Regelungstechnik I - Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. Springer Vieweg, 9. Auflage, 2013 (ISBN: 978-3642295324)
- [96] Merkel, Wolfgang: *Merkel-Nachrichten - Neues aus der Merkel-Familie*. Paul Wolfgang Merkel'sche Familienstiftung, 2005

ANHANG

A Friedrich *MERKEL* - Kurzlebenslauf

MERKEL (siehe Foto) begann 1911 an der TH München Maschinenbau zu studieren, wechselte jedoch nach dem Vorexamen 1913 nach Dresden. Aufgrund einer Verletzung im 1. Weltkrieg nahm er erst im Herbst 1919 das Studium wieder auf. Es folgten 1920 das Diplom, 1922 die Promotion, 1924 die Habilitation und 1928 die Ernennung zum außerordentlichen Professor. Führende Kraft auf diesem Fachgebiet, Prof. *MOLLIER*, wollte ihn eigentlich zu seinem Nachfolger in Dresden bestimmen, doch *MERKEL* verstarb im September 1929 überraschend an Spätfolgen seiner Verletzung [96].



Quelle: <http://www.uni-magdeburg.de/mbl/Biografien/0443.htm>, 23.07.2014

B Konventionen der Kühlturmtechnik

Zusammenfassung oft verwendeter Begriffe und Abkürzungen:

- **Kühlzonenbreite** z : Ist die Temperaturdifferenz um die sich das Wasser im Kühlturm abkühlt:

$$z = \Delta T_W = t_W^E - t_W^A. \quad (1)$$

- **Luftzahl** λ : Stellt das Verhältnis der Masseströme von Luft und Wasser im Kühlturm dar:

$$\lambda = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_W}. \quad (2)$$

- **Regendichte** r : Ist der Massestrom des Wassers im Kühlturm, üblicherweise in der Dimension:

$$[r] = \frac{t}{m^2 h}. \quad (3)$$

- **Kühlgrenze** (oder auch Kühlgrenztemperatur): Ist die niedrigste theoretisch erreichbare Temperatur für das Wasser bei der Rückkühlung. Bei der Trockenkühlung ist dieses die Lufttemperatur t_L bei der offenen Rückkühlung ist dieses Feuchtkugeltemperatur t_F der Luft.
- **Kühlgrenzabstand** a : Die Differenz zwischen Kühlgrenztemperatur und Wasser-Austritts-Temperatur t_W^A wird Kühlgrenzabstand a genannt und liegt in der Regel über drei Kelvin ($a > 3 \text{ K}$)
- Die Kurzschreibweise für beispielsweise eine Messung mit einer Regendichte von $r = 12 \frac{t}{m^2 h}$ und einer Kühlzonenbreite von $z = 10 \text{ K}$ lautet: „**r12 z10**“.
- Die Übertragungszahl bei einer Luftzahl von $\lambda = 1$ wird als „ K_1 “ geschrieben.

C Herleitung von POPPE

Energiebilanz um das Gesamtsystem:

$$\cancel{\dot{m}_L h_L} + \cancel{\dot{m}_W h_W} + \dot{m}_W dh_W + d\dot{m}_W h_W + \underbrace{d\dot{m}_W dh_W}_{=0} = \cancel{\dot{m}_W h_W} + \cancel{\dot{m}_L h_L} + \dot{m}_L dh_L \quad (4)$$

$$\dot{m}_L dh_L = \dot{m}_W dh_W - d\dot{m}_W h_W \quad (5)$$

Energiebilanz um die Luftphase:

$$\cancel{\dot{m}_L h_L} + d\dot{Q} + d\dot{m}_V h_D = \cancel{\dot{m}_L h_L} + \dot{m}_L dh_L \quad (6)$$

$$\dot{m}_L dh_L = d\dot{Q} + d\dot{m}_V h_D \quad (7)$$

Einsetzen der Gleichungen von $d\dot{Q} = \alpha (t_G - t_L) dA$ und $d\dot{m}_V = \beta (x_G - x_L) dA$ ergibt:

$$\dot{m}_L dh_L = (\alpha (t_G - t_L) + \beta (x_G - x_L) h_D) dA \quad (8)$$

mit der Enthalpie des Wasserdampfes an der Wasseroberfläche

$$h_D = h_{v,0} + c_{p,D} t_G \quad (9)$$

folgt:

$$\dot{m}_L dh_L = \left\{ \alpha (t_G - t_L) + \beta \underbrace{(x_G - x_L) (h_{v,0} + c_{p,D} t_G)}_Y \right\} dA \quad (10)$$

$$\dot{m}_L dh_L = \beta dA \left(\frac{\alpha}{\beta} (t_G - t_L) + Y \right) \quad (11)$$

$$\frac{\dot{m}_L dh_L}{\beta dA} = \frac{\alpha}{\beta} (t_G - t_L) + Y \quad (12)$$

Erweitern des linken Terms mit $\frac{c_{p,m}}{c_{p,m}}$ und Einsetzen der Beziehung $c_{p,m} = c_{p,L} + x_L c_{p,D}$ führt zu:

$$\frac{\dot{m}_L dh_L}{\beta dA} = \frac{\alpha}{\beta c_{p,m}} (t_G (c_{p,L} + c_{p,D} x_L) - t_L (c_{p,L} + c_{p,D} x_L)) + Y \quad (13)$$

Ausklammern und erweitern mit $(x_G c_{pD} t_G - x_G c_{pD} t_G)$, $(x_G h_{v,0} - x_G h_{v,0})$ und $(x_L h_{v,0} - x_L h_{v,0})$ führt zu:

$$\frac{\dot{m}_L dh_L}{\beta dA} = \frac{\alpha}{\beta c_{p,m}} \left(\underbrace{t_G c_{p,L} + t_G x_L c_{pD}}_{a_1} - \underbrace{t_L c_{p,L} - c_{pD} x_L t_L}_{b_1} + \underbrace{x_G c_{pD} t_G}_{a_2} \right. \\ \left. - x_G c_{pD} t_G + \underbrace{x_G h_{v,0}}_{a_3} - x_G h_{v,0} + x_L h_{v,0} - \underbrace{x_L h_{v,0}}_{b_3} \right) + Y \quad (14)$$

Es folgt:

$$h_G = a_1 + a_2 + a_3 \quad (15)$$

$$h_L = b_1 + b_2 + b_3 \quad (16)$$

$$\frac{\dot{m}_L dh_L}{\beta dA} = \frac{\alpha}{\beta c_{p,m}} (h_G - h_L + t_G x_L c_{pD} - x_G c_{pD} t_G - x_G h_{v,0} + x_L h_{v,0}) + Y \quad (17)$$

$$\frac{\dot{m}_L dh_L}{\beta dA} = \frac{\alpha}{\beta c_{p,m}} \{h_G - h_L - (x_G - x_L)(h_{v,0} + c_{pD} t_G)\} + Y \quad (18)$$

Rücksubstituieren von Y und Erweitern mit $h_G - h_L - h_G + h_L$ ergibt:

$$\frac{\dot{m}_L dh_L}{\beta dA} = \frac{\alpha}{\beta c_{p,m}} \{h_G - h_L - (x_G - x_L)(h_{v,0} + c_{pD} t_G)\} \\ + (x_G - x_L)(h_{v,0} + c_{p,D} t_G) + h_G - h_L - h_G + h_L \quad (19)$$

Ausklammern von $\left(\frac{\alpha}{c_{p,m}\beta} - 1\right)$ führt zu:

$$\frac{\dot{m}_L dh_L}{\beta dA} = h_G - h_L + \left(\frac{\alpha}{c_{p,m}\beta} - 1\right) (h_G - h_L - (x_G - x_L)(h_{v,0} + c_{pD} t_G)) \quad (20)$$

$$\boxed{\dot{m}_L dh_L = \beta dA \left(h_G - h_L + \left(\frac{\alpha}{c_{p,m}\beta} - 1\right) \{h_G - h_L - [x_G - x_L](h_{v,0} + c_{pD} t_G)\} \right)} \quad (21)$$

Aus der Energiebilanz um das Gesamtsystems (5) und mit $d\dot{m}_V = \beta (x_G - x_L) dA$ folgt:

$$\dot{m}_W dh_W = \dot{m}_L dh_L - \beta (x_G - x_L) dA c_{pW} t_W \quad (22)$$

mit (21) folgt:

$$\dot{m}_W dh_W = \beta dA (h_G - h_L + K) \quad (23)$$

mit

$$K = \left(\frac{\alpha}{c_{p,m}\beta} - 1 \right) \{ h_G - h_L - [x_G - x_L] (h_{v,0} + c_{pD} t_G) \} - [x_W - x_L] c_{pW} t_W \quad (24)$$

Aus (23) folgt die erweiterte Hauptgleichung nach Poppe:

$$Me = \frac{\beta A}{\dot{m}_W} = \int_{t_{W2}}^{t_{W1}} \frac{c_{p,W} dt_W}{h_G - h_L + K} \quad (25)$$

D Simulationen am *Virtuellen Kühlturm*

D.1 Regenraum Messung A

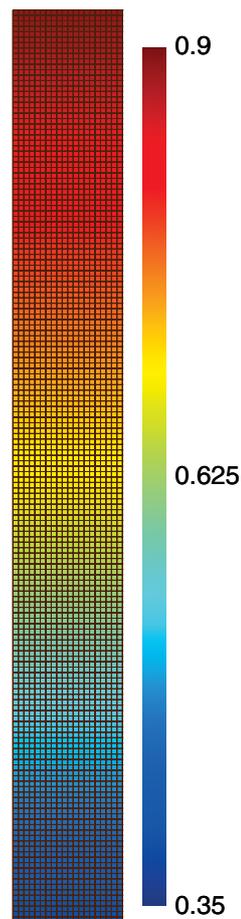


Abbildung 1: Verlauf der relativen Luftfeuchte φ im Regenraum, Nr. 23, Messung A

D.2 Abhängigkeit des Stoffübergangskoeffizienten von der Regendichte

Folgende Abbildung 2 zeigt die Veränderung des aus der kalibrierten Simulation berechneten Stoffübergangskoeffizienten β bei Veränderung der Regendichte r .

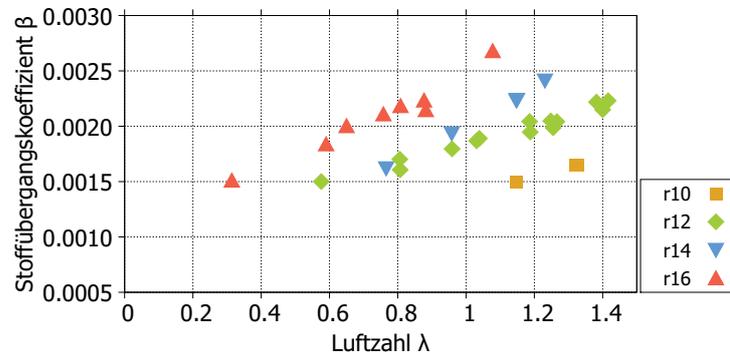


Abbildung 2: Veränderung des Stoffübergangskoeffizienten β bei Variation der Regendichte r

Es wird deutlich, dass die ermittelten Funktionen der Transportgrößen nur für eine Regendichte gelten. Bei einer Änderung der Regendichte ist es notwendig das Modell neu zu kalibrieren. Zukünftig sind zweidimensionale Funktionen in Abhängigkeit des Luft- und Wassermassestroms denkbar.

D.3 Regenraum Messung B

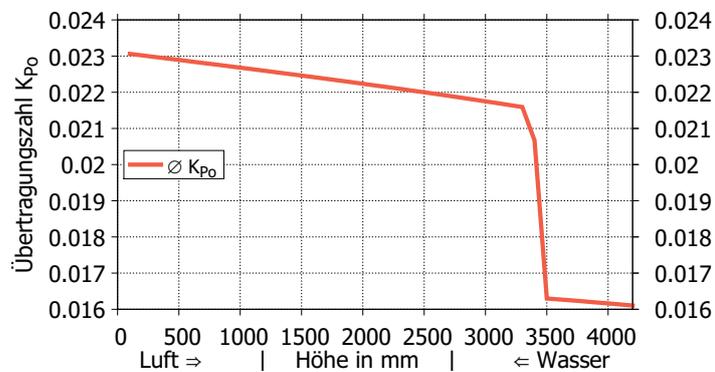


Abbildung 3: Simulation Regenraum: Verlauf der Übertragungszahl K_n , Nr. 19, Messung B

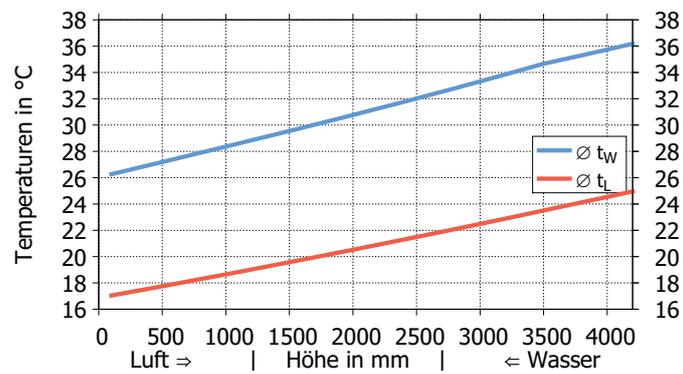


Abbildung 4: Simulation Regenraum: Verlauf der Temperaturen, Nr. 19, Messung B

D.4 Die Übertragungszahl im *Virtuellen Kühlturm*

Für den untypischen Fall, dass das eintretende Wasser kälter als die eintretende Luft im Kühlturm ist, kehrt sich der Wärme- und Stoffübergang um. Während der Massestrom des Wassers steigt, steigt auch die Übertragungszahl entsprechend Gleichung 2.50 entgegen dem Verlauf des Wassers im Kühlturm an, siehe Abbildungen 5 und 6.

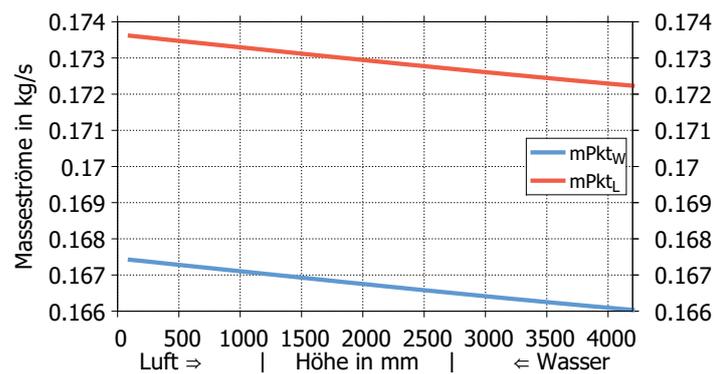


Abbildung 5: Verlauf des Wassergehalts bei umgekehrten Wärme- und Stoffübergang

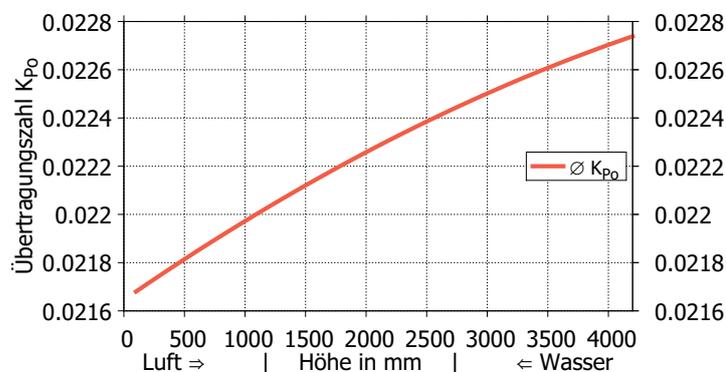


Abbildung 6: Verlauf der Übertragungszahl bei umgekehrten Wärme- und Stoffübergang

