

Schlussbericht **September 2004**

# Energieoptimierte Textillufttechnikanlage

ausgearbeitet durch

Philip Hauri  
awtec AG für Technologie und Innovation  
Leutschenbachstrasse 42  
8050 Zürich

DIS-Projekt Nr. 100311 DIS-Vertrags Nr. 150384	Programm Elektrizität	Im Auftrag des <b>Bundesamtes für Energie</b>
---	-----------------------	--

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden.  
Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der  
Autor dieses Berichts verantwortlich.

Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für  
Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:

[www.electricity-research.ch](http://www.electricity-research.ch)

## Impressum

### Auftraggeber

Zellweger Luwa AG  
Herr U. Kupferschmied  
Wilstrasse 11  
8610 Uster

Tel. 01 943 53 25  
Email: uku@luwa.ch

### Beiträge

Bundesamt für Energie (BFE), Herr  
Frey, Herr Brüniger (Projekt Nr.:  
100311)

### Auftragnehmer

awtec AG  
Leutschenbachstr. 42  
CH-8050 Zürich

Tel. 01 307 40 60  
Fax 01 307 40 61  
Email: info@awtec.ch

### Verfasser

Philip Hauri

### Verteiler

Auftraggeber

### Korreferat

Dr. Jochen Ganz

Datum  
5. Juli 04

Visum



## Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Evaluation und die Demonstration der Idee der „Direktbefeuchtung“ der Raumluft in der Textillufttechnik mit folgenden Eigenschaften:

1. 30% reduzierte Betriebskosten gegenüber heute, bei gleichbleibenden Investitionskosten
2. Nicht tropfend
3. Wenig Unterhalt (max. 1mal jährlich), zuverlässig
4. Homogene Feuchteverteilung, gute Regelbarkeit, Zonierung möglich
5. Als „innovativ verkaufbar“
6. Schwierig kopierbar

Aufgrund der Anforderungen an das entsprechende System wurden verschiedene Varianten der **Einstoff-Hochdruck-Zerstäuberdüse** getestet.

**Einstoffdüse sind geeignete Systeme**

Zur Abklärung der geforderten Eigenschaften wurden Tropfengrössenmessungen an der Fachhochschule Aargau und Direktbefeuchtungsversuche bei der Firma Luwa konzipiert und durchgeführt.

**Messungen der Tropfen und Befeuchtungsversuche**

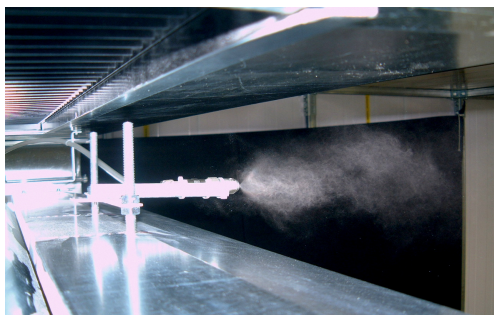
Der Direktbefeuchtungsversuch wurde nach folgendem Schema durchgeführt: In einem isolierten Versuchsraum wird zerstäubtes Wasser der Luftströmung beigegeben. Die Luftfeuchtigkeit wird durch einen konstanten Wassereintrag kontinuierlich erhöht. Die Raumluft wird durch einen 15-fachen Luftwechsel umgewälzt. Im Versuchsraum wurde während den Versuchen jeweils die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit an vier verschiedenen Stellen gemessen.

**Verdunstungsverhalten durch kontinuierliches Erhöhen der Feuchtigkeit**

Das Kriterium für die Anordnung des Zerstäubersystems war eine möglichst gute Verteilung des Wassernebels im Zuluftstrahl, ohne dass umgebende Flächen direkt nass werden. Die Fragestellung für die Versuche war: Ab welcher Raum- und Zuluftfeuchte beginnen umgebende Oberflächen durch nicht verdunstete Tropfen nass zu werden oder findet Tropfenwurf statt.

**Wann werden Oberflächen nass?**

Folgendes Bild zeigt eine geeignete Anordnung der Einstoffdüse auf dem Luwa-Prallband-Auslass.





Eine optimale Anordnung (keine Benetzung von umgebenden Flächen, wie z.B. Prallband) der Düse ist einfach realisierbar. Zu beachten ist nur, dass die Düse genug weit vom Auslasskanal entfernt ist und in die Luftströmung zeigt. Geeignet für den Einsatz in einer Direktbefeuchtungsanlage sind: Delavan Düse Hago 0.3-80° und die True Fog-Düse TF400CVF.

**Richtige Anordnung der Düse ist einfach realisierbar.**

Durch die Versuche konnte gezeigt werden, dass sich das Direktbefeuchtungsprinzip bis zu einer relativen Raumfeuchtigkeit von **75-80%** eignet. Bei höheren Feuchtigkeiten beginnen Oberflächen nass zu werden, was nicht zulässig ist.