D.5 Einfluss der Luft-Eintritts-Enthalpie h_L

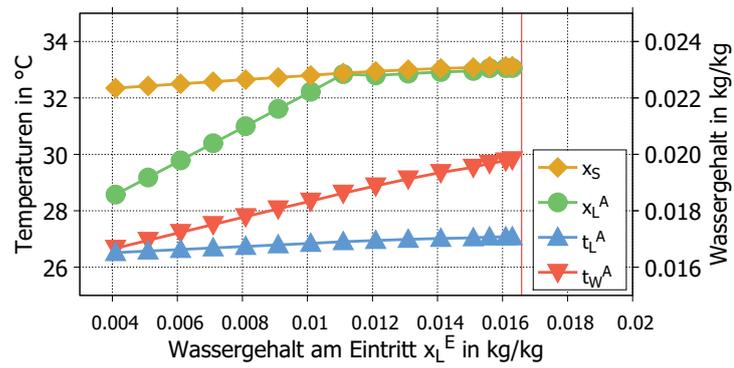


Abbildung 7: Verlauf der Zustandsgrößen am Austritt über Wassergehalt x_L^E

D.6 Simulation des Referenzeinbaus im verkürzten *Virtuellen Kühlturm*

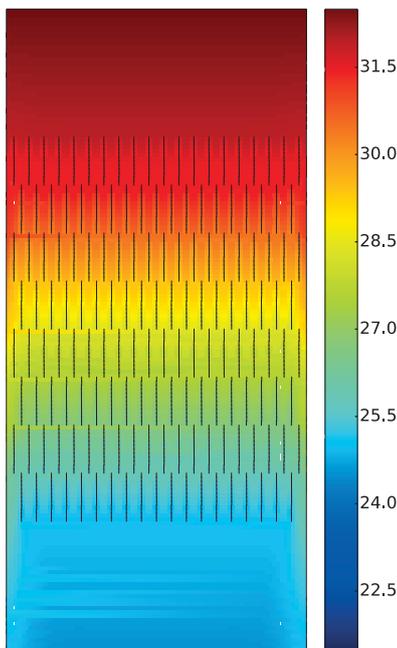


Abbildung 8: Temperaturfeld des Wassers des Referenzeinbaus in °C

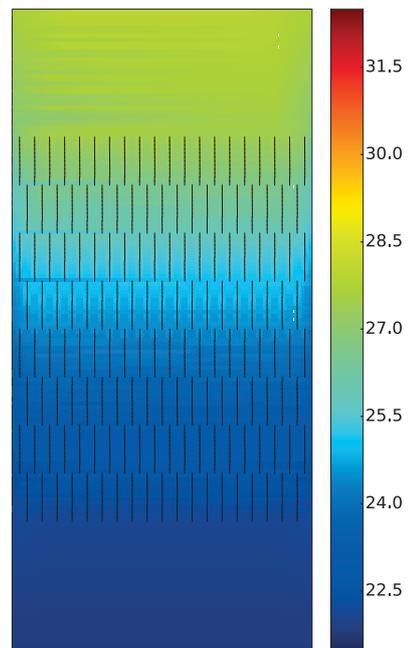


Abbildung 9: Temperaturfeld der Luft des Referenzeinbaus in °C

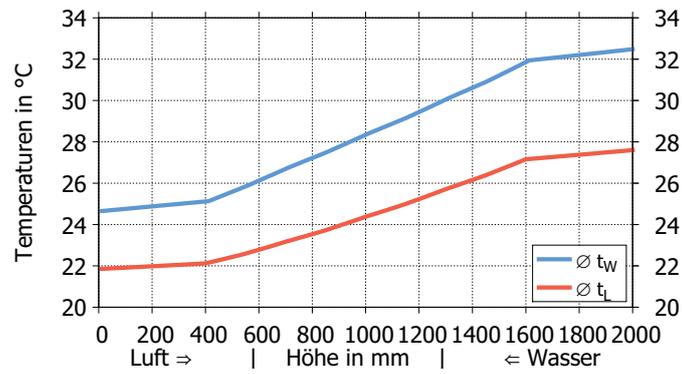


Abbildung 10: Verlauf der Temperaturen im verkürzten *Virtuellen Kühlturm*

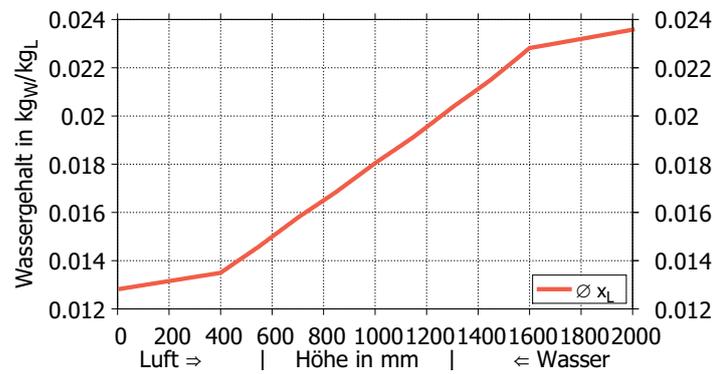


Abbildung 11: Verlauf des Wassergehalts x_L im verkürzten *Virtuellen Kühlturm*

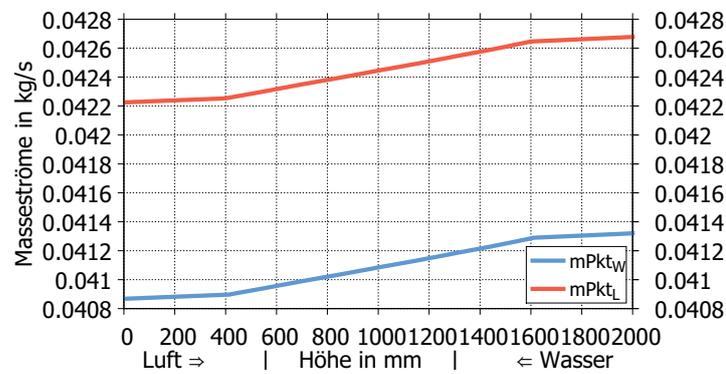


Abbildung 12: Verlauf der Masseströme im verkürzten *Virtuellen Kühlturm*

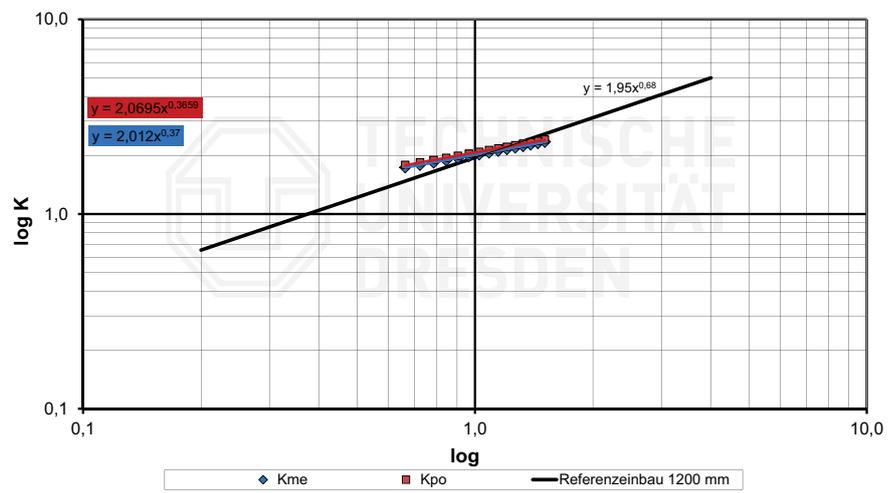


Abbildung 13: Vergleich der Regressionsgerade mit Simulation durch Transportfunktionen des Regenraums

E Messdaten

$r \hat{=}$ Regendichte in $\frac{t}{m^2 h}$; $z \hat{=}$ Kühlzonenbreite in K

Alle mit gelb markierten Messpunkte wurden mit dem Simulationsmodell nachgebildet.

E.1 Regenraum r12 z5

| Read Measurement Data | | | | Filter | | | | Sort | | | | Clear | | | | Boundary Conditions | | | | Evaluation of Merkel | | Evaluation of Zeta | |
|---|--------------|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|---|-------------------------|-----------------------|--|--|--|--|-------------------------------|--|----------------------|--|--------------------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> without TXT-Files | | | | Pressure: x/1000 | | | | Pressure: x*1000 | | | | Delete Modules | | | | Type of fill: | | Regenraum | | Water distribution: | | Fill height: | |
| <input type="checkbox"/> Show error messages | | | | max. 1000 measurement points | | | | <input type="checkbox"/> incl. Reg. | | | | bntrelevant for evaluat | | | | <input checked="" type="checkbox"/> Merkel | | <input type="checkbox"/> Zeta | | Nozzles | | Editor: Sch | |
| No. | Date | Frequency | Temperatures water | Temperatures air | Cooling range | Air Pressure | Pressure loss orifice | Pressure loss fills | Volume flow water | Error | Comments | No. Shown in graph | | | | | | | | | | | |
| Unit | [dd.mm.jjjj] | [Hz] | t _w ⁱⁿ [°C] | t _w ^{out} [°C] | t _{in} ⁱⁿ [°C] | t _{in} ^{out} [°C] | z [K] | p _u [bar] | Δp _{or} [Pa] | Δp _{Fill} [Pa] | V _{galVW} ⁱⁿ Out [m³/h] | count | | | | | | | | | | | |
| 1 | 4.06.2014 | 10 | 38,1 | 32,8 | 15,8 | 24,3 | 35,1 | 5,3 | 0,990 | 76,5 | 0,1 | 12,1 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 2 | 4.06.2014 | 11 | 38,2 | 32,8 | 15,4 | 23,6 | 35,2 | 5,4 | 0,990 | 76,0 | 0,1 | 12,1 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 3 | 4.06.2014 | 12 | 34,8 | 29,6 | 14,6 | 23,2 | 31,4 | 5,2 | 0,990 | 123,4 | 0,1 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 4 | 4.06.2014 | 13 | 35,0 | 29,8 | 14,9 | 23,1 | 31,6 | 5,2 | 0,990 | 123,7 | 0,2 | 12,1 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 5 | 4.06.2014 | 14 | 32,9 | 27,9 | 14,8 | 24,4 | 29,5 | 5,0 | 0,990 | 182,7 | 0,4 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 6 | 4.06.2014 | 15 | 32,8 | 27,8 | 14,7 | 24,3 | 29,4 | 5,0 | 0,990 | 183,9 | 0,4 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 7 | 2.06.2014 | 17 | 29,8 | 25,0 | 12,5 | 19,3 | 25,8 | 4,8 | 1,001 | 250,7 | 9,8 | 12,2 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 8 | 2.06.2014 | 18 | 30,0 | 25,1 | 12,4 | 19,3 | 26,0 | 4,9 | 1,001 | 251,0 | 9,9 | 12,1 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 9 | 4.06.2014 | 20 | 31,3 | 26,0 | 15,0 | 24,5 | 27,5 | 5,2 | 0,991 | 334,0 | 10,1 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 10 | 4.06.2014 | 21 | 31,4 | 26,1 | 14,9 | 24,4 | 27,5 | 5,3 | 0,991 | 334,8 | 9,0 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 11 | 2.06.2014 | 22 | 29,1 | 23,9 | 12,6 | 19,2 | 24,3 | 5,3 | 1,001 | 431,4 | 12,6 | 12,1 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 12 | 2.06.2014 | 23 | 29,1 | 23,9 | 12,6 | 19,4 | 24,5 | 5,3 | 1,001 | 432,0 | 12,5 | 12,1 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 13 | 4.06.2014 | 24 | 28,9 | 24,0 | 14,9 | 24,0 | 25,8 | 4,9 | 0,991 | 536,4 | 16,4 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 14 | 4.06.2014 | 25 | 28,9 | 24,0 | 14,9 | 23,9 | 25,7 | 4,8 | 0,991 | 532,4 | 18,0 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 15 | 2.06.2014 | 27 | 27,0 | 22,0 | 12,4 | 19,1 | 22,4 | 5,0 | 1,001 | 660,1 | 15,9 | 12,2 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 16 | 2.06.2014 | 28 | 27,1 | 22,0 | 12,1 | 18,7 | 22,3 | 5,1 | 1,001 | 663,6 | 16,2 | 12,2 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 17 | 4.06.2014 | 30 | 27,9 | 23,0 | 14,7 | 23,1 | 24,8 | 5,0 | 0,991 | 781,5 | 10,5 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 18 | 4.06.2014 | 31 | 27,8 | 23,0 | 14,9 | 23,4 | 24,9 | 4,8 | 0,991 | 777,9 | 15,9 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 19 | 2.06.2014 | 32 | 25,3 | 20,4 | 11,3 | 16,9 | 20,3 | 5,0 | 1,002 | 943,5 | 20,1 | 12,2 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 20 | 2.06.2014 | 33 | 25,2 | 20,4 | 11,7 | 17,7 | 20,5 | 4,8 | 1,002 | 941,0 | 19,9 | 12,2 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 21 | 28.05.2014 | 35 | 26,5 | 21,2 | 13,2 | 14,2 | 20,1 | 5,2 | 0,993 | 1082,3 | 21,5 | 12,1 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 22 | 28.05.2014 | 36 | 26,7 | 21,4 | 13,1 | 14,1 | 20,2 | 5,4 | 0,993 | 1099,1 | 21,4 | 12,1 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 23 | 2.06.2014 | 37 | 25,6 | 20,4 | 12,7 | 18,1 | 20,7 | 5,2 | 1,002 | 1257,9 | 24,1 | 12,2 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 24 | 2.06.2014 | 38 | 25,8 | 20,6 | 12,7 | 18,1 | 20,8 | 5,2 | 1,002 | 1259,4 | 23,9 | 12,2 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 25 | 3.06.2014 | 40 | 25,7 | 20,5 | 12,8 | 22,6 | 21,8 | 5,2 | 0,996 | 1409,8 | 26,2 | 12,1 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 26 | 3.06.2014 | 41 | 25,5 | 20,4 | 12,8 | 22,5 | 21,8 | 5,1 | 0,996 | 1404,0 | 26,0 | 12,1 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 27 | 3.06.2014 | 42 | 26,0 | 20,4 | 12,7 | 22,3 | 23,0 | 5,6 | 0,997 | 1586,3 | 28,2 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 28 | 3.06.2014 | 43 | 26,1 | 20,3 | 12,4 | 21,6 | 22,6 | 5,8 | 0,997 | 1591,1 | 28,1 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 29 | 3.06.2014 | 45 | 23,9 | 19,2 | 12,8 | 23,3 | 20,9 | 4,7 | 0,996 | 1779,5 | 30,9 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 30 | 3.06.2014 | 46 | 23,7 | 19,1 | 12,7 | 23,0 | 21,4 | 4,6 | 0,996 | 1778,6 | 30,7 | 12,1 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 31 | 3.06.2014 | 47 | 24,1 | 19,2 | 13,1 | 22,5 | 22,1 | 4,9 | 0,997 | 1988,2 | 34,0 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 32 | 3.06.2014 | 48 | 24,0 | 19,2 | 12,9 | 22,5 | 22,0 | 4,8 | 0,997 | 1983,1 | 33,9 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 33 | 3.06.2014 | 50 | 23,7 | 18,8 | 12,9 | 23,1 | 22,0 | 4,9 | 0,997 | 2192,5 | 37,6 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |
| 34 | 3.06.2014 | 51 | 23,6 | 18,8 | 13,0 | 23,4 | 22,0 | 4,8 | 0,997 | 2190,7 | 37,4 | 12,0 | Alt. fct. used for IF | | | | | | | | | | |

Abbildung 14: Regenraum r12 z5 Messdaten

| No. | Frequency [Hz] | Density water [kg/m³] | Heat capacity water [kJ/(kg K)] | Mass flow water [kg/s] | Mass flow wet air [kg/s] | Mass flow dry air [kg/s] | water content [kg/kg] | Air ratio [-] | Density air [kg/m³] | Kinematic viscosity air [m²/s] | Heat capacity air [kJ/(kg K)] | Pressure loss coefficient [-] | Velocity Air [m/s] |
|-----|----------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| | | ρ_w | $c_{p,w}$ | $\dot{m}_{PKL,W}$ | $\dot{m}_{PKL,A}$ | $\dot{m}_{PKL,DA}$ | x | λ | ρ_a | ν_a | $c_{p,a}$ | ξ | w |
| 1 | 10 | 993,9 | 4,1789 | 3,3488 | 0,9218 | 0,9146 | 0,00784534 | 0,2731 | 1,1452 | 0,00001608 | 1,0121 | 0,1740 | 0,805 |
| 2 | 11 | 993,8 | 4,1789 | 3,3495 | 0,9202 | 0,9131 | 0,00769714 | 0,2726 | 1,1483 | 0,00001601 | 1,0119 | 0,1757 | 0,801 |
| 3 | 12 | 995,0 | 4,1795 | 3,3222 | 1,1725 | 1,1644 | 0,00693248 | 0,3505 | 1,1514 | 0,00001595 | 1,0112 | 0,1481 | 1,018 |
| 4 | 13 | 994,9 | 4,1794 | 3,3317 | 1,1739 | 1,1654 | 0,00729574 | 0,3498 | 1,1510 | 0,00001595 | 1,0116 | 0,3763 | 1,020 |
| 5 | 14 | 995,5 | 4,1799 | 3,3242 | 1,4230 | 1,4136 | 0,00666607 | 0,4252 | 1,1475 | 0,00001605 | 1,0111 | 0,4638 | 1,240 |
| 6 | 15 | 995,6 | 4,1799 | 3,3283 | 1,4277 | 1,4182 | 0,00667294 | 0,4261 | 1,1478 | 0,00001604 | 1,0111 | 3,9454 | 1,244 |
| 7 | 17 | 996,4 | 4,1809 | 3,3754 | 1,6890 | 1,6785 | 0,00628058 | 0,4973 | 1,1806 | 0,00001539 | 1,0105 | 7,9548 | 1,431 |
| 8 | 18 | 996,4 | 4,1808 | 3,3570 | 1,6905 | 1,6802 | 0,00616267 | 0,5005 | 1,1810 | 0,00001539 | 1,0104 | 7,9880 | 1,431 |
| 9 | 20 | 996,1 | 4,1804 | 3,3169 | 1,9202 | 1,9071 | 0,00685079 | 0,5750 | 1,1470 | 0,00001606 | 1,0112 | 6,1707 | 1,674 |
| 10 | 21 | 996,0 | 4,1804 | 3,3168 | 1,9227 | 1,9096 | 0,00684127 | 0,5757 | 1,1472 | 0,00001606 | 1,0112 | 5,5050 | 1,676 |
| 11 | 22 | 996,7 | 4,1812 | 3,3363 | 2,2125 | 2,1985 | 0,00636372 | 0,6590 | 1,1809 | 0,00001539 | 1,0106 | 5,9599 | 1,874 |
| 12 | 23 | 996,6 | 4,1812 | 3,3397 | 2,2135 | 2,1995 | 0,00634293 | 0,6586 | 1,1803 | 0,00001540 | 1,0106 | 5,9319 | 1,875 |
| 13 | 24 | 996,7 | 4,1813 | 3,3126 | 2,4321 | 2,4152 | 0,00702205 | 0,7291 | 1,1490 | 0,00001601 | 1,0114 | 6,2836 | 2,117 |
| 14 | 25 | 996,7 | 4,1813 | 3,3191 | 2,4233 | 2,4063 | 0,00706138 | 0,7250 | 1,1492 | 0,00001601 | 1,0114 | 6,9486 | 2,109 |
| 15 | 27 | 997,2 | 4,1821 | 3,3714 | 2,7941 | 2,7172 | 0,00622872 | 0,8059 | 1,1818 | 0,00001537 | 1,0105 | 4,9666 | 2,314 |
| 16 | 28 | 997,2 | 4,1821 | 3,3795 | 2,7434 | 2,7267 | 0,00614312 | 0,8068 | 1,1836 | 0,00001533 | 1,0104 | 5,0209 | 2,318 |
| 17 | 30 | 996,9 | 4,1817 | 3,3160 | 2,9362 | 2,9156 | 0,00708722 | 0,8792 | 1,1526 | 0,00001592 | 1,0114 | 2,7602 | 2,547 |
| 18 | 31 | 997,0 | 4,1817 | 3,3142 | 2,9272 | 2,9062 | 0,00722144 | 0,8769 | 1,1508 | 0,00001597 | 1,0115 | 4,2040 | 2,544 |
| 19 | 32 | 997,6 | 4,1830 | 3,3896 | 3,2775 | 3,2576 | 0,00609565 | 0,9611 | 1,1917 | 0,00001515 | 1,0103 | 4,3957 | 2,750 |
| 20 | 33 | 997,6 | 4,1830 | 3,3888 | 3,2684 | 3,2485 | 0,00612645 | 0,9586 | 1,1882 | 0,00001523 | 1,0103 | 4,3695 | 2,751 |
| 21 | 35 | 997,3 | 4,1825 | 3,3454 | 3,5153 | 3,4831 | 0,00923901 | 1,0412 | 1,1859 | 0,00001511 | 1,0130 | 4,0628 | 2,964 |
| 22 | 36 | 997,3 | 4,1824 | 3,3455 | 3,5272 | 3,4953 | 0,00914523 | 1,0448 | 1,1867 | 0,00001510 | 1,0130 | 4,0183 | 2,972 |
| 23 | 37 | 997,5 | 4,1829 | 3,3903 | 3,7681 | 3,7422 | 0,00691302 | 1,1038 | 1,1849 | 0,00001529 | 1,0111 | 3,9711 | 3,180 |
| 24 | 38 | 997,5 | 4,1828 | 3,3897 | 3,7704 | 3,7445 | 0,00693474 | 1,1047 | 1,1850 | 0,00001529 | 1,0111 | 3,9350 | 3,182 |
| 25 | 40 | 997,5 | 4,1829 | 3,3489 | 3,9502 | 3,9295 | 0,00525442 | 1,1734 | 1,1635 | 0,00001576 | 1,0098 | 3,8750 | 3,395 |
| 26 | 41 | 997,6 | 4,1829 | 3,3523 | 3,9428 | 3,9220 | 0,00532014 | 1,1699 | 1,1639 | 0,00001575 | 1,0098 | 3,8659 | 3,388 |
| 27 | 42 | 997,5 | 4,1828 | 3,3346 | 4,1910 | 4,1691 | 0,00525214 | 1,2502 | 1,1657 | 0,00001571 | 1,0098 | 3,6994 | 3,595 |
| 28 | 43 | 997,5 | 4,1828 | 3,3318 | 4,2024 | 4,1807 | 0,00520073 | 1,2548 | 1,1687 | 0,00001564 | 1,0097 | 3,6815 | 3,596 |
| 29 | 45 | 997,9 | 4,1838 | 3,3305 | 4,4276 | 4,4057 | 0,00495547 | 1,3228 | 1,1618 | 0,00001581 | 1,0095 | 3,6503 | 3,811 |
| 30 | 46 | 997,9 | 4,1839 | 3,3407 | 4,4289 | 4,4070 | 0,00497069 | 1,3192 | 1,1631 | 0,00001578 | 1,0095 | 3,6141 | 3,808 |
| 31 | 47 | 997,8 | 4,1837 | 3,3237 | 4,6808 | 4,6547 | 0,00561100 | 1,4005 | 1,1643 | 0,00001574 | 1,0101 | 3,5877 | 4,020 |
| 32 | 48 | 997,9 | 4,1837 | 3,3352 | 4,6756 | 4,6504 | 0,00542354 | 1,3943 | 1,1647 | 0,00001573 | 1,0099 | 3,5863 | 4,015 |
| 33 | 50 | 997,9 | 4,1839 | 3,3304 | 4,9083 | 4,8833 | 0,00511693 | 1,4663 | 1,1629 | 0,00001578 | 1,0097 | 3,5981 | 4,221 |
| 34 | 51 | 998,0 | 4,1840 | 3,3241 | 4,9033 | 4,8785 | 0,00508609 | 1,4676 | 1,1615 | 0,00001582 | 1,0097 | 3,5905 | 4,222 |

Abbildung 15: Regenraum r12 z5 Auswertung Zustandsgrößen

Calculation of transfer numbers

| Tab. Int. Merkel | | MEHLIG | | | | | | | | | | POPPE | | | | | | | | | | KINKELDEI | | | | | | | | | |
|------------------|----|-----------|---------|-----------|--------------|------------|-------|-------|-------|-----------|--------------|--------------|-------|-------|-------|--------------|--|--|--|--|--|-----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Test No. | Hz | λ | Simpson | 3/8 Regel | $t_{i, out}$ | Saturated? | K V | K W | Kme | Tab. Int. | $t_{i, out}$ | $x_{i, out}$ | m_b | NTU | Kpo | $t_{i, out}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 10 | 0,2731 | 0,473 | 0,473 | 34,13 | YES | 0,479 | 0,567 | 0,489 | 0,476 | 34,73 | 0,0368 | 0,097 | 1,972 | 0,539 | 34,47 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 11 | 0,2726 | 0,474 | 0,474 | 34,21 | YES | 0,480 | 0,569 | 0,493 | 0,481 | 34,78 | 0,0371 | 0,099 | 1,982 | 0,540 | 34,47 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 12 | 0,3505 | 0,533 | 0,533 | 30,27 | YES | 0,539 | 0,634 | 0,541 | 0,531 | 31,19 | 0,0290 | 0,073 | 1,695 | 0,594 | 31,04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 13 | 0,3498 | 0,533 | 0,533 | 30,47 | YES | 0,539 | 0,633 | 0,542 | 0,530 | 31,32 | 0,0293 | 0,073 | 1,700 | 0,594 | 31,16 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 14 | 0,4252 | 0,560 | 0,560 | 28,69 | NO | 0,567 | 0,000 | 0,567 | 0,551 | 29,45 | 0,0246 | 0,060 | 1,450 | 0,617 | 29,35 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 15 | 0,4261 | 0,565 | 0,565 | 28,60 | NO | 0,571 | 0,000 | 0,571 | 0,555 | 29,37 | 0,0245 | 0,059 | 1,460 | 0,622 | 29,27 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 17 | 0,4973 | 0,636 | 0,636 | 24,99 | NO | 0,643 | 0,000 | 0,643 | 0,630 | 25,72 | 0,0201 | 0,047 | 1,395 | 0,694 | 25,67 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 18 | 0,5005 | 0,639 | 0,639 | 25,08 | NO | 0,645 | 0,000 | 0,645 | 0,634 | 25,83 | 0,0203 | 0,047 | 1,391 | 0,696 | 25,78 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 20 | 0,5750 | 0,650 | 0,650 | 27,22 | NO | 0,656 | 0,000 | 0,656 | -1,000 | 27,78 | 0,0210 | 0,047 | 1,229 | 0,706 | 27,69 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 21 | 0,5757 | 0,650 | 0,650 | 27,29 | NO | 0,656 | 0,000 | 0,656 | -1,000 | 27,86 | 0,0211 | 0,047 | 1,227 | 0,707 | 27,77 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 22 | 0,6590 | 0,704 | 0,704 | 23,85 | NO | 0,709 | 0,000 | 0,709 | 0,694 | 24,43 | 0,0179 | 0,039 | 1,152 | 0,759 | 24,40 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 23 | 0,6586 | 0,702 | 0,702 | 23,91 | NO | 0,707 | 0,000 | 0,707 | 0,692 | 24,48 | 0,0179 | 0,039 | 1,150 | 0,757 | 24,45 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 24 | 0,7291 | 0,715 | 0,715 | 25,48 | NO | 0,722 | 0,000 | 0,722 | -1,000 | 25,85 | 0,0176 | 0,035 | 1,057 | 0,771 | 25,76 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 25 | 0,7250 | 0,714 | 0,714 | 25,44 | NO | 0,722 | 0,000 | 0,722 | -1,000 | 25,81 | 0,0176 | 0,035 | 1,062 | 0,770 | 25,72 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 27 | 0,8059 | 0,773 | 0,773 | 22,33 | NO | 0,779 | 0,000 | 0,779 | 0,759 | 22,75 | 0,0153 | 0,031 | 1,028 | 0,828 | 22,72 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 28 | 0,8068 | 0,773 | 0,773 | 22,16 | NO | 0,779 | 0,000 | 0,779 | 0,760 | 22,60 | 0,0153 | 0,031 | 1,027 | 0,829 | 22,58 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 30 | 0,8792 | 0,770 | 0,770 | 24,38 | NO | 0,779 | 0,000 | 0,779 | -1,000 | 24,67 | 0,0160 | 0,030 | 0,940 | 0,827 | 24,58 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 31 | 0,8769 | 0,767 | 0,767 | 24,52 | NO | 0,776 | 0,000 | 0,776 | -1,000 | 24,79 | 0,0160 | 0,029 | 0,939 | 0,823 | 24,69 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 32 | 0,9611 | 0,814 | 0,814 | 20,13 | NO | 0,820 | 0,000 | 0,820 | 0,798 | 20,49 | 0,0134 | 0,025 | 0,904 | 0,869 | 20,48 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 33 | 0,9586 | 0,817 | 0,817 | 20,47 | NO | 0,824 | 0,000 | 0,824 | 0,800 | 20,80 | 0,0133 | 0,024 | 0,910 | 0,872 | 20,78 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 35 | 1,0412 | 0,876 | 0,876 | 20,11 | YES | 0,883 | 1,008 | 0,948 | 0,886 | 20,12 | 0,0155 | 0,021 | 0,922 | 0,960 | 20,03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 36 | 1,0448 | 0,869 | 0,869 | 20,16 | YES | 0,876 | 1,003 | 0,945 | 0,886 | 20,15 | 0,0156 | 0,022 | 0,913 | 0,953 | 20,08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 37 | 1,1038 | 0,911 | 0,911 | 20,77 | NO | 0,919 | 0,000 | 0,919 | 0,887 | 21,07 | 0,0137 | 0,023 | 0,881 | 0,973 | 21,02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 38 | 1,1047 | 0,902 | 0,902 | 20,82 | NO | 0,909 | 0,000 | 0,909 | 0,876 | 21,12 | 0,0137 | 0,023 | 0,871 | 0,962 | 21,08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 40 | 1,1734 | 0,891 | 0,891 | 22,86 | NO | 0,898 | 0,000 | 0,898 | -1,000 | 23,04 | 0,0126 | 0,025 | 0,804 | 0,944 | 22,96 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 41 | 1,1699 | 0,892 | 0,892 | 22,73 | NO | 0,900 | 0,000 | 0,900 | -1,000 | 22,90 | 0,0126 | 0,024 | 0,808 | 0,946 | 22,82 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 42 | 1,2502 | 0,943 | 0,943 | 22,75 | NO | 0,950 | 0,000 | 0,950 | -1,000 | 22,94 | 0,0126 | 0,025 | 0,799 | 0,999 | 22,86 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 43 | 1,2548 | 0,939 | 0,939 | 22,40 | NO | 0,946 | 0,000 | 0,946 | -1,000 | 22,60 | 0,0126 | 0,025 | 0,792 | 0,994 | 22,54 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 45 | 1,3228 | 0,954 | 0,954 | 22,46 | NO | 0,963 | 0,000 | 0,963 | -1,000 | 22,55 | 0,0112 | 0,021 | 0,760 | 1,005 | 22,44 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 46 | 1,3192 | 0,955 | 0,955 | 22,21 | NO | 0,964 | 0,000 | 0,964 | -1,000 | 22,51 | 0,0112 | 0,021 | 0,763 | 1,007 | 22,20 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | 47 | 1,4005 | 1,012 | 1,012 | 22,08 | NO | 1,023 | 0,000 | 1,023 | -1,000 | 22,19 | 0,0116 | 0,020 | 0,763 | 1,069 | 22,08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | 48 | 1,3943 | 0,989 | 0,989 | 22,04 | NO | 0,998 | 0,000 | 0,998 | -1,000 | 22,15 | 0,0114 | 0,020 | 0,748 | 1,043 | 22,04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | 50 | 1,4663 | 1,031 | 1,031 | 22,20 | NO | 1,041 | 0,000 | 1,041 | -1,000 | 22,28 | 0,0111 | 0,020 | 0,740 | 1,085 | 22,16 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | 51 | 1,4676 | 1,039 | 1,039 | 22,34 | NO | 1,050 | 0,000 | 1,050 | -1,000 | 22,41 | 0,0110 | 0,020 | 0,745 | 1,093 | 22,29 | | | | | | | | | | | | | | | |

Abbildung 16: Regenraum r12 z5 Auswertung Übertragungszahlen

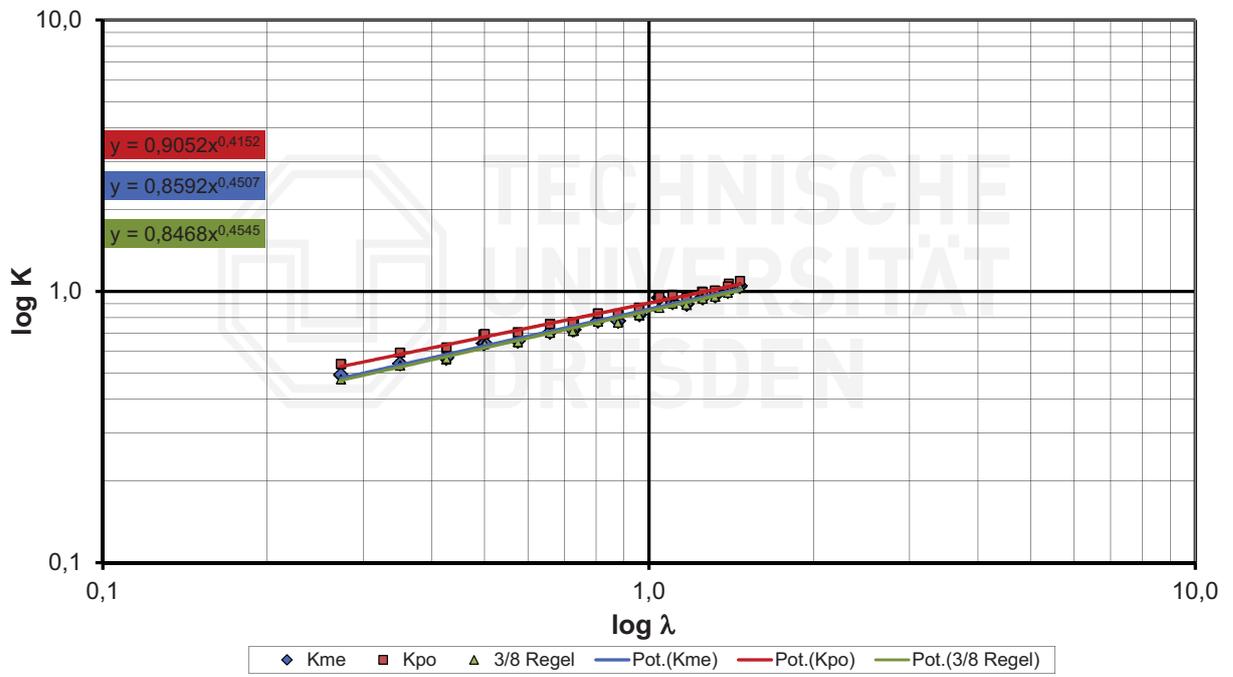


Abbildung 17: Regenraum r12 z5 Diagramm Übertragungszahlen

E.2 Regenraum r12 z10, Messung A

| Read Measurement Data | | | | Filter | | | | Sort | | | | Clear | | | | | | | | | |
|---|--------------|-----------|------------------------------|--|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|-------|-------|---------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| <input checked="" type="checkbox"/> without TXT-Files <input type="checkbox"/> Show error messages max. 1000 measurement points | | | | Pressure: x/1000 Delete Modules | | | | Pressure: x/1000 Delete Modules | | | | Clear | | | | | | | | | |
| | | | | <input type="checkbox"/> Incl. Reg. | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Boundary Conditions | | | | Regenraum | | | | Zelta | | | | Evaluation of Merkel | | | | | | | | | |
| | | | | Type of fill: <input checked="" type="checkbox"/> Regenraum Measurement: <input checked="" type="checkbox"/> Merkel <input type="checkbox"/> Zelta | | | | Fill height: _____ Water distribution: Nozzles Spray height h _z : _____ Editor: Sch | | | | Evaluation of Zelta | | | | | | | | | |
| No. | Date | Frequency | Temperatures water | | | | Temperatures air | | | | Cooling range | Air Pressure | Pressure loss orifice | Pressure loss fills | Volume flow water | Error | Comments | No. Shown in graph | | | |
| Unit | [dd.mm.jjjj] | [Hz] | t _W ⁱⁿ | t _W ^{out} | t _F ⁱⁿ | t _F ^{out} | t _A ⁱⁿ | t _A ^{out} | z | [°C] | [°C] | [°C] | [°C] | [K] | p _A | Δp _{or} | Δp _{Fill} | V _{pl,W} ⁱⁿ | count | | |
| 1 | 18.06.2014 | 9 | 49,36 | 39,30 | 14,98 | 23,53 | 43,13 | 10,1 | 1,002 | 1,002 | 73,7 | 4,5 | 12,1 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,1 | 0 | Alt. fct. used for TF | 18 |
| 2 | 18.06.2014 | 10 | 49,66 | 39,46 | 15,28 | 23,20 | 43,19 | 10,2 | 1,002 | 1,002 | 74,2 | 4,3 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 3 | 18.06.2014 | 11 | 49,51 | 39,46 | 15,46 | 23,94 | 43,21 | 10,1 | 1,002 | 1,002 | 73,9 | 4,3 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 4 | 18.06.2014 | 12 | 47,00 | 36,99 | 15,53 | 21,62 | 39,87 | 10,0 | 1,002 | 1,002 | 119,7 | 5,9 | 12,2 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,2 | | Alt. fct. used for TF | |
| 5 | 18.06.2014 | 13 | 47,18 | 37,14 | 15,71 | 22,14 | 40,07 | 10,1 | 1,002 | 1,002 | 119,6 | 5,8 | 12,3 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,3 | | Alt. fct. used for TF | |
| 6 | 24.06.2014 | 15 | 44,74 | 34,47 | 13,50 | 18,97 | 36,32 | 10,3 | 1,000 | 1,000 | 181,4 | 0,1 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 7 | 24.06.2014 | 16 | 44,98 | 34,58 | 13,62 | 19,27 | 36,45 | 10,4 | 0,999 | 0,999 | 181,2 | 0,1 | 12,1 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,1 | | Alt. fct. used for TF | |
| 8 | 18.06.2014 | 17 | 44,27 | 33,98 | 14,67 | 19,35 | 35,51 | 10,3 | 1,002 | 1,002 | 251,3 | 9,3 | 12,5 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,5 | | Alt. fct. used for TF | |
| 9 | 18.06.2014 | 18 | 44,24 | 33,98 | 14,59 | 19,34 | 35,61 | 10,3 | 1,002 | 1,002 | 254,3 | 9,5 | 12,7 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,7 | | Alt. fct. used for TF | |
| 10 | 18.06.2014 | 19 | 44,10 | 33,72 | 14,81 | 19,68 | 35,09 | 10,4 | 1,002 | 1,002 | 253,3 | 9,2 | 12,1 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,1 | | Alt. fct. used for TF | |
| 11 | 16.06.2014 | 20 | 40,66 | 30,98 | 13,76 | 22,39 | 32,41 | 9,7 | 1,001 | 1,001 | 334,1 | 10,7 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 12 | 16.06.2014 | 21 | 40,50 | 30,94 | 13,86 | 22,49 | 32,41 | 9,6 | 1,001 | 1,001 | 336,5 | 10,7 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 13 | 17.06.2014 | 22 | 40,07 | 30,26 | 14,33 | 21,21 | 31,30 | 9,8 | 1,001 | 1,001 | 433,0 | 12,2 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 14 | 17.06.2014 | 23 | 40,10 | 30,27 | 14,23 | 21,26 | 31,91 | 9,8 | 1,001 | 1,001 | 436,5 | 12,2 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 15 | 16.06.2014 | 25 | 39,24 | 29,31 | 14,01 | 22,48 | 30,63 | 9,9 | 1,000 | 1,000 | 540,4 | 13,8 | 11,9 | Alt. fct. used for TF | | | | 11,9 | | Alt. fct. used for TF | |
| 16 | 16.06.2014 | 26 | 39,45 | 29,41 | 14,11 | 22,28 | 30,48 | 10,0 | 1,000 | 1,000 | 542,0 | 13,8 | 11,9 | Alt. fct. used for TF | | | | 11,9 | | Alt. fct. used for TF | |
| 17 | 17.06.2014 | 27 | 38,98 | 29,03 | 14,75 | 23,09 | 30,88 | 10,0 | 1,001 | 1,001 | 656,9 | 15,3 | 12,1 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,1 | | Alt. fct. used for TF | |
| 18 | 17.06.2014 | 28 | 39,10 | 29,21 | 15,32 | 23,92 | 31,21 | 9,9 | 1,001 | 1,001 | 657,5 | 15,2 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 19 | 16.06.2014 | 30 | 37,58 | 27,87 | 14,20 | 22,50 | 28,97 | 9,7 | 1,000 | 1,000 | 789,1 | 17,6 | 12,1 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,1 | | Alt. fct. used for TF | |
| 20 | 16.06.2014 | 31 | 37,46 | 27,71 | 14,11 | 22,23 | 28,83 | 9,7 | 1,000 | 1,000 | 789,2 | 17,5 | 12,2 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,2 | | Alt. fct. used for TF | |
| 21 | 17.06.2014 | 32 | 38,39 | 27,79 | 14,49 | 21,56 | 28,35 | 10,6 | 1,002 | 1,002 | 933,2 | 18,6 | 12,1 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,1 | | Alt. fct. used for TF | |
| 22 | 17.06.2014 | 33 | 38,64 | 27,99 | 14,61 | 22,33 | 29,37 | 10,7 | 1,002 | 1,002 | 927,1 | 18,8 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 23 | 16.06.2014 | 35 | 36,81 | 26,63 | 14,07 | 22,64 | 27,63 | 10,2 | 0,999 | 0,999 | 1085,1 | 21,2 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 24 | 16.06.2014 | 36 | 36,67 | 26,63 | 14,20 | 22,96 | 27,69 | 10,1 | 0,999 | 0,999 | 1086,5 | 21,4 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 25 | 17.06.2014 | 37 | 35,33 | 25,77 | 14,34 | 21,03 | 26,33 | 9,6 | 1,002 | 1,002 | 1252,9 | 22,9 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 26 | 17.06.2014 | 38 | 35,20 | 25,68 | 14,14 | 21,11 | 26,27 | 9,5 | 1,002 | 1,002 | 1247,3 | 22,8 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 27 | 16.06.2014 | 40 | 34,98 | 25,20 | 14,05 | 22,05 | 26,03 | 9,8 | 0,999 | 0,999 | 1418,1 | 25,8 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 28 | 16.06.2014 | 41 | 34,87 | 25,19 | 14,14 | 22,16 | 26,06 | 9,7 | 0,999 | 0,999 | 1422,0 | 26,0 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 29 | 17.06.2014 | 42 | 35,46 | 25,35 | 14,77 | 21,23 | 26,23 | 10,1 | 1,002 | 1,002 | 1606,6 | 27,6 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 30 | 17.06.2014 | 43 | 35,52 | 25,23 | 14,54 | 21,05 | 26,20 | 10,3 | 1,002 | 1,002 | 1604,4 | 27,7 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 31 | 17.06.2014 | 45 | 34,71 | 24,62 | 14,22 | 19,48 | 24,67 | 10,1 | 1,002 | 1,002 | 1815,5 | 31,0 | 12,1 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,1 | | Alt. fct. used for TF | |
| 32 | 17.06.2014 | 46 | 34,76 | 24,76 | 14,59 | 20,31 | 25,10 | 10,0 | 1,002 | 1,002 | 1805,7 | 31,2 | 12,1 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,1 | | Alt. fct. used for TF | |
| 33 | 17.06.2014 | 47 | 33,46 | 23,95 | 14,63 | 20,53 | 24,64 | 9,5 | 1,002 | 1,002 | 1997,0 | 34,1 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 34 | 17.06.2014 | 48 | 33,52 | 23,91 | 14,42 | 20,35 | 24,46 | 9,6 | 1,002 | 1,002 | 2008,6 | 34,4 | 12,0 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,0 | | Alt. fct. used for TF | |
| 35 | 17.06.2014 | 50 | 33,98 | 23,86 | 14,41 | 19,54 | 24,12 | 10,1 | 1,003 | 1,003 | 2239,4 | 38,8 | 12,1 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,1 | | Alt. fct. used for TF | |
| 36 | 17.06.2014 | 51 | 33,73 | 23,66 | 14,10 | 19,56 | 24,08 | 10,1 | 1,002 | 1,002 | 2231,5 | 39,5 | 12,1 | Alt. fct. used for TF | | | | 12,1 | | Alt. fct. used for TF | |

Abbildung 18: Regenraum r12 z10 Messdaten, Messung A

Calculation of transfer numbers

| Test No. | Hz | λ | Simpson | 3/8 Regel | $t_{c, out}$ | Saturated? | K_V | K_W | K _{me} | Tab. Int. | $t_{c, out}$ | $x_{L, out}$ | m_{th} | NTU | K _{po} | $t_{c, out}$ | KINKELDEI |
|----------|----|-----------|---------|-----------|--------------|------------|-------|-------|-----------------|-----------|--------------|--------------|----------|-------|-----------------|--------------|-----------|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 9 | 0,2724 | 0,469 | 0,469 | 43,15 | YES | 0,470 | 0,586 | 0,526 | 0,539 | 43,29 | 0,063270 | 0,187 | 1,995 | 0,543 | 43,10 | |
| 2 | 10 | 0,2757 | 0,466 | 0,466 | 43,29 | YES | 0,468 | 0,585 | 0,528 | 0,544 | 43,31 | 0,063767 | 0,185 | 1,959 | 0,540 | 43,22 | |
| 3 | 11 | 0,2739 | 0,464 | 0,464 | 43,20 | YES | 0,465 | 0,581 | 0,520 | 0,530 | 43,32 | 0,063364 | 0,185 | 1,957 | 0,536 | 43,13 | |
| 4 | 12 | 0,3426 | 0,508 | 0,508 | 39,77 | YES | 0,510 | 0,641 | 0,581 | 0,587 | 39,57 | 0,051939 | 0,146 | 1,688 | 0,578 | 39,70 | |
| 5 | 13 | 0,3402 | 0,508 | 0,508 | 40,00 | YES | 0,509 | 0,640 | 0,577 | 0,580 | 39,85 | 0,052554 | 0,149 | 1,698 | 0,578 | 39,92 | |
| 6 | 15 | 0,4299 | 0,546 | 0,546 | 36,09 | YES | 0,547 | 0,703 | 0,633 | 0,632 | 35,61 | 0,042140 | 0,115 | 1,421 | 0,611 | 36,04 | |
| 7 | 16 | 0,4286 | 0,551 | 0,551 | 36,42 | YES | 0,552 | 0,710 | 0,637 | 0,635 | 35,93 | 0,042813 | 0,118 | 1,437 | 0,616 | 36,32 | |
| 8 | 17 | 0,4841 | 0,560 | 0,560 | 35,02 | YES | 0,561 | 0,724 | 0,652 | 0,643 | 34,45 | 0,039282 | 0,106 | 1,286 | 0,623 | 34,92 | |
| 9 | 18 | 0,4809 | 0,559 | 0,559 | 35,04 | YES | 0,560 | 0,723 | 0,650 | 0,641 | 34,47 | 0,039299 | 0,108 | 1,291 | 0,621 | 34,93 | |
| 10 | 19 | 0,5024 | 0,571 | 0,571 | 34,71 | YES | 0,572 | 0,739 | 0,661 | 0,646 | 34,20 | 0,038465 | 0,100 | 1,260 | 0,633 | 34,60 | |
| 11 | 20 | 0,5830 | 0,630 | 0,630 | 31,35 | YES | 0,632 | 0,800 | 0,638 | 0,646 | 32,12 | 0,030721 | 0,081 | 1,175 | 0,685 | 32,03 | |
| 12 | 21 | 0,5821 | 0,629 | 0,629 | 31,27 | YES | 0,631 | 0,797 | 0,636 | 0,644 | 32,08 | 0,030557 | 0,080 | 1,175 | 0,684 | 31,98 | |
| 13 | 22 | 0,6616 | 0,664 | 0,664 | 30,30 | YES | 0,666 | 0,840 | 0,683 | 0,675 | 30,78 | 0,028847 | 0,071 | 1,087 | 0,719 | 30,68 | |
| 14 | 23 | 0,6627 | 0,661 | 0,661 | 30,26 | YES | 0,663 | 0,840 | 0,679 | 0,673 | 30,77 | 0,028751 | 0,071 | 1,080 | 0,716 | 30,68 | |
| 15 | 25 | 0,7449 | 0,692 | 0,692 | 29,39 | NO | 0,694 | 0,000 | 0,694 | 0,703 | 30,19 | 0,026163 | 0,064 | 1,002 | 0,746 | 30,13 | |
| 16 | 26 | 0,7466 | 0,695 | 0,695 | 29,41 | NO | 0,696 | 0,000 | 0,696 | 0,705 | 30,22 | 0,026476 | 0,065 | 1,004 | 0,749 | 30,15 | |
| 17 | 27 | 0,8075 | 0,716 | 0,716 | 29,28 | NO | 0,718 | 0,000 | 0,718 | 0,723 | 30,00 | 0,025308 | 0,061 | 0,954 | 0,771 | 29,92 | |
| 18 | 28 | 0,8078 | 0,717 | 0,717 | 29,73 | NO | 0,719 | 0,000 | 0,719 | 0,723 | 30,42 | 0,025621 | 0,061 | 0,956 | 0,772 | 30,33 | |
| 19 | 30 | 0,8791 | 0,747 | 0,747 | 28,12 | NO | 0,749 | 0,000 | 0,749 | 0,754 | 28,76 | 0,023021 | 0,055 | 0,912 | 0,802 | 28,71 | |
| 20 | 31 | 0,8778 | 0,759 | 0,759 | 28,00 | NO | 0,761 | 0,000 | 0,761 | 0,766 | 28,65 | 0,023061 | 0,055 | 0,928 | 0,815 | 28,59 | |
| 21 | 32 | 0,9606 | 0,797 | 0,797 | 27,79 | NO | 0,799 | 0,000 | 0,799 | 0,801 | 28,44 | 0,023440 | 0,053 | 0,890 | 0,855 | 28,38 | |
| 22 | 33 | 0,9592 | 0,788 | 0,788 | 28,22 | NO | 0,790 | 0,000 | 0,790 | 0,793 | 28,86 | 0,023514 | 0,054 | 0,881 | 0,845 | 28,79 | |
| 23 | 35 | 1,0393 | 0,829 | 0,829 | 27,41 | NO | 0,832 | 0,000 | 0,832 | 0,844 | 27,93 | 0,021057 | 0,048 | 0,853 | 0,887 | 27,88 | |
| 24 | 36 | 1,0417 | 0,826 | 0,826 | 27,50 | NO | 0,829 | 0,000 | 0,829 | 0,843 | 28,01 | 0,020915 | 0,048 | 0,848 | 0,884 | 27,96 | |
| 25 | 37 | 1,1175 | 0,864 | 0,864 | 25,91 | NO | 0,867 | 0,000 | 0,867 | 0,860 | 26,40 | 0,019848 | 0,041 | 0,826 | 0,923 | 26,35 | |
| 26 | 38 | 1,1138 | 0,862 | 0,862 | 25,90 | NO | 0,865 | 0,000 | 0,865 | 0,860 | 26,39 | 0,019639 | 0,041 | 0,827 | 0,921 | 26,33 | |
| 27 | 40 | 1,1860 | 0,903 | 0,903 | 26,12 | NO | 0,906 | 0,000 | 0,906 | 0,919 | 26,55 | 0,018968 | 0,041 | 0,812 | 0,963 | 26,50 | |
| 28 | 41 | 1,1849 | 0,901 | 0,901 | 26,14 | NO | 0,904 | 0,000 | 0,904 | 0,916 | 26,57 | 0,018916 | 0,040 | 0,811 | 0,961 | 26,51 | |
| 29 | 42 | 1,2660 | 0,934 | 0,934 | 25,76 | NO | 0,938 | 0,000 | 0,938 | 0,927 | 26,20 | 0,019420 | 0,038 | 0,788 | 0,997 | 26,13 | |
| 30 | 43 | 1,2659 | 0,946 | 0,946 | 25,70 | NO | 0,950 | 0,000 | 0,950 | 0,950 | 26,14 | 0,019428 | 0,039 | 0,798 | 1,010 | 26,08 | |
| 31 | 45 | 1,3351 | 0,968 | 0,968 | 24,44 | NO | 0,972 | 0,000 | 0,972 | 0,955 | 24,89 | 0,018640 | 0,036 | 0,773 | 1,032 | 24,84 | |
| 32 | 46 | 1,3347 | 0,968 | 0,968 | 24,91 | NO | 0,972 | 0,000 | 0,972 | 0,955 | 25,33 | 0,018744 | 0,036 | 0,774 | 1,033 | 25,27 | |
| 33 | 47 | 1,4121 | 1,013 | 1,013 | 24,48 | NO | 1,018 | 0,000 | 1,018 | 1,000 | 24,84 | 0,017685 | 0,032 | 0,765 | 1,080 | 24,77 | |
| 34 | 48 | 1,4162 | 1,011 | 1,011 | 24,38 | NO | 1,016 | 0,000 | 1,016 | 0,999 | 24,74 | 0,017585 | 0,032 | 0,760 | 1,077 | 24,68 | |
| 35 | 50 | 1,4831 | 1,043 | 1,043 | 24,00 | NO | 1,047 | 0,000 | 1,047 | 1,024 | 24,37 | 0,017791 | 0,032 | 0,749 | 1,111 | 24,32 | |
| 36 | 51 | 1,4781 | 1,043 | 1,043 | 23,91 | NO | 1,048 | 0,000 | 1,048 | 1,030 | 24,29 | 0,017471 | 0,032 | 0,751 | 1,111 | 24,24 | |

Abbildung 20: Regenraum r12 z10 Auswertung Übertragungszahlen, Messung A

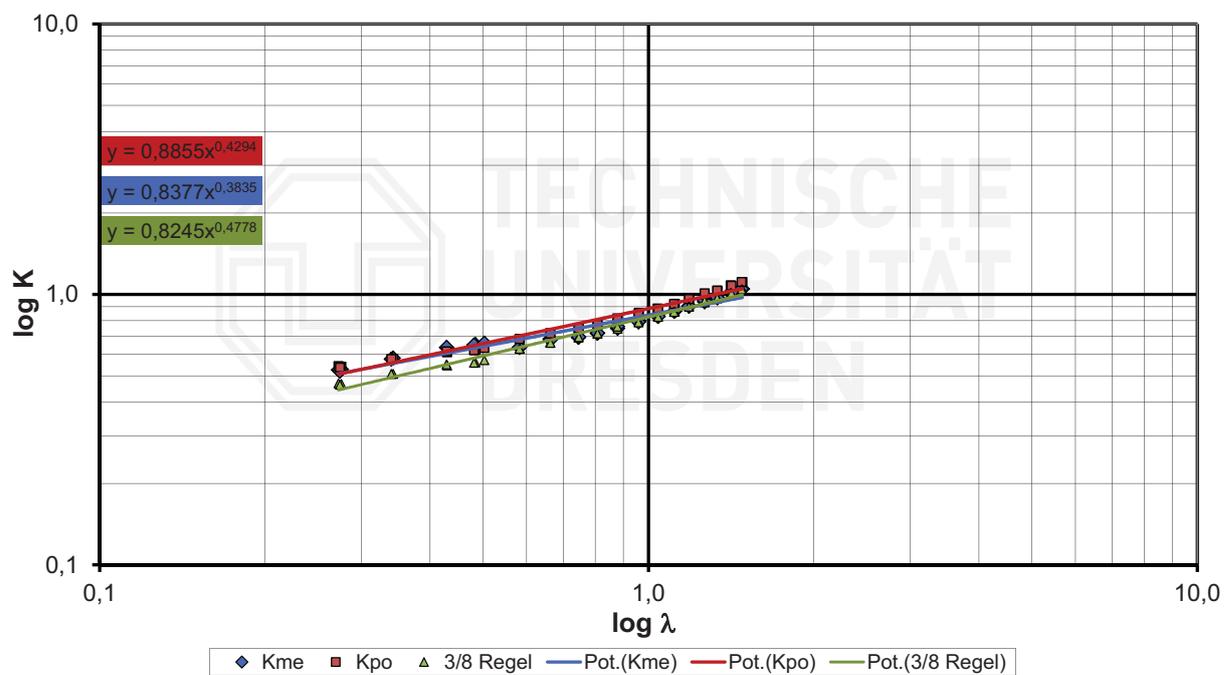


Abbildung 21: Regenraum r12 z10 Diagramm Übertragungszahlen, Messung A

E.3 Regenraum r12 z10, Messung B

| Read Measurement Data | | | | Filter | | | | Sort | | | | Clear | | | |
|--|-----------|-------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|---|---|--|----------------|-----------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> Show error messages | | | | Pressure: x/1000 | | | | Pressure: x*1000 | | | | Delete Modules | | | |
| max. 1000 measurement points | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. | Date | Frequency [Hz] | Temperatures water | | Temperatures air | | Cooling range | | Air Pressure Pu [bar] | Pressure loss orifice ΔP_{or} [Pa] | Pressure loss fills ΔP_{Fill} [Pa] | Volume flow water $V_{pl,W}$ Out [m³/h] | Error count | Comments | No. Shown in graph |
| | | | $t_{w,In}$ In [°C] | $t_{w,Out}$ Out [°C] | $t_{a,In}$ In [°C] | $t_{a,Out}$ Out [°C] | KZB | | | | | | | | |
| 1 | 4.06.2012 | 10 | 45,4 | 35,5 | 10,3 | 12,2 | 40,0 | 9,9 | 0,994 | 65,9 | 8,4 | 12,3 | 0 | | 1 |
| 2 | 4.06.2012 | 10 | 45,4 | 35,5 | 10,3 | 12,2 | 40,0 | 9,9 | 0,994 | 65,4 | 8,5 | 12,3 | | | |
| 3 | 4.06.2012 | 10 | 45,4 | 35,5 | 10,3 | 12,1 | 40,0 | 9,9 | 0,994 | 65,9 | 8,4 | 12,3 | | | |
| 4 | 4.06.2012 | 10 | 45,3 | 35,4 | 10,5 | 12,3 | 40,0 | 9,9 | 0,994 | 66,3 | 8,4 | 12,2 | | | |
| 5 | 4.06.2012 | 10 | 45,3 | 35,5 | 10,5 | 12,2 | 40,0 | 9,7 | 0,994 | 66,2 | 8,3 | 12,3 | | | |
| 6 | 4.06.2012 | 11 | 45,2 | 35,4 | 10,6 | 12,5 | 39,9 | 9,8 | 0,994 | 65,6 | 8,5 | 12,3 | | | |
| 7 | 4.06.2012 | 11 | 45,3 | 35,4 | 10,6 | 12,4 | 39,9 | 9,9 | 0,994 | 65,9 | 8,4 | 12,3 | | | |
| 8 | 4.06.2012 | 11 | 45,2 | 35,4 | 10,6 | 12,4 | 39,9 | 9,8 | 0,994 | 66,2 | 8,5 | 12,3 | | | |
| 9 | 4.06.2012 | 11 | 45,2 | 35,4 | 10,7 | 12,6 | 39,8 | 9,8 | 0,994 | 65,2 | 8,5 | 12,2 | | | |
| 10 | 4.06.2012 | 11 | 45,2 | 35,6 | 10,8 | 12,8 | 39,9 | 9,6 | 0,994 | 64,7 | 8,5 | 12,2 | | | |
| 11 | 4.06.2012 | 30 | 36,4 | 26,0 | 13,6 | 17,5 | 25,3 | 10,4 | 0,993 | 562,4 | 34,7 | 11,9 | | Alt. fct. used for tF | |
| 12 | 4.06.2012 | 30 | 36,4 | 26,0 | 13,7 | 17,5 | 25,4 | 10,4 | 0,993 | 562,6 | 34,9 | 12,0 | | Alt. fct. used for tF | |
| 13 | 4.06.2012 | 30 | 36,4 | 26,0 | 13,6 | 17,5 | 25,4 | 10,4 | 0,993 | 561,9 | 34,9 | 11,9 | | Alt. fct. used for tF | |
| 14 | 4.06.2012 | 30 | 36,4 | 26,0 | 13,6 | 17,5 | 25,3 | 10,4 | 0,993 | 566,4 | 33,9 | 11,9 | | Alt. fct. used for tF | |
| 15 | 4.06.2012 | 30 | 36,4 | 26,0 | 13,5 | 17,4 | 25,3 | 10,4 | 0,993 | 550,5 | 35,8 | 11,9 | | Alt. fct. used for tF | |
| 16 | 4.06.2012 | 31 | 36,4 | 25,9 | 13,5 | 17,1 | 25,2 | 10,5 | 0,993 | 565,9 | 34,1 | 11,9 | | Alt. fct. used for tF | |
| 17 | 4.06.2012 | 31 | 36,4 | 26,0 | 13,7 | 17,4 | 25,4 | 10,4 | 0,993 | 564,4 | 34,9 | 11,9 | | Alt. fct. used for tF | |
| 18 | 4.06.2012 | 31 | 36,4 | 25,9 | 13,5 | 17,0 | 25,2 | 10,5 | 0,993 | 562,3 | 33,2 | 12,0 | | Alt. fct. used for tF | |
| 19 | 4.06.2012 | 31 | 36,4 | 25,9 | 13,5 | 16,9 | 25,1 | 10,5 | 0,993 | 570,0 | 34,1 | 11,9 | | Alt. fct. used for tF | |
| 20 | 4.06.2012 | 31 | 36,4 | 25,9 | 13,3 | 16,7 | 25,0 | 10,5 | 0,993 | 569,0 | 34,6 | 12,0 | | Alt. fct. used for tF | |
| 21 | 4.06.2012 | 40 | 33,4 | 23,4 | 13,1 | 17,1 | 22,8 | 10,1 | 0,993 | 1006,4 | 38,4 | 11,9 | | Alt. fct. used for tF | |
| 22 | 4.06.2012 | 40 | 33,4 | 23,4 | 13,2 | 17,1 | 22,9 | 10,1 | 0,993 | 997,2 | 38,7 | 11,9 | | Alt. fct. used for tF | |
| 23 | 4.06.2012 | 40 | 33,4 | 23,3 | 13,1 | 17,0 | 22,8 | 10,1 | 0,993 | 1003,6 | 37,4 | 11,9 | | Alt. fct. used for tF | |
| 24 | 4.06.2012 | 40 | 33,5 | 23,4 | 13,2 | 17,2 | 22,9 | 10,1 | 0,993 | 1016,5 | 39,1 | 11,8 | | Alt. fct. used for tF | |
| 25 | 4.06.2012 | 40 | 33,5 | 23,4 | 13,1 | 17,1 | 22,7 | 10,1 | 0,993 | 1012,5 | 38,7 | 11,8 | | Alt. fct. used for tF | |
| 26 | 4.06.2012 | 41 | 33,5 | 23,2 | 12,5 | 16,1 | 22,5 | 10,3 | 0,993 | 1004,2 | 38,5 | 11,8 | | Alt. fct. used for tF | |
| 27 | 4.06.2012 | 41 | 33,5 | 23,1 | 12,4 | 15,9 | 22,4 | 10,4 | 0,993 | 1004,8 | 38,6 | 11,8 | | Alt. fct. used for tF | |
| 28 | 4.06.2012 | 41 | 33,5 | 23,2 | 12,5 | 16,1 | 22,5 | 10,3 | 0,993 | 1013,2 | 39,2 | 11,8 | | Alt. fct. used for tF | |
| 29 | 4.06.2012 | 41 | 33,5 | 23,2 | 12,6 | 16,2 | 22,5 | 10,3 | 0,993 | 995,0 | 38,6 | 11,9 | | Alt. fct. used for tF | |
| 30 | 4.06.2012 | 41 | 33,5 | 23,3 | 12,7 | 16,4 | 22,6 | 10,2 | 0,993 | 1002,6 | 37,4 | 11,8 | | Alt. fct. used for tF | |

Abbildung 22: Regenraum r12 z10, Messung B

| No. | Frequency [Hz] | Density water | | Heat capacity water | | Mass flow water | | Mass flow wet air | | Mass flow dry air | | Humidity ratio | | Air ratio | | Density air | | Kinematic viscosity air | | Heat capacity air | | Pressure loss coefficient | | Velocity Air | |
|-----|----------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------|----------------|---------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------|-------------------|-----------|---------------------------|--|--------------|--|
| | | ρ_w [kg/m ³] | ρ_w^w [kg/m ³] | $c_{p,w}$ [kJ/(kg K)] | $c_{p,w}$ [kJ/(kg K)] | $m_{PKt,W}$ [kg/s] | $m_{PKt,W}$ [kg/s] | $m_{PKt,A}$ [kg/s] | $m_{PKt,A}$ [kg/s] | x [kg/kg] | x [kg/kg] | A [-] | A [-] | A [kg/m ³] | A [m ² /s] | $c_{p,A}$ [kJ/(kg K)] | $c_{p,A}$ [kJ/(kg K)] | λ [-] | λ [-] | w [m/s] | w [m/s] | | | | |
| 1 | 10 | 992,0600 | 4,1786 | 3,3850 | 1,2863 | 1,2771 | 0,007166006 | 0,3773 | 1,2079 | 0,00001480 | 1,0117 | 11,6382 | 1,065 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 10 | 992,0515 | 4,1786 | 3,3882 | 1,2814 | 1,2723 | 0,007119815 | 0,3755 | 1,2080 | 0,00001480 | 1,0116 | 11,7621 | 1,061 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 10 | 992,0569 | 4,1786 | 3,3912 | 1,2858 | 1,2767 | 0,007136675 | 0,3765 | 1,2081 | 0,00001480 | 1,0116 | 11,6644 | 1,064 | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 10 | 992,0746 | 4,1786 | 3,3731 | 1,2900 | 1,2808 | 0,007260669 | 0,3797 | 1,2075 | 0,00001481 | 1,0118 | 11,5599 | 1,068 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 10 | 992,0700 | 4,1786 | 3,3978 | 1,2885 | 1,2792 | 0,007294823 | 0,3765 | 1,2076 | 0,00001481 | 1,0118 | 11,4082 | 1,067 | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 11 | 992,1000 | 4,1786 | 3,3788 | 1,2825 | 1,2732 | 0,007312425 | 0,3768 | 1,2064 | 0,00001483 | 1,0119 | 11,7401 | 1,063 | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 11 | 992,0955 | 4,1786 | 3,3888 | 1,2856 | 1,2763 | 0,007323455 | 0,3766 | 1,2066 | 0,00001483 | 1,0119 | 11,6078 | 1,065 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 11 | 992,0934 | 4,1786 | 3,3834 | 1,2880 | 1,2787 | 0,007288177 | 0,3779 | 1,2067 | 0,00001483 | 1,0118 | 11,6485 | 1,067 | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 11 | 992,1194 | 4,1786 | 3,3666 | 1,2783 | 1,2690 | 0,007309666 | 0,3770 | 1,2059 | 0,00001484 | 1,0119 | 11,8762 | 1,066 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 11 | 992,0869 | 4,1786 | 3,3724 | 1,2729 | 1,2635 | 0,007392358 | 0,3747 | 1,2052 | 0,00001486 | 1,0120 | 12,0176 | 1,056 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 30 | 995,2834 | 4,1797 | 3,2992 | 3,6955 | 3,6652 | 0,008264870 | 1,1109 | 1,1838 | 0,00001531 | 1,0136 | 5,9219 | 3,122 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 30 | 995,2784 | 4,1797 | 3,3112 | 3,6957 | 3,6653 | 0,008302288 | 1,1070 | 1,1836 | 0,00001531 | 1,0136 | 5,9466 | 3,122 | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 30 | 995,2769 | 4,1797 | 3,2933 | 3,6937 | 3,6633 | 0,008296648 | 1,1124 | 1,1836 | 0,00001531 | 1,0136 | 5,9610 | 3,121 | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 30 | 995,2895 | 4,1797 | 3,2964 | 3,7085 | 3,6783 | 0,008229185 | 1,1158 | 1,1839 | 0,00001531 | 1,0135 | 5,7340 | 3,133 | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 30 | 995,2931 | 4,1797 | 3,2916 | 3,6570 | 3,6272 | 0,008217118 | 1,1020 | 1,1841 | 0,00001530 | 1,0135 | 6,2292 | 3,088 | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 31 | 995,2895 | 4,1797 | 3,3010 | 3,7093 | 3,6786 | 0,008366929 | 1,1144 | 1,1854 | 0,00001527 | 1,0136 | 5,7776 | 3,129 | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 31 | 995,2781 | 4,1797 | 3,2992 | 3,7022 | 3,6715 | 0,008369351 | 1,1129 | 1,1839 | 0,00001531 | 1,0136 | 5,9345 | 3,127 | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 31 | 995,2935 | 4,1797 | 3,3046 | 3,6976 | 3,6669 | 0,008366663 | 1,1097 | 1,1855 | 0,00001527 | 1,0136 | 5,6566 | 3,119 | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 31 | 995,2936 | 4,1797 | 3,2974 | 3,7239 | 3,6930 | 0,008381268 | 1,1200 | 1,1862 | 0,00001526 | 1,0136 | 5,7249 | 3,139 | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 31 | 995,2993 | 4,1797 | 3,3072 | 3,7220 | 3,6913 | 0,008319056 | 1,1162 | 1,1870 | 0,00001524 | 1,0135 | 5,8281 | 3,136 | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 40 | 996,1197 | 4,1805 | 3,2794 | 4,9355 | 4,8966 | 0,007948771 | 1,4931 | 1,1861 | 0,00001526 | 1,0132 | 3,6957 | 4,161 | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 40 | 996,1227 | 4,1805 | 3,2811 | 4,9130 | 4,8741 | 0,007980273 | 1,4855 | 1,1860 | 0,00001527 | 1,0132 | 3,7551 | 4,142 | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 40 | 996,1265 | 4,1805 | 3,2793 | 4,9295 | 4,8907 | 0,007938075 | 1,4914 | 1,1865 | 0,00001525 | 1,0132 | 3,6031 | 4,155 | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 40 | 996,1132 | 4,1805 | 3,2781 | 4,9589 | 4,9198 | 0,007943768 | 1,5008 | 1,1856 | 0,00001527 | 1,0132 | 3,7279 | 4,183 | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 40 | 996,1092 | 4,1805 | 3,2783 | 4,9503 | 4,9115 | 0,007901630 | 1,4982 | 1,1862 | 0,00001526 | 1,0132 | 3,6990 | 4,173 | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 41 | 996,1392 | 4,1806 | 3,2718 | 4,9386 | 4,9008 | 0,007720289 | 1,4979 | 1,1902 | 0,00001517 | 1,0129 | 3,7087 | 4,149 | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 41 | 996,1443 | 4,1806 | 3,2740 | 4,9419 | 4,9042 | 0,007685306 | 1,4979 | 1,1911 | 0,00001515 | 1,0128 | 3,7173 | 4,149 | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 41 | 996,1346 | 4,1805 | 3,2603 | 4,9605 | 4,9225 | 0,007731436 | 1,5098 | 1,1903 | 0,00001517 | 1,0129 | 3,7422 | 4,168 | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 41 | 996,1414 | 4,1806 | 3,2799 | 4,9151 | 4,8775 | 0,007718729 | 1,4871 | 1,1897 | 0,00001518 | 1,0129 | 3,7469 | 4,131 | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 41 | 996,1329 | 4,1805 | 3,2714 | 4,9318 | 4,8937 | 0,007795557 | 1,4959 | 1,1889 | 0,00001520 | 1,0130 | 3,6108 | 4,148 | | | | | | | | | | | | |

Abbildung 23: Regenraum r12 z10 Auswertung Zustandsgrößen, Messung B

Calculation of transfer numbers

| Test No. | Hz | λ | SIMPSON | | | EULER | | | $t_{1,2}$ | Saturated? | K_V | K_W | K _{me} | $t_{1,2}$ | $x_{1,2}$ | m_b | NTU | K _{po} |
|----------|----|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|-----------|------------|--------|--------|-----------------|-----------|-----------|--------|--------|-----------------|
| | | | 0,6107 | 0,4668 | 0,4659 | 0,6283 | 0,6080 | 36,3338 | | | | | | | | | | |
| 1 | 10 | 0,3773 | 0,6107 | 0,4668 | 0,4659 | 0,6283 | 0,6080 | 36,3338 | YES | 0,4659 | 0,6283 | 0,6080 | 34,6107 | 0,0442 | 0,1252 | 1,4141 | 0,5335 | |
| 2 | 10 | 0,3755 | 0,6103 | 0,4665 | 0,4657 | 0,6282 | 0,6076 | 36,3935 | YES | 0,4657 | 0,6282 | 0,6076 | 34,6755 | 0,0443 | 0,1260 | 1,4205 | 0,5334 | |
| 3 | 10 | 0,3765 | 0,6098 | 0,4659 | 0,4654 | 0,6273 | 0,6071 | 36,3376 | YES | 0,4654 | 0,6273 | 0,6071 | 34,6206 | 0,0442 | 0,1257 | 1,4160 | 0,5331 | |
| 4 | 10 | 0,3797 | 0,6127 | 0,4676 | 0,4668 | 0,6300 | 0,6098 | 36,2845 | YES | 0,4668 | 0,6300 | 0,6098 | 34,5489 | 0,0440 | 0,1239 | 1,4077 | 0,5345 | |
| 5 | 10 | 0,3765 | 0,6027 | 0,4595 | 0,4588 | 0,6185 | 0,6001 | 36,1639 | YES | 0,4588 | 0,6185 | 0,6001 | 34,4413 | 0,0438 | 0,1241 | 1,3955 | 0,5254 | |
| 6 | 11 | 0,3768 | 0,6139 | 0,4700 | 0,4696 | 0,6318 | 0,6111 | 36,3704 | YES | 0,4696 | 0,6318 | 0,6111 | 34,7102 | 0,0441 | 0,1243 | 1,4273 | 0,5379 | |
| 7 | 11 | 0,3766 | 0,6160 | 0,4756 | 0,4750 | 0,6330 | 0,6132 | 36,4164 | YES | 0,4750 | 0,6330 | 0,6132 | 34,8565 | 0,0444 | 0,1257 | 1,4461 | 0,5446 | |
| 8 | 11 | 0,3779 | 0,6080 | 0,4660 | 0,4656 | 0,6255 | 0,6052 | 36,2217 | YES | 0,4656 | 0,6255 | 0,6052 | 34,5660 | 0,0439 | 0,1238 | 1,4101 | 0,5329 | |
| 9 | 11 | 0,3770 | 0,6137 | 0,4728 | 0,4720 | 0,6316 | 0,6109 | 36,3294 | YES | 0,4720 | 0,6316 | 0,6109 | 34,7489 | 0,0441 | 0,1238 | 1,4342 | 0,5406 | |
| 10 | 11 | 0,3747 | 0,5953 | 0,4558 | 0,4550 | 0,6149 | 0,5929 | 36,1578 | YES | 0,4550 | 0,6149 | 0,5929 | 34,4772 | 0,0436 | 0,1221 | 1,3886 | 0,5203 | |
| 11 | 30 | 1,1109 | 0,9117 | 0,8651 | 0,8628 | 1,0773 | 0,9047 | 25,0861 | YES | 0,8628 | 1,0773 | 0,9047 | 25,1982 | 0,0211 | 0,0423 | 0,8295 | 0,9215 | |
| 12 | 30 | 1,1070 | 0,9131 | 0,8668 | 0,8644 | 1,0771 | 0,9060 | 25,1396 | YES | 0,8644 | 1,0771 | 0,9060 | 25,2552 | 0,0212 | 0,0426 | 0,8342 | 0,9234 | |
| 13 | 30 | 1,1124 | 0,9102 | 0,8635 | 0,8612 | 1,0761 | 0,9031 | 25,0960 | YES | 0,8612 | 1,0761 | 0,9031 | 25,2060 | 0,0211 | 0,0422 | 0,8268 | 0,9197 | |
| 14 | 30 | 1,1158 | 0,9072 | 0,8634 | 0,8608 | 1,0734 | 0,9004 | 24,9971 | YES | 0,8608 | 1,0734 | 0,9004 | 25,1366 | 0,0210 | 0,0421 | 0,8237 | 0,9192 | |
| 15 | 30 | 1,1020 | 0,9191 | 0,8703 | 0,8678 | 1,0825 | 0,9117 | 25,1384 | YES | 0,8678 | 1,0825 | 0,9117 | 25,2303 | 0,0212 | 0,0427 | 0,8414 | 0,9272 | |
| 16 | 31 | 1,1144 | 0,9349 | 0,8709 | 0,8683 | 1,0838 | 0,9259 | 25,0731 | YES | 0,8683 | 1,0838 | 0,9259 | 25,0564 | 0,0212 | 0,0423 | 0,8337 | 0,9290 | |
| 17 | 31 | 1,1129 | 0,9198 | 0,8685 | 0,8657 | 1,0771 | 0,9121 | 25,1099 | YES | 0,8657 | 1,0771 | 0,9121 | 25,2011 | 0,0212 | 0,0423 | 0,8312 | 0,9251 | |
| 18 | 31 | 1,1097 | 0,9383 | 0,8731 | 0,8707 | 1,0835 | 0,9291 | 25,0918 | YES | 0,8707 | 1,0835 | 0,9291 | 25,0817 | 0,0212 | 0,0425 | 0,8397 | 0,9318 | |
| 19 | 31 | 1,1200 | 0,9434 | 0,8701 | 0,8676 | 1,0856 | 0,9335 | 25,0157 | YES | 0,8676 | 1,0856 | 0,9335 | 24,9386 | 0,0211 | 0,0420 | 0,8294 | 0,9289 | |
| 20 | 31 | 1,1162 | 0,9511 | 0,8737 | 0,8713 | 1,0877 | 0,9407 | 24,9988 | YES | 0,8713 | 1,0877 | 0,9407 | 24,9032 | 0,0211 | 0,0425 | 0,8363 | 0,9335 | |
| 21 | 40 | 1,4931 | 1,0124 | 1,0128 | 1,0099 | 0,0000 | 1,0099 | 22,2872 | NO | 1,0099 | 0,0000 | 1,0099 | 22,7139 | 0,0171 | 0,0301 | 0,7166 | 1,0700 | |
| 22 | 40 | 1,4855 | 1,0155 | 1,0160 | 1,0129 | 0,0000 | 1,0129 | 22,3143 | NO | 1,0129 | 0,0000 | 1,0129 | 22,7430 | 0,0172 | 0,0302 | 0,7226 | 1,0734 | |
| 23 | 40 | 1,4914 | 1,0147 | 1,0152 | 1,0121 | 0,0000 | 1,0121 | 22,2334 | NO | 1,0121 | 0,0000 | 1,0121 | 22,6633 | 0,0171 | 0,0301 | 0,7191 | 1,0725 | |
| 24 | 40 | 1,5008 | 1,0091 | 1,0096 | 1,0065 | 0,0000 | 1,0065 | 22,3238 | NO | 1,0065 | 0,0000 | 1,0065 | 22,7452 | 0,0171 | 0,0299 | 0,7106 | 1,0664 | |
| 25 | 40 | 1,4982 | 1,0065 | 1,0069 | 1,0040 | 0,0000 | 1,0040 | 22,2604 | NO | 1,0040 | 0,0000 | 1,0040 | 22,6867 | 0,0170 | 0,0300 | 0,7100 | 1,0637 | |
| 26 | 41 | 1,4979 | 1,0160 | 1,0119 | 1,0086 | 1,2378 | 1,0128 | 21,7743 | YES | 1,0086 | 1,2378 | 1,0128 | 22,1721 | 0,0169 | 0,0301 | 0,7135 | 1,0688 | |
| 27 | 41 | 1,4979 | 1,0287 | 1,0148 | 1,0121 | 1,2440 | 1,0243 | 21,7461 | YES | 1,0121 | 1,2440 | 1,0243 | 22,0695 | 0,0169 | 0,0303 | 0,7160 | 1,0725 | |
| 28 | 41 | 1,5098 | 1,0144 | 1,0096 | 1,0070 | 1,2367 | 1,0112 | 21,7260 | YES | 1,0070 | 1,2367 | 1,0112 | 22,1217 | 0,0169 | 0,0298 | 0,7067 | 1,0669 | |
| 29 | 41 | 1,4871 | 1,0111 | 1,0113 | 1,0085 | 0,0000 | 1,0085 | 21,8048 | NO | 1,0085 | 0,0000 | 1,0085 | 22,2577 | 0,0170 | 0,0304 | 0,7187 | 1,0687 | |
| 30 | 41 | 1,4959 | 1,0069 | 1,0076 | 1,0044 | 0,0000 | 1,0044 | 21,8868 | NO | 1,0044 | 0,0000 | 1,0044 | 22,3310 | 0,0170 | 0,0300 | 0,7115 | 1,0643 | |

Abbildung 24: Regenraum r12 z10 Auswertung Übertragungszahlen, Messung B

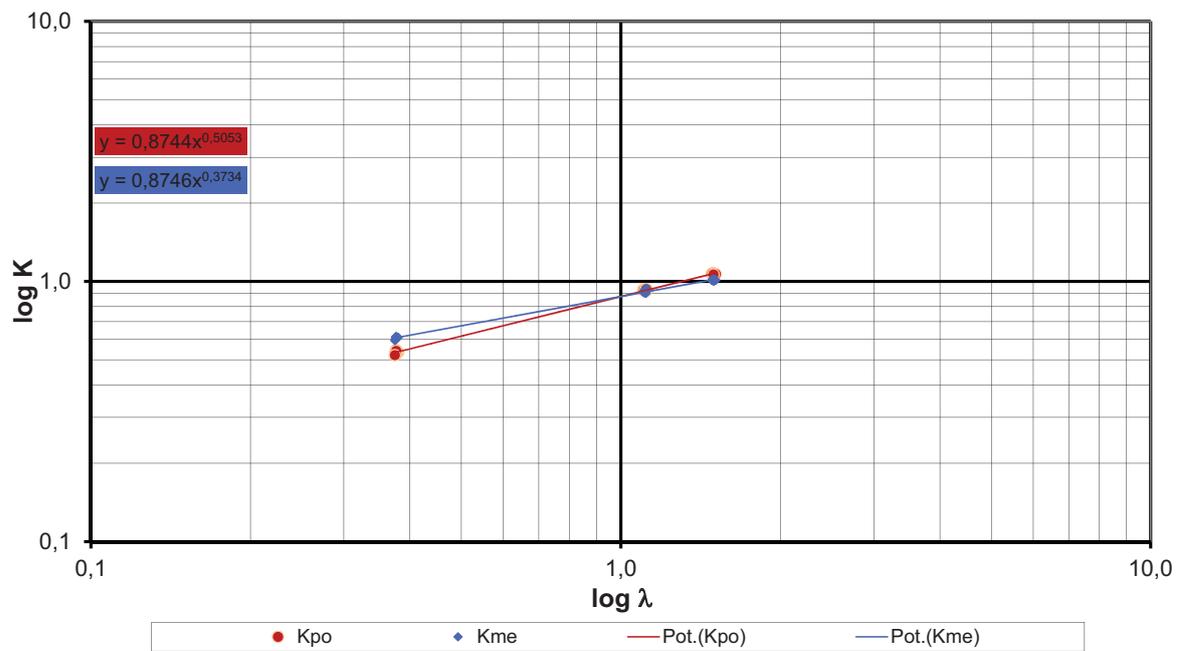


Abbildung 25: Regenraum r12 z10 Diagramm Übertragungszahlen, Messung B

E.4 Regenraum r12 z15

| Read Measurement Data | | | | | | | | | | Filter | | | | Sort | | | | Clear | | | | Boundary Conditions | | | | Evaluation of Merkel | | Evaluation of Zeta | | No. Shown in graph |
|---|--------------|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------|---|-----------------------|-------------------------|---|---|-------------------|--|-------|--|-----------------------|--|--|---|--|--|--|----------------------|--|--------------------|--|--------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> without TXT-Files <input type="checkbox"/> Show error messages max. 1000 measurement points | | | | | | | | | | Pressure: x/1000 <input type="checkbox"/> irrelevant for evaluat | | | | Delete Modules <input type="checkbox"/> incl. Reg. | | | | Type of fill: Regenraum <input checked="" type="checkbox"/> Merkel <input type="checkbox"/> Zeta | | | | Fill height: Nozzles Water distribution: Nozzles Spray height: h _z Editor: Isch | | | | | | | | |
| No. | Date | Frequency | Temperatures water | | Temperatures air | | Cooling range | | Air Pressure | | Pressure loss orifice | | Pressure loss fills | | Volume flow water | | Error | | Comments | | | | | | | | | | | |
| Unit | [dd.mm.jjjj] | [Hz] | t _w ⁱⁿ [°C] | t _w ^{out} [°C] | t _f ⁱⁿ [°C] | t _f ^{out} [°C] | t _z ⁱⁿ [°C] | t _z ^{out} [°C] | z [K] | p _u [bar] | Δp _{or} [Pa] | ΔP _{Fill} [Pa] | V _{akt,W} ⁱⁿ [m³/h] | Out [m³/h] | count | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 25.06.2014 | 9 | 58,7 | 43,1 | 12,8 | 16,4 | 48,6 | 15,7 | 0,993 | 77,8 | 2,5 | 12,0 | | | 0 | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 2 | 25.06.2014 | 10 | 58,7 | 43,2 | 13,1 | 16,9 | 48,7 | 15,5 | 0,993 | 76,2 | 2,6 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 3 | 25.06.2014 | 11 | 58,7 | 43,2 | 13,1 | 16,8 | 48,7 | 15,5 | 0,993 | 77,1 | 2,7 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 4 | 25.06.2014 | 12 | 54,7 | 39,9 | 12,4 | 13,2 | 44,0 | 14,7 | 0,994 | 126,2 | 4,7 | 12,2 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 5 | 25.06.2014 | 13 | 54,6 | 39,8 | 12,2 | 13,0 | 43,7 | 14,9 | 0,994 | 127,2 | 4,6 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 6 | 25.06.2014 | 15 | 53,7 | 38,5 | 13,4 | 16,9 | 42,1 | 15,2 | 0,993 | 182,5 | 6,1 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 7 | 25.06.2014 | 16 | 53,9 | 38,5 | 12,7 | 16,1 | 42,0 | 15,4 | 0,993 | 182,9 | 6,3 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 8 | 25.06.2014 | 17 | 52,6 | 37,2 | 13,1 | 16,5 | 39,6 | 15,5 | 0,999 | 257,5 | 9,0 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 9 | 25.06.2014 | 18 | 52,7 | 37,2 | 12,8 | 16,3 | 39,7 | 15,5 | 0,999 | 256,9 | 9,0 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 10 | 25.06.2014 | 20 | 49,5 | 34,8 | 12,8 | 15,1 | 36,3 | 14,8 | 0,994 | 342,6 | 9,4 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 11 | 25.06.2014 | 21 | 49,8 | 34,9 | 12,8 | 15,1 | 36,5 | 14,9 | 0,994 | 343,9 | 9,4 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 12 | 25.06.2014 | 22 | 49,3 | 34,2 | 13,4 | 17,9 | 35,3 | 15,1 | 0,999 | 441,5 | 13,2 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 13 | 25.06.2014 | 23 | 49,6 | 34,3 | 13,6 | 18,0 | 35,6 | 15,3 | 0,999 | 439,6 | 13,1 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 14 | 25.06.2014 | 25 | 48,5 | 33,0 | 12,7 | 14,3 | 33,7 | 15,5 | 0,994 | 551,6 | 12,6 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 15 | 25.06.2014 | 26 | 48,5 | 32,9 | 12,3 | 14,1 | 33,7 | 15,6 | 0,994 | 553,0 | 12,7 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 16 | 25.06.2014 | 27 | 48,3 | 32,9 | 14,5 | 21,5 | 33,9 | 15,4 | 0,998 | 659,9 | 15,0 | 12,2 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 17 | 25.06.2014 | 28 | 48,3 | 32,8 | 13,7 | 20,5 | 33,7 | 15,6 | 0,998 | 663,4 | 15,0 | 12,2 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 18 | 24.06.2014 | 30 | 47,5 | 32,0 | 14,6 | 21,3 | 32,6 | 15,5 | 0,997 | 795,0 | 17,3 | 11,9 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 19 | 24.06.2014 | 31 | 47,6 | 32,0 | 14,5 | 21,2 | 32,5 | 15,6 | 0,997 | 792,5 | 17,4 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 20 | 25.06.2014 | 32 | 46,9 | 31,3 | 13,9 | 21,9 | 31,8 | 15,6 | 0,998 | 932,8 | 18,7 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 21 | 25.06.2014 | 33 | 46,8 | 31,5 | 15,0 | 23,1 | 32,3 | 15,3 | 0,998 | 929,9 | 18,6 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 22 | 24.06.2014 | 35 | 45,2 | 30,3 | 14,8 | 23,8 | 31,1 | 14,8 | 0,997 | 1078,9 | 21,4 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 23 | 24.06.2014 | 36 | 45,2 | 30,3 | 14,5 | 23,4 | 31,0 | 14,9 | 0,997 | 1079,7 | 21,5 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 24 | 27.06.2014 | 37 | 46,2 | 30,3 | 14,7 | 23,2 | 30,9 | 15,9 | 0,999 | 1242,8 | 23,5 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 25 | 27.06.2014 | 38 | 46,4 | 30,5 | 15,3 | 23,5 | 31,1 | 15,9 | 0,998 | 1244,9 | 23,5 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 26 | 24.06.2014 | 40 | 43,7 | 28,9 | 14,6 | 23,7 | 30,0 | 14,8 | 0,997 | 1415,5 | 25,9 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 27 | 24.06.2014 | 41 | 43,6 | 28,9 | 14,5 | 23,3 | 29,8 | 14,8 | 0,997 | 1410,4 | 25,9 | 11,9 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 28 | 27.06.2014 | 42 | 43,7 | 28,9 | 15,6 | 24,9 | 30,1 | 14,8 | 0,998 | 1586,7 | 28,7 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 29 | 27.06.2014 | 43 | 43,5 | 28,8 | 15,5 | 25,1 | 30,2 | 14,6 | 0,998 | 1591,0 | 28,4 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 30 | 24.06.2014 | 45 | 42,3 | 27,8 | 14,8 | 23,6 | 28,7 | 14,6 | 0,998 | 1789,4 | 31,3 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 31 | 24.06.2014 | 46 | 42,3 | 27,7 | 14,8 | 23,5 | 28,8 | 14,5 | 0,998 | 1790,0 | 31,5 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 32 | 27.06.2014 | 47 | 42,5 | 27,7 | 15,3 | 23,8 | 28,8 | 14,8 | 0,998 | 1985,8 | 35,4 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 33 | 27.06.2014 | 48 | 42,6 | 27,8 | 15,5 | 24,3 | 29,1 | 14,8 | 0,998 | 1982,4 | 35,4 | 12,1 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 34 | 24.06.2014 | 50 | 40,8 | 26,4 | 14,2 | 22,0 | 27,2 | 14,5 | 0,998 | 2211,2 | 38,9 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |
| 35 | 24.06.2014 | 51 | 40,5 | 26,2 | 14,2 | 22,4 | 27,3 | 14,3 | 0,998 | 2208,1 | 39,4 | 12,0 | | | | | | | Alt. fct. used for tF | | | | | | | | | | | |

Abbildung 26: Regenraum r12 z15 Messdaten

| No. | Frequency [Hz] | Density water w [kg/m ³] | Heat capacity water $C_{p,w}$ [kJ/(kg K)] | Mass flow water $m_{PK,W}$ [kg/s] | Mass flow wet air $m_{PK,A}$ [kg/s] | Mass flow dry air $m_{PK,LA}$ [kg/s] | water content x [kg/kg] | Air ratio [-] | Density air A [kg/m ³] | Kinematic viscosity air ν [m ² /s] | Heat capacity air $C_{p,A}$ [kJ/(kg K)] | Pressure loss coefficient [-] | Velocity Air w [m/s] |
|-----|----------------|--|---|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------|--------------------------------------|---|---|-------------------------------|------------------------|
| 1 | 9 | 987,6 | 4,1798 | 3,2963 | 0,9433 | 0,9360 | 0,00781609 | 0,2840 | 1,1802 | 0,00001528 | 1,0118 | 6,0760 | 0,799 |
| 2 | 10 | 987,6 | 4,1798 | 3,3310 | 0,9330 | 0,9256 | 0,00796844 | 0,2779 | 1,1779 | 0,00001533 | 1,0119 | 6,2530 | 0,792 |
| 3 | 11 | 987,6 | 4,1798 | 3,3317 | 0,9385 | 0,9310 | 0,00803757 | 0,2794 | 1,1782 | 0,00001532 | 1,0120 | 6,4414 | 0,797 |
| 4 | 12 | 989,2 | 4,1791 | 3,3602 | 1,2067 | 1,1962 | 0,00879361 | 0,3560 | 1,1927 | 0,00001498 | 1,0126 | 7,0443 | 1,012 |
| 5 | 13 | 989,3 | 4,1790 | 3,3096 | 1,2116 | 1,2012 | 0,00869405 | 0,3629 | 1,1935 | 0,00001497 | 1,0125 | 6,8688 | 1,015 |
| 6 | 15 | 989,7 | 4,1789 | 3,3259 | 1,4402 | 1,4284 | 0,00826537 | 0,4295 | 1,1775 | 0,00001533 | 1,0122 | 6,4516 | 1,223 |
| 7 | 16 | 989,7 | 4,1789 | 3,3330 | 1,4444 | 1,4331 | 0,00794553 | 0,4300 | 1,1814 | 0,00001525 | 1,0119 | 6,5731 | 1,223 |
| 8 | 17 | 990,3 | 4,1788 | 3,3167 | 1,7157 | 1,7019 | 0,00809749 | 0,5131 | 1,1864 | 0,00001520 | 1,0120 | 6,7602 | 1,446 |
| 9 | 18 | 990,2 | 4,1788 | 3,3272 | 1,7146 | 1,7012 | 0,00789135 | 0,5113 | 1,1875 | 0,00001518 | 1,0119 | 6,8058 | 1,444 |
| 10 | 20 | 991,4 | 4,1786 | 3,3072 | 1,9765 | 1,9599 | 0,00846810 | 0,5926 | 1,1850 | 0,00001516 | 1,0123 | 5,3967 | 1,668 |
| 11 | 21 | 991,3 | 4,1786 | 3,3052 | 1,9802 | 1,9638 | 0,00836978 | 0,5942 | 1,1850 | 0,00001516 | 1,0123 | 5,3737 | 1,671 |
| 12 | 22 | 991,6 | 4,1786 | 3,3160 | 2,2384 | 2,2209 | 0,00784916 | 0,6698 | 1,1811 | 0,00001533 | 1,0119 | 5,9085 | 1,895 |
| 13 | 23 | 991,5 | 4,1786 | 3,3235 | 2,2328 | 2,2151 | 0,00795283 | 0,6665 | 1,1802 | 0,00001534 | 1,0120 | 5,9071 | 1,892 |
| 14 | 25 | 991,9 | 4,1786 | 3,3121 | 2,5077 | 2,4863 | 0,00862118 | 0,7507 | 1,1884 | 0,00001508 | 1,0125 | 4,5325 | 2,110 |
| 15 | 26 | 992,0 | 4,1786 | 3,3080 | 2,5123 | 2,4915 | 0,00835963 | 0,7532 | 1,1897 | 0,00001506 | 1,0122 | 4,5508 | 2,112 |
| 16 | 27 | 992,0 | 4,1786 | 3,3480 | 2,7160 | 2,6958 | 0,00750782 | 0,8052 | 1,1666 | 0,00001567 | 1,0117 | 4,5439 | 2,328 |
| 17 | 28 | 992,0 | 4,1786 | 3,3512 | 2,7287 | 2,7096 | 0,00706580 | 0,8085 | 1,1713 | 0,00001556 | 1,0113 | 4,5274 | 2,330 |
| 18 | 30 | 992,3 | 4,1786 | 3,2934 | 2,9781 | 2,9552 | 0,00774830 | 0,8973 | 1,1659 | 0,00001567 | 1,0119 | 4,3796 | 2,554 |
| 19 | 31 | 992,3 | 4,1786 | 3,2956 | 2,9739 | 2,9512 | 0,00766685 | 0,8955 | 1,1662 | 0,00001566 | 1,0118 | 4,4144 | 2,550 |
| 20 | 32 | 992,6 | 4,1786 | 3,3390 | 3,2242 | 3,2028 | 0,00666023 | 0,9592 | 1,1662 | 0,00001569 | 1,0110 | 4,0617 | 2,765 |
| 21 | 33 | 992,6 | 4,1786 | 3,3343 | 3,2102 | 3,1868 | 0,00735100 | 0,9557 | 1,1597 | 0,00001583 | 1,0116 | 4,0580 | 2,768 |
| 22 | 35 | 993,1 | 4,1787 | 3,3245 | 3,4515 | 3,4281 | 0,00682769 | 1,0312 | 1,1572 | 0,00001589 | 1,0112 | 4,0370 | 2,983 |
| 23 | 36 | 993,1 | 4,1787 | 3,3193 | 3,4555 | 3,4323 | 0,00675928 | 1,0341 | 1,1590 | 0,00001585 | 1,0111 | 4,0508 | 2,982 |
| 24 | 37 | 992,9 | 4,1786 | 3,3394 | 3,7076 | 3,6820 | 0,00695150 | 1,1026 | 1,1609 | 0,00001582 | 1,0113 | 3,8532 | 3,194 |
| 25 | 38 | 992,8 | 4,1786 | 3,3168 | 3,7070 | 3,6793 | 0,00754171 | 1,1093 | 1,1585 | 0,00001586 | 1,0118 | 3,8530 | 3,200 |
| 26 | 40 | 993,6 | 4,1788 | 3,3040 | 3,9493 | 3,9229 | 0,00672096 | 1,1873 | 1,1583 | 0,00001587 | 1,0111 | 3,7515 | 3,410 |
| 27 | 41 | 993,6 | 4,1788 | 3,2966 | 3,9444 | 3,9179 | 0,00676655 | 1,1885 | 1,1596 | 0,00001584 | 1,0111 | 3,7597 | 3,402 |
| 28 | 42 | 993,6 | 4,1788 | 3,3172 | 4,1695 | 4,1395 | 0,00724780 | 1,2479 | 1,1535 | 0,00001599 | 1,0116 | 3,7227 | 3,615 |
| 29 | 43 | 993,6 | 4,1788 | 3,3332 | 4,1746 | 4,1453 | 0,00708160 | 1,2436 | 1,1532 | 0,00001600 | 1,0115 | 3,6726 | 3,620 |
| 30 | 45 | 994,0 | 4,1789 | 3,3223 | 4,4332 | 4,4025 | 0,00696740 | 1,3251 | 1,1583 | 0,00001587 | 1,0113 | 3,6036 | 3,827 |
| 31 | 46 | 994,0 | 4,1790 | 3,3248 | 4,4346 | 4,4038 | 0,00698650 | 1,3245 | 1,1587 | 0,00001586 | 1,0113 | 3,6225 | 3,827 |
| 32 | 47 | 994,0 | 4,1789 | 3,3428 | 4,6641 | 4,6296 | 0,00745903 | 1,3849 | 1,1573 | 0,00001589 | 1,0117 | 3,6859 | 4,030 |
| 33 | 48 | 994,0 | 4,1789 | 3,3436 | 4,6561 | 4,6215 | 0,00747813 | 1,3822 | 1,1553 | 0,00001594 | 1,0118 | 3,6893 | 4,030 |
| 34 | 50 | 994,5 | 4,1792 | 3,3275 | 4,9336 | 4,8995 | 0,00694848 | 1,4725 | 1,1651 | 0,00001571 | 1,0112 | 3,6438 | 4,234 |
| 35 | 51 | 994,6 | 4,1792 | 3,3233 | 4,9277 | 4,8944 | 0,00679553 | 1,4728 | 1,1640 | 0,00001574 | 1,0111 | 3,6961 | 4,234 |

Abbildung 27: Regenraum r12 z15 Auswertung Zustandsgrößen

Calculation of transfer numbers

| Tab. Int. Merkel | | MEHLIG | | | | | | | | | | POPPE | | | | | | | | | | KINKELDEI | |
|------------------|----|-----------|---------|-----------|-------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------------|--|--|--|--|--|--|-----------|--|
| TestNo. | Hz | λ | Simpson | 3/8 Regel | $t_{i,out}$ | Saturated? | K_V | K_W | K_W | $t_{i,out}$ | $x_{i,out}$ | m_b | NTU | Kpo | $t_{i,out}$ | | | | | | | | |
| 1 | 9 | 0,2840 | 0,437 | 0,437 | 49,12 | YES | 0,436 | 0,578 | 0,578 | 47,00 | 0,0916 | 0,276 | 1,777 | 0,504 | -1,00 | | | | | | | | |
| 2 | 10 | 0,2779 | 0,439 | 0,439 | 49,38 | YES | 0,438 | 0,574 | 0,574 | 47,51 | 0,0931 | 0,284 | 1,830 | 0,509 | -1,00 | | | | | | | | |
| 3 | 11 | 0,2794 | 0,438 | 0,438 | 49,30 | YES | 0,436 | 0,574 | 0,574 | 47,35 | 0,0926 | 0,282 | 1,812 | 0,506 | -1,00 | | | | | | | | |
| 4 | 12 | 0,3560 | 0,483 | 0,483 | 44,18 | YES | 0,482 | 0,646 | 0,646 | 41,55 | 0,0698 | 0,205 | 1,556 | 0,554 | 44,15 | | | | | | | | |
| 5 | 13 | 0,3629 | 0,485 | 0,485 | 43,97 | YES | 0,484 | 0,653 | 0,653 | 41,23 | 0,0689 | 0,199 | 1,532 | 0,556 | 43,92 | | | | | | | | |
| 6 | 15 | 0,4295 | 0,515 | 0,515 | 41,94 | YES | 0,514 | 0,698 | 0,698 | 39,64 | 0,0608 | 0,175 | 1,347 | 0,578 | 41,87 | | | | | | | | |
| 7 | 16 | 0,4300 | 0,517 | 0,517 | 41,97 | YES | 0,516 | 0,702 | 0,702 | 39,52 | 0,0611 | 0,177 | 1,351 | 0,581 | 41,93 | | | | | | | | |
| 8 | 17 | 0,5131 | 0,540 | 0,540 | 39,38 | YES | 0,539 | 0,747 | 0,747 | 36,85 | 0,0522 | 0,146 | 1,172 | 0,601 | 39,31 | | | | | | | | |
| 9 | 18 | 0,5113 | 0,540 | 0,540 | 39,46 | YES | 0,539 | 0,750 | 0,750 | 36,86 | 0,0524 | 0,148 | 1,174 | 0,600 | 39,36 | | | | | | | | |
| 10 | 20 | 0,5926 | 0,598 | 0,598 | 36,42 | YES | 0,597 | 0,818 | 0,818 | 34,00 | 0,0442 | 0,118 | 1,122 | 0,665 | 36,32 | | | | | | | | |
| 11 | 21 | 0,5942 | 0,593 | 0,593 | 36,43 | YES | 0,592 | 0,811 | 0,811 | 34,01 | 0,0444 | 0,119 | 1,108 | 0,658 | 36,39 | | | | | | | | |
| 12 | 22 | 0,6698 | 0,622 | 0,622 | 35,21 | YES | 0,621 | 0,850 | 0,850 | 33,55 | 0,0405 | 0,108 | 1,016 | 0,681 | 35,16 | | | | | | | | |
| 13 | 23 | 0,6665 | 0,623 | 0,623 | 35,55 | YES | 0,623 | 0,855 | 0,855 | 33,82 | 0,0412 | 0,110 | 1,024 | 0,683 | 35,44 | | | | | | | | |
| 14 | 25 | 0,7507 | 0,662 | 0,662 | 33,79 | YES | 0,661 | 0,915 | 0,915 | 31,13 | 0,0379 | 0,097 | 0,974 | 0,731 | 33,66 | | | | | | | | |
| 15 | 26 | 0,7532 | 0,661 | 0,661 | 33,63 | YES | 0,660 | 0,916 | 0,916 | 30,96 | 0,0377 | 0,097 | 0,969 | 0,729 | 33,52 | | | | | | | | |
| 16 | 27 | 0,8052 | 0,678 | 0,678 | 33,43 | YES | 0,678 | 0,920 | 0,920 | 33,12 | 0,0356 | 0,094 | 0,908 | 0,732 | 33,38 | | | | | | | | |
| 17 | 28 | 0,8085 | 0,676 | 0,676 | 33,23 | YES | 0,676 | 0,929 | 0,929 | 32,63 | 0,0352 | 0,094 | 0,902 | 0,729 | 33,13 | | | | | | | | |
| 18 | 30 | 0,8973 | 0,714 | 0,714 | 32,21 | YES | 0,714 | 0,967 | 0,967 | 32,00 | 0,0330 | 0,083 | 0,856 | 0,768 | 32,14 | | | | | | | | |
| 19 | 31 | 0,8955 | 0,718 | 0,718 | 32,32 | YES | 0,718 | 0,974 | 0,974 | 32,06 | 0,0332 | 0,084 | 0,862 | 0,772 | 32,22 | | | | | | | | |
| 20 | 32 | 0,9592 | 0,736 | 0,736 | 31,27 | YES | 0,744 | 1,013 | 1,013 | 31,56 | 0,0306 | 0,080 | 0,821 | 0,787 | 31,48 | | | | | | | | |
| 21 | 33 | 0,9557 | 0,733 | 0,733 | 31,41 | YES | 0,734 | 0,986 | 0,986 | 32,17 | 0,0309 | 0,079 | 0,822 | 0,785 | 32,06 | | | | | | | | |
| 22 | 35 | 1,0312 | 0,777 | 0,777 | 30,80 | NO | 0,777 | 0,000 | 0,000 | 31,55 | 0,0282 | 0,071 | 0,805 | 0,830 | 31,46 | | | | | | | | |
| 23 | 36 | 1,0341 | 0,777 | 0,777 | 30,58 | NO | 0,777 | 0,000 | 0,000 | 31,34 | 0,0282 | 0,071 | 0,803 | 0,830 | 31,26 | | | | | | | | |
| 24 | 37 | 1,1026 | 0,800 | 0,800 | 30,52 | NO | 0,800 | 0,000 | 0,000 | 31,28 | 0,0283 | 0,071 | 0,774 | 0,853 | 31,19 | | | | | | | | |
| 25 | 38 | 1,1093 | 0,799 | 0,799 | 30,71 | NO | 0,800 | 0,000 | 0,000 | 31,47 | 0,0288 | 0,070 | 0,769 | 0,853 | 31,36 | | | | | | | | |
| 26 | 40 | 1,1873 | 0,844 | 0,844 | 29,71 | NO | 0,845 | 0,000 | 0,000 | 30,32 | 0,0252 | 0,061 | 0,757 | 0,899 | 30,24 | | | | | | | | |
| 27 | 41 | 1,1885 | 0,847 | 0,847 | 29,52 | NO | 0,847 | 0,000 | 0,000 | 30,14 | 0,0252 | 0,061 | 0,759 | 0,902 | 30,07 | | | | | | | | |
| 28 | 42 | 1,2479 | 0,869 | 0,869 | 30,26 | NO | 0,870 | 0,000 | 0,000 | 30,79 | 0,0251 | 0,059 | 0,742 | 0,926 | 30,69 | | | | | | | | |
| 29 | 43 | 1,2436 | 0,866 | 0,866 | 30,26 | NO | 0,868 | 0,000 | 0,000 | 30,78 | 0,0248 | 0,059 | 0,742 | 0,923 | 30,69 | | | | | | | | |
| 30 | 45 | 1,3251 | 0,918 | 0,918 | 28,97 | NO | 0,920 | 0,000 | 0,000 | 29,47 | 0,0233 | 0,054 | 0,737 | 0,977 | 29,39 | | | | | | | | |
| 31 | 46 | 1,3245 | 0,918 | 0,918 | 28,94 | NO | 0,929 | 0,000 | 0,000 | 29,39 | 0,0233 | 0,054 | 0,737 | 0,976 | 29,32 | | | | | | | | |
| 32 | 47 | 1,3849 | 0,946 | 0,946 | 29,05 | NO | 0,958 | 0,000 | 0,000 | 29,48 | 0,0234 | 0,053 | 0,726 | 1,006 | 29,39 | | | | | | | | |
| 33 | 48 | 1,3822 | 0,945 | 0,945 | 29,31 | NO | 0,947 | 0,000 | 0,000 | 29,77 | 0,0235 | 0,054 | 0,727 | 1,005 | 29,67 | | | | | | | | |
| 34 | 50 | 1,4725 | 0,994 | 0,994 | 27,31 | NO | 0,996 | 0,000 | 0,000 | 27,77 | 0,0213 | 0,048 | 0,717 | 1,055 | 27,72 | | | | | | | | |
| 35 | 51 | 1,4728 | 0,997 | 0,997 | 27,41 | NO | 0,999 | 0,000 | 0,000 | 27,84 | 0,0210 | 0,047 | 0,719 | 1,058 | 27,79 | | | | | | | | |

Abbildung 28: Regenraum r12 z15 Auswertung Übertragungszahlen

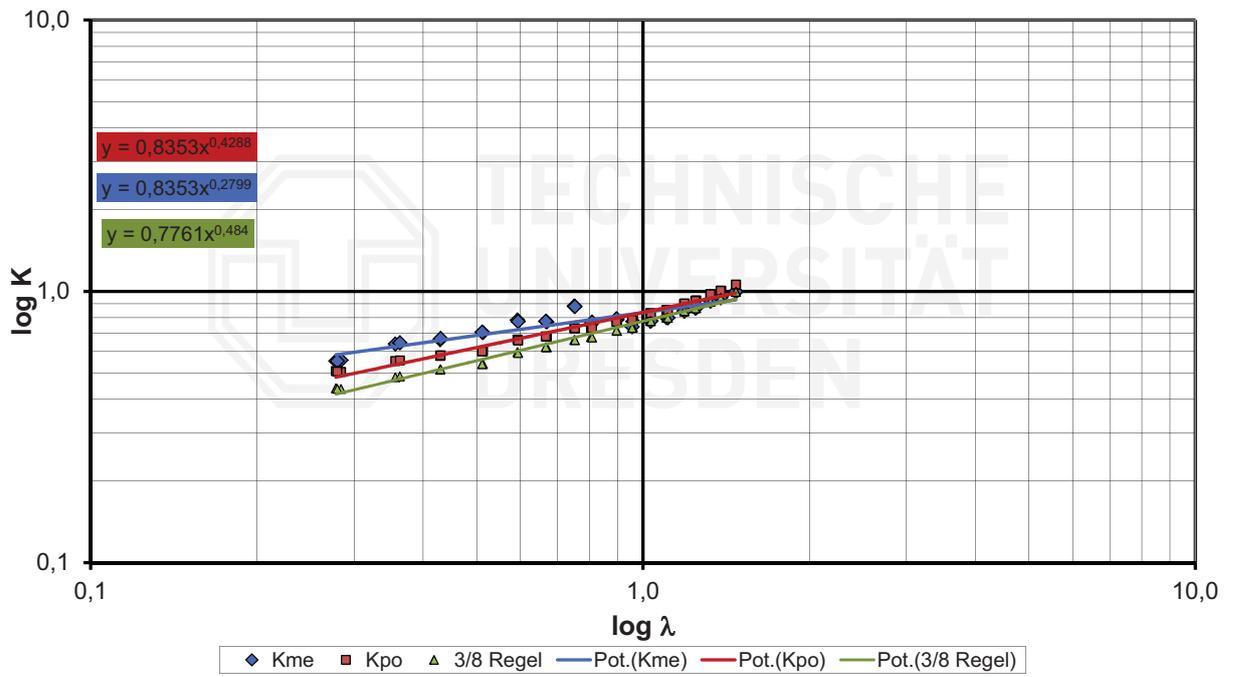


Abbildung 29: Regenraum r12 z15 Diagramm Übertragungszahlen

E.5 Referenzeinbau r12 z10, Messung C

| Read Measurement Data | | Filter | | Sort | | Clear | | Boundary Conditions | | | | Evaluation of Merkel | | |
|---|--------------|---------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------|--|--|--------------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> without TXT-Files <input type="checkbox"/> Show error messages max. 1000 measurement points | | Pressure: x/1000 | | Pressure: x*1000 | | Delete Modules | | Type of fill: | Referenz | Fill height: | 1200 mm | Evaluation of Zeta | | |
| | | | | | | | | Measurement: | <input checked="" type="checkbox"/> Merkel | Water distribution: | Nozzles | | | |
| | | | | | | | | | <input type="checkbox"/> Zeta | Spray height hv _z : | 400 mm | | | |
| | | | | | | | | | | Editor: | Sch | | | |
| | | | | | | | | <input type="checkbox"/> irrelevant for evaluation | | | | | | |
| No. | Date | Frequency ω [Hz] | Temperatures water | | Temperatures air | | Cooling range | Air Pressure | Pressure loss orifice | Pressure loss fills | Volume flow water | Error | Comments | No. Shown in graph |
| Unit | [dd.mm.jjjj] | [Hz] | t _w ⁱⁿ [°C] | t _w ^{out} [°C] | t _e ⁱⁿ [°C] | t _e ^{out} [°C] | Z [K] | P _u [bar] | ΔP _{or} [Pa] | ΔP _{Fill} [Pa] | V _{akt,W} [m³/h] | count | | |
| 1 | 25.04.2014 | 10 | 45,6 | 35,3 | 13,9 | 19,1 | 42,9 | 10,3 | 0,995 | 79,5 | 6,1 | 12,0 | Alt. fct. used for tF | |
| 2 | 25.04.2014 | 11 | 45,7 | 35,4 | 14,1 | 19,2 | 43,0 | 10,3 | 0,995 | 79,1 | 6,0 | 12,0 | Alt. fct. used for tF | |
| 3 | 25.04.2014 | 15 | 40,2 | 30,5 | 16,1 | 22,8 | 37,1 | 9,7 | 0,995 | 175,6 | 13,1 | 12,0 | Alt. fct. used for tF | |
| 4 | 25.04.2014 | 20 | 35,6 | 26,3 | 14,9 | 20,7 | 31,9 | 9,3 | 0,995 | 323,5 | 22,9 | 11,9 | Alt. fct. used for tF | |
| 5 | 25.04.2014 | 21 | 35,3 | 26,2 | 14,8 | 20,6 | 31,7 | 9,2 | 0,995 | 324,8 | 22,9 | 12,0 | Alt. fct. used for tF | |
| 6 | 25.04.2014 | 23 | 35,4 | 24,9 | 15,0 | 19,7 | 30,8 | 10,6 | 0,995 | 517,7 | 34,5 | 12,1 | Alt. fct. used for tF | |
| 7 | 25.04.2014 | 24 | 35,4 | 24,9 | 15,1 | 19,7 | 30,8 | 10,5 | 0,995 | 518,4 | 34,4 | 12,1 | Alt. fct. used for tF | |
| 8 | 24.04.2014 | 25 | 31,7 | 22,4 | 12,5 | 16,1 | 27,7 | 9,4 | 1,003 | 530,8 | 33,1 | 11,8 | Alt. fct. used for tF | |
| 9 | 24.04.2014 | 26 | 32,0 | 22,3 | 12,2 | 15,3 | 27,8 | 9,7 | 1,003 | 535,7 | 33,5 | 11,8 | Alt. fct. used for tF | |
| 10 | 28.04.2014 | 28 | 32,8 | 22,8 | 15,0 | 20,0 | 28,4 | 10,0 | 0,991 | 747,6 | 46,6 | 12,1 | Alt. fct. used for tF | |
| 11 | 28.04.2014 | 29 | 32,9 | 22,9 | 15,1 | 20,4 | 28,5 | 10,0 | 0,991 | 753,3 | 46,1 | 12,1 | Alt. fct. used for tF | |
| 12 | 24.04.2014 | 30 | 31,7 | 21,7 | 13,2 | 17,2 | 27,1 | 10,1 | 1,003 | 768,5 | 47,8 | 12,1 | Alt. fct. used for tF | |
| 13 | 24.04.2014 | 31 | 31,6 | 21,7 | 13,3 | 17,0 | 27,0 | 10,1 | 1,003 | 771,0 | 48,0 | 12,1 | Alt. fct. used for tF | |
| 14 | 28.04.2014 | 33 | 32,5 | 21,9 | 15,3 | 20,8 | 27,6 | 10,6 | 0,991 | 1023,0 | 63,2 | 11,9 | Alt. fct. used for tF | |
| 15 | 28.04.2014 | 34 | 32,5 | 21,9 | 15,1 | 20,4 | 27,6 | 10,7 | 0,991 | 1027,8 | 63,3 | 11,9 | Alt. fct. used for tF | |
| 16 | 24.04.2014 | 35 | 30,1 | 20,8 | 14,4 | 18,4 | 25,5 | 9,4 | 1,003 | 1053,9 | 65,1 | 12,0 | Alt. fct. used for tF | |
| 17 | 24.04.2014 | 36 | 29,9 | 20,7 | 14,4 | 18,2 | 25,4 | 9,3 | 1,002 | 1050,9 | 64,3 | 12,0 | Alt. fct. used for tF | |
| 18 | 28.04.2014 | 38 | 29,8 | 20,3 | 14,7 | 19,4 | 25,1 | 9,5 | 0,991 | 1356,0 | 83,7 | 11,8 | Alt. fct. used for tF | |
| 19 | 28.04.2014 | 39 | 29,8 | 20,5 | 15,1 | 20,0 | 25,4 | 9,3 | 0,991 | 1345,2 | 81,8 | 11,8 | Alt. fct. used for tF | |
| 20 | 24.04.2014 | 40 | 31,8 | 21,3 | 15,8 | 19,7 | 26,5 | 10,5 | 1,001 | 1357,6 | 83,6 | 12,0 | Alt. fct. used for tF | |
| 21 | 24.04.2014 | 41 | 31,8 | 21,5 | 16,0 | 20,7 | 26,8 | 10,4 | 1,001 | 1353,4 | 83,8 | 12,0 | Alt. fct. used for tF | |
| 22 | 28.04.2014 | 43 | 28,9 | 18,9 | 14,0 | 17,1 | 23,7 | 10,0 | 0,992 | 1697,5 | 102,8 | 11,6 | Alt. fct. used for tF | |
| 23 | 28.04.2014 | 44 | 29,0 | 19,0 | 14,1 | 17,3 | 23,8 | 10,0 | 0,992 | 1677,1 | 103,0 | 11,6 | Alt. fct. used for tF | |
| 24 | 24.04.2014 | 45 | 30,8 | 20,4 | 15,5 | 21,9 | 25,3 | 10,4 | 1,000 | 1699,8 | 107,0 | 12,1 | Alt. fct. used for tF | |
| 25 | 24.04.2014 | 46 | 30,8 | 20,4 | 15,4 | 21,4 | 25,3 | 10,5 | 1,000 | 1717,2 | 107,9 | 12,1 | Alt. fct. used for tF | |
| 26 | 24.04.2014 | 50 | 29,8 | 19,7 | 15,5 | 20,6 | 24,4 | 10,1 | 1,000 | 2116,3 | 138,5 | 12,1 | Alt. fct. used for tF | |
| 27 | 24.04.2014 | 51 | 29,5 | 19,5 | 15,3 | 20,8 | 24,2 | 10,0 | 1,000 | 2108,7 | 138,2 | 12,1 | Alt. fct. used for tF | |
| 28 | 28.04.2014 | 52 | 28,1 | 18,3 | 14,1 | 16,9 | 22,9 | 9,8 | 0,992 | 1987,0 | 133,8 | 11,7 | Alt. fct. used for tF | |
| 29 | 28.04.2014 | 53 | 28,1 | 18,3 | 14,1 | 16,9 | 22,9 | 9,8 | 0,992 | 2010,7 | 132,3 | 11,7 | Alt. fct. used for tF | |

Abbildung 30: Referenzeinbau r12 z10 Messdaten, Messung C

| No. | Frequency [Hz] | Density water ρ_w [kg/m ³] | Heat capacity water $C_{p,w}$ [kJ/(kg K)] | Mass flow water $\dot{m}_{PKI,W}$ [kg/s] | Mass flow wet air $\dot{m}_{PKI,A}$ [kg/s] | Mass flow dry air $\dot{m}_{PKI,TA}$ [kg/s] | water content x [kg/kg] | Air ratio λ [-] | Density air ρ_A [kg/m ³] | Kinematic viscosity air ν_A [m ² /s] | Heat capacity air $C_{p,A}$ [kJ/(kg K)] | Pressure loss coefficient ζ [-] | Velocity Air w [m/s] |
|-----|-------------------|--|---|---|---|--|---------------------------------|-------------------------------|--|--|--|---|---------------------------------|
| 1 | 10 | 992,0 | 4,1786 | 3,3151 | 0,9503 | 0,9428 | 0,00792939372 | 0,2844 | 1,1715 | 0,00001550 | 1,0120 | 14,7752 | 0,811 |
| 2 | 11 | 992,0 | 4,1786 | 3,3113 | 0,9476 | 0,9400 | 0,00809112201 | 0,2839 | 1,1704 | 0,00001552 | 1,0121 | 14,5895 | 0,810 |
| 3 | 15 | 993,9 | 4,1789 | 3,3077 | 1,3997 | 1,3875 | 0,00876824949 | 0,4195 | 1,1550 | 0,00001588 | 1,0128 | 14,7222 | 1,212 |
| 4 | 20 | 995,4 | 4,1798 | 3,3026 | 1,9043 | 1,8886 | 0,00830097750 | 0,5719 | 1,1646 | 0,00001566 | 1,0124 | 14,2209 | 1,635 |
| 5 | 21 | 995,4 | 4,1798 | 3,3062 | 1,9084 | 1,8928 | 0,00829132143 | 0,5725 | 1,1649 | 0,00001565 | 1,0123 | 14,1335 | 1,638 |
| 6 | 23 | 995,6 | 4,1800 | 3,3345 | 2,4080 | 2,3869 | 0,00883041267 | 0,7158 | 1,1668 | 0,00001559 | 1,0128 | 13,4125 | 2,064 |
| 7 | 24 | 995,6 | 4,1800 | 3,3328 | 2,4094 | 2,3880 | 0,00895333979 | 0,7165 | 1,1665 | 0,00001559 | 1,0129 | 13,3740 | 2,065 |
| 8 | 25 | 996,5 | 4,1810 | 3,2708 | 2,4656 | 2,4471 | 0,00759302066 | 0,7482 | 1,1934 | 0,00001510 | 1,0116 | 12,5850 | 2,066 |
| 9 | 26 | 996,5 | 4,1810 | 3,2699 | 2,4802 | 2,4615 | 0,00761372600 | 0,7528 | 1,1967 | 0,00001502 | 1,0116 | 12,6024 | 2,073 |
| 10 | 28 | 996,3 | 4,1807 | 3,3507 | 2,8835 | 2,8585 | 0,00874447539 | 0,8531 | 1,1617 | 0,00001567 | 1,0127 | 12,6845 | 2,482 |
| 11 | 29 | 996,3 | 4,1807 | 3,3488 | 2,8922 | 2,8672 | 0,00872269837 | 0,8562 | 1,1600 | 0,00001571 | 1,0127 | 12,4605 | 2,493 |
| 12 | 30 | 996,6 | 4,1811 | 3,3546 | 2,9563 | 2,9332 | 0,00789717140 | 0,8744 | 1,1883 | 0,00001521 | 1,0119 | 12,6352 | 2,488 |
| 13 | 31 | 996,6 | 4,1812 | 3,3505 | 2,9617 | 2,9381 | 0,00805469367 | 0,8769 | 1,1887 | 0,00001519 | 1,0120 | 12,6392 | 2,492 |
| 14 | 33 | 996,5 | 4,1810 | 3,3057 | 3,3638 | 3,3344 | 0,00882366547 | 1,0087 | 1,1586 | 0,00001575 | 1,0128 | 12,6362 | 2,903 |
| 15 | 34 | 996,5 | 4,1810 | 3,3010 | 3,3736 | 3,3444 | 0,00873096934 | 1,0132 | 1,1600 | 0,00001571 | 1,0127 | 12,6055 | 2,908 |
| 16 | 35 | 996,9 | 4,1817 | 3,3149 | 3,4479 | 3,4183 | 0,00864180675 | 1,0312 | 1,1818 | 0,00001534 | 1,0126 | 12,6662 | 2,918 |
| 17 | 36 | 997,0 | 4,1817 | 3,3174 | 3,4435 | 3,4139 | 0,00868002104 | 1,0291 | 1,1822 | 0,00001533 | 1,0126 | 12,5493 | 2,913 |
| 18 | 38 | 997,0 | 4,1819 | 3,2592 | 3,8763 | 3,8429 | 0,00867279063 | 1,1791 | 1,1643 | 0,00001561 | 1,0126 | 12,7247 | 3,329 |
| 19 | 39 | 997,0 | 4,1818 | 3,2748 | 3,8569 | 3,8231 | 0,00884537299 | 1,1674 | 1,1619 | 0,00001567 | 1,0128 | 12,5460 | 3,320 |
| 20 | 40 | 996,6 | 4,1812 | 3,3306 | 3,8931 | 3,8559 | 0,00964445694 | 1,1577 | 1,1730 | 0,00001551 | 1,0135 | 12,6740 | 3,319 |
| 21 | 41 | 996,6 | 4,1812 | 3,3256 | 3,8810 | 3,8446 | 0,00948760606 | 1,1560 | 1,1693 | 0,00001560 | 1,0134 | 12,7448 | 3,319 |
| 22 | 43 | 997,3 | 4,1824 | 3,2081 | 4,3474 | 4,3093 | 0,00886030536 | 1,3432 | 1,1736 | 0,00001539 | 1,0127 | 12,5247 | 3,704 |
| 23 | 44 | 997,3 | 4,1824 | 3,2085 | 4,3204 | 4,2821 | 0,00895930417 | 1,3346 | 1,1729 | 0,00001541 | 1,0128 | 12,7022 | 3,684 |
| 24 | 45 | 996,9 | 4,1816 | 3,3408 | 4,3357 | 4,2995 | 0,00839892733 | 1,2870 | 1,1654 | 0,00001570 | 1,0125 | 13,0697 | 3,720 |
| 25 | 46 | 996,9 | 4,1816 | 3,3399 | 4,3606 | 4,3240 | 0,00847023153 | 1,2946 | 1,1671 | 0,00001566 | 1,0125 | 13,0389 | 3,736 |
| 26 | 50 | 997,1 | 4,1820 | 3,3434 | 4,8372 | 4,7942 | 0,00896223982 | 1,4339 | 1,1693 | 0,00001559 | 1,0129 | 13,6388 | 4,137 |
| 27 | 51 | 997,2 | 4,1821 | 3,3439 | 4,8283 | 4,7868 | 0,00867544466 | 1,4315 | 1,1692 | 0,00001560 | 1,0127 | 13,6724 | 4,130 |
| 28 | 52 | 997,5 | 4,1828 | 3,2462 | 4,6988 | 4,6568 | 0,00903789771 | 1,4345 | 1,1741 | 0,00001538 | 1,0129 | 13,9857 | 4,002 |
| 29 | 53 | 997,5 | 4,1828 | 3,2355 | 4,7265 | 4,6842 | 0,00903835540 | 1,4478 | 1,1742 | 0,00001538 | 1,0129 | 13,6764 | 4,025 |

Abbildung 31: Referenzeinbau r12 z10 Auswertung Zustandsgrößen, Messung C

Calculation of transfer numbers

| Tab. Int. Merkel | | MEHLIG | | | | | | | | | | POPPE | | | | | | | | | | KINKELDEI | | | | | | | | | |
|------------------|----------------|--------|---------|-----------|--------------------|------------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|--------------------|----------------|-------|-----------------|--------------------|--|--|--|--|--|-----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Test No. | H _z | λ | Simpson | 3/8 Regel | t _L out | Saturated? | K_V | K_W | Kme | Tab. Int. | t _L out | x _L out | m _D | NTU | K _{po} | t _L out | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 10 | 0,2844 | 0,788 | 0,788 | 42,50 | YES | 0,794 | 0,873 | 0,847 | 0,964 | 43,20 | 0,0612 | 0,177 | 3,524 | 1,002 | 42,43 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 11 | 0,2839 | 0,785 | 0,785 | 42,52 | YES | 0,791 | 0,869 | 0,843 | 0,958 | 43,22 | 0,0613 | 0,176 | 3,516 | 0,998 | 42,45 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 15 | 0,4195 | 1,025 | 1,025 | 36,60 | YES | 1,035 | 1,118 | 1,061 | 1,046 | 37,05 | 0,0427 | 0,112 | 2,846 | 1,194 | 36,53 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 20 | 0,5719 | 1,244 | 1,244 | 31,56 | YES | 1,256 | 1,359 | 1,281 | 1,240 | 31,87 | 0,0313 | 0,076 | 2,450 | 1,401 | 31,49 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 21 | 0,5725 | 1,249 | 1,249 | 31,34 | YES | 1,261 | 1,355 | 1,283 | 1,244 | 31,69 | 0,0310 | 0,075 | 2,456 | 1,406 | 31,32 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 23 | 0,7158 | 1,448 | 1,448 | 30,51 | YES | 1,459 | 1,567 | 1,491 | 1,452 | 30,71 | 0,0295 | 0,069 | 2,247 | 1,609 | 30,41 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 24 | 0,7165 | 1,439 | 1,439 | 30,48 | YES | 1,451 | 1,562 | 1,483 | 1,442 | 30,67 | 0,0294 | 0,068 | 2,232 | 1,599 | 30,37 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 25 | 0,7482 | 1,564 | 1,564 | 27,46 | YES | 1,575 | 1,682 | 1,617 | 1,587 | 27,69 | 0,0244 | 0,055 | 2,335 | 1,747 | 27,40 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 26 | 0,7528 | 1,589 | 1,589 | 27,63 | YES | 1,599 | 1,716 | 1,656 | 1,639 | 27,83 | 0,0247 | 0,056 | 2,374 | 1,787 | 27,54 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 28 | 0,8531 | 1,703 | 1,703 | 28,07 | YES | 1,720 | 1,811 | 1,734 | 1,699 | 28,32 | 0,0253 | 0,056 | 2,193 | 1,871 | 28,13 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 29 | 0,8562 | 1,697 | 1,697 | 28,09 | YES | 1,714 | 1,805 | 1,727 | 1,703 | 28,37 | 0,0254 | 0,056 | 2,175 | 1,862 | 28,20 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 30 | 0,8744 | 1,730 | 1,730 | 26,91 | YES | 1,743 | 1,850 | 1,772 | 1,726 | 27,10 | 0,0235 | 0,052 | 2,177 | 1,904 | 26,85 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 31 | 0,8769 | 1,755 | 1,755 | 26,92 | YES | 1,769 | 1,882 | 1,803 | 1,755 | 27,08 | 0,0234 | 0,052 | 2,208 | 1,936 | 26,82 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 33 | 1,0087 | 1,899 | 1,899 | 27,20 | YES | 1,920 | 2,020 | 1,929 | -1,000 | 27,47 | 0,0239 | 0,050 | 2,049 | 2,067 | 27,38 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 34 | 1,0132 | 1,877 | 1,877 | 27,09 | YES | 1,897 | 2,002 | 1,907 | -1,000 | 27,35 | 0,0237 | 0,050 | 2,015 | 2,041 | 27,26 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 35 | 1,0312 | 1,917 | 1,917 | 25,32 | YES | 1,939 | 2,045 | 1,954 | 1,909 | 25,51 | 0,0210 | 0,041 | 2,028 | 2,091 | 25,39 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 36 | 1,0291 | 1,910 | 1,910 | 25,22 | YES | 1,932 | 2,037 | 1,948 | 1,896 | 25,41 | 0,0209 | 0,041 | 2,025 | 2,084 | 25,28 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 38 | 1,1791 | 1,979 | 1,979 | 24,44 | YES | 2,003 | 2,110 | 2,008 | -1,000 | 24,83 | 0,0200 | 0,037 | 1,816 | 2,142 | 24,77 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 39 | 1,1674 | 1,970 | 1,970 | 24,66 | YES | 1,995 | 2,106 | 2,000 | -1,000 | 25,07 | 0,0203 | 0,037 | 1,829 | 2,135 | 25,01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 40 | 1,1577 | 2,022 | 2,022 | 26,18 | YES | 2,048 | 2,155 | 2,061 | -1,000 | 26,37 | 0,0222 | 0,042 | 1,899 | 2,199 | 26,25 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 41 | 1,1560 | 2,005 | 2,005 | 26,20 | YES | 2,032 | 2,129 | 2,038 | -1,000 | 26,51 | 0,0222 | 0,042 | 1,884 | 2,178 | 26,43 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 43 | 1,3432 | 2,275 | 2,275 | 23,40 | YES | 2,302 | 2,414 | 2,319 | -1,000 | 23,53 | 0,0189 | 0,032 | 1,832 | 2,461 | 23,43 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 44 | 1,3346 | 2,285 | 2,285 | 23,53 | YES | 2,313 | 2,417 | 2,328 | -1,000 | 23,68 | 0,0190 | 0,032 | 1,853 | 2,474 | 23,57 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 45 | 1,2870 | 2,156 | 2,156 | 25,04 | NO | 2,185 | 0,000 | 2,185 | -1,000 | 25,71 | 0,0205 | 0,040 | 1,809 | 2,328 | 25,64 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 46 | 1,2946 | 2,160 | 2,160 | 24,92 | NO | 2,188 | 0,000 | 2,188 | -1,000 | 25,57 | 0,0204 | 0,040 | 1,801 | 2,332 | 25,51 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 50 | 1,4339 | 2,319 | 2,319 | 24,00 | NO | 2,356 | 0,000 | 2,356 | -1,000 | 24,54 | 0,0192 | 0,034 | 1,746 | 2,504 | 24,48 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 51 | 1,4315 | 2,325 | 2,325 | 23,88 | NO | 2,361 | 0,000 | 2,361 | -1,000 | 24,43 | 0,0190 | 0,034 | 1,752 | 2,508 | 24,37 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 52 | 1,4345 | 2,522 | 2,522 | 22,84 | YES | 2,557 | 2,658 | 2,572 | -1,000 | 22,95 | 0,0182 | 0,030 | 1,904 | 2,732 | 22,84 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 53 | 1,4478 | 2,500 | 2,500 | 22,75 | YES | 2,535 | 2,632 | 2,549 | -1,000 | 22,88 | 0,0181 | 0,029 | 1,870 | 2,707 | 22,77 | | | | | | | | | | | | | | | |

Abbildung 32: Referenzeinbau r12 z10 Auswertung Übertragungszahlen, Messung C

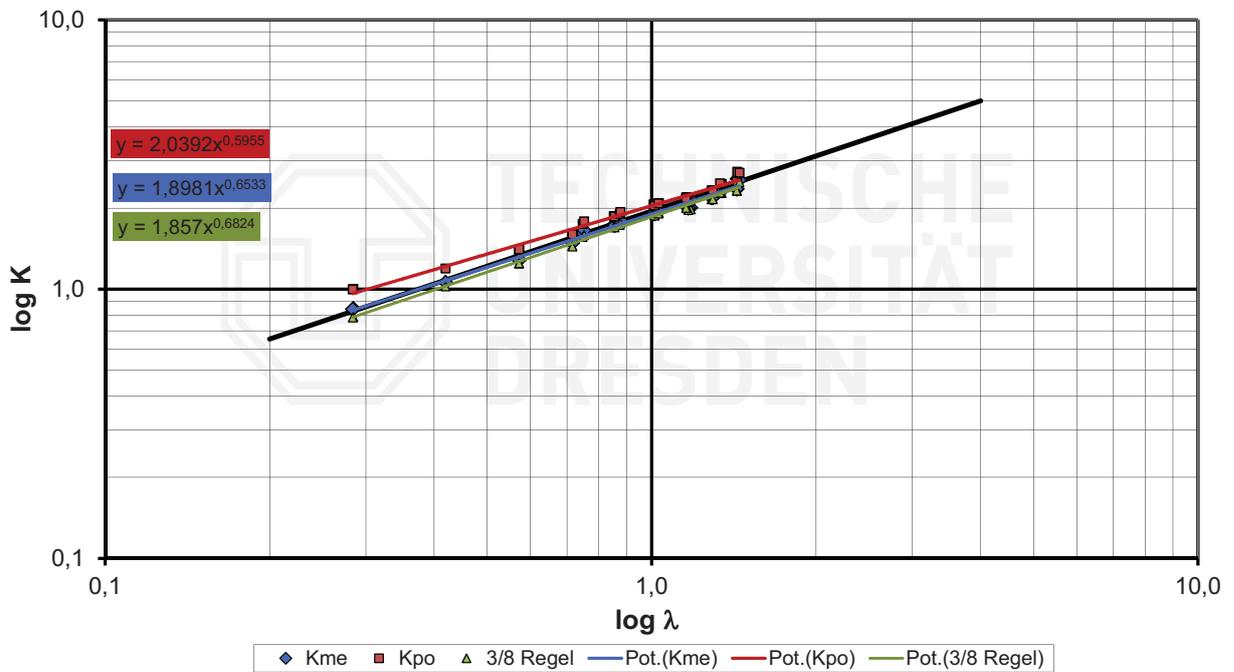


Abbildung 33: Referenzeinbau r12 z10 Diagramm Übertragungszahlen, Messung C

Aus einer Vielzahl von Messungen wurde eine Regressionsgerade über der Luftzahl λ erstellt. Die Abbildung 33 zeigt beispielhaft eine aktuelle Messung vom April 2014 des Referenzeinbaus mit nach *MEHLIG* (K_{Me}) und *POPPE* (K_{Po}) ausgewerteter Übertragungszahl K . Wie erwartet liegen die Übertragungszahlen nach *POPPE* K_{Po} höher als die von *MEHLIG* K_{Me} . Die schwarze Linie stellt die Regressionsgerade nach *MEHLIG* als Mittlung hunderter Messpunkte aus über 30 Jahren Messbetrieb dar. Wie zu erwarten war, liegen auch die aktuellen Messungen genau auf der Regressionsgeraden des Einbaus.

E.6 Übertragungszahl in Abhängigkeit der Kühlzonenbreite z

Folgende Funktionen sind aus **Messungen** in folgender Form erstellt: $K(\lambda) = A \cdot \lambda^B$.

Tabelle 1: Funktionen der Übertragungszahl in Abhängigkeit der Kühlzonenbreite z

| z in K | 5 | | 7,5 | | 10 | | 12,5 | | 15 | | 17,5 | | 20 | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B |
| K_{Me} | 0,8589 | 0,4503 | 0,8143 | 0,4609 | 0,8377 | 0,3837 | 0,8661 | 0,359 | 0,8358 | 0,2827 | 0,8049 | 0,3436 | 0,7316 | 0,5178 |
| K_{Po} | 0,9147 | 0,4148 | 0,8933 | 0,4457 | 0,8855 | 0,4299 | 0,8684 | 0,4264 | 0,8415 | 0,44 | 0,8093 | 0,4924 | 0,7598 | 0,5772 |
| $K_{3/8}$ | 0,8464 | 0,4543 | 0,7997 | 0,4658 | 0,8244 | 0,4782 | 0,807 | 0,4753 | 0,7808 | 0,4931 | 0,754 | 0,3436 | 0,7099 | 0,6057 |