**Ab 75-80% wird es kritisch**

Die Kosten einer TLT-Anlage mit Direktbefeuchtungssystem (mit Düsensystemen) dürften gut 10% unter einer konventionellen TLT-Anlage mit doppelter Luftmenge liegen.

**30% der Betriebskosten können eingespart werden**

Der elektrische Energieverbrauch kann dank der Direktbefeuchtung um bis zu 45% reduziert werden. Der Wasserverbrauch lässt sich um bis zu 66% senken. Da die Wasseraufbereitung für die Direktbefeuchtung im Gegensatz zu herkömmlichen Befeuchtungsanlagen aufwändiger ist, resultieren aus den Einsparungen bei Strom und Wasser 30% kleinere Betriebskosten. Würden weltweit alle geeigneten Anlagen mit einem Direktbefeuchtungssystem ausgerüstet und die Luftmengen entsprechend reduziert, so lässt sich ein Energieeinsparpotential von 1.5 TWh/a berechnen.

**Sparpotential**

Bewertet man das Prinzip der Einstoffzerstäuberdüse nach den geforderten Eigenschaften erhält man folgende Übersicht:

Kriterium	Düse
30% reduzierte Betriebskosten gegenüber heute, bei gleichbleibenden Investitionskosten	gegeben
Nicht tropfend (Ausschaltvorgang)	kritisch, mit konstruktiven Massnahmen zu verringern
Wenig Unterhalt (max. 1mal jährlich), zuverlässig	kritisch (Verschleiss, Verstopfen)
Homogene Feuchteverteilung	gut
gute Regelbarkeit	kritisch (Nachtropfen), mit konstruktiven Massnahmen zu verringern
Zonierung möglich	gegeben
„Als Innovation verkaufbar“	schwieriger
Schwierig kopierbar	kritisch

Die Direktbefeuchtungsversuche mit der Einstoffdüse als Zerstäubersystem zeigen also, dass das Prinzip für die meisten Anwendungen genügend gut funktioniert. Mit geringem Entwicklungsaufwand kann ein funktionierendes System auf den Markt gebracht werden.

**Die Versuche zeigen das Einstoffdüsen geeignet sind.**

## Summary

The object of this study is to evaluate and demonstrate the notion of „Direct humidification“ of the room air in textile air technology with the following characteristics:

7. 30% reduction in operating costs compared with the present day, for the same investment costs
8. Non-drip
9. Low maintenance (max. of once per year), reliable
10. Homogeneous moisture distribution, effective regulating facility, possibility of zoning
11. „Saleable as innovative“
12. Difficult to copy

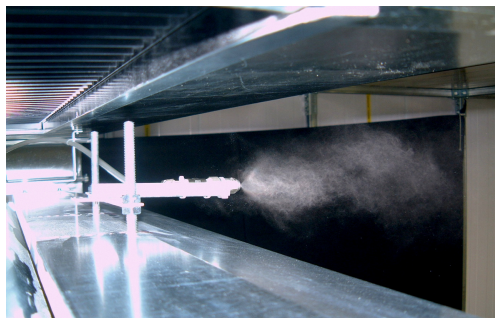
Due to the requirements imposed on the relevant system, different variants of the **mono or unary high-pressure atomizer nozzle** were tested.

To clarify the required properties, droplet size measurements were conceived and performed at the Aargau Technical University and direct humidification trials at the company Luwa.

The direct humidification trials were carried out according to the following scheme: Atomized water was added to the air flow in an insulated trials room. The air humidity was continuously increased by a constant feed of water. The room air is circulated by changing the air 15 times. The temperature and the humidity of the trials room was measured at four different points.

The criterion for the arrangement of the atomizer system was the best possible distribution of the water mist in the incoming jet of air, without the surrounding surfaces being directly wetted. The question formulated for the trials was: From which room and incoming air humidity do the surrounding surfaces become wetted through non-evaporated droplets or when does the emission of droplets take place.

The following illustration shows the arrangement of the unary nozzle on the Luwa deflector belt discharge.



**Unary nozzle systems are suitable**

**Measurements of droplets and humidification trials**

**Evaporation behaviour and continuous increase in humidity**

**When are surfaces wet?**

An optimal arrangement (no wetting of surrounding surfaces, e.g. deflector belt) of the nozzle is simple to realise. It is only necessary to ensure that the nozzle is far enough away from the discharge channel and is directed into the air flow. The following are suitable for use in a direct humidification system: the Delavan nozzle Hago 0.3-80° and the True Fog Nozzle TF400CVF.

**Correct arrangement of nozzle is simple to realise.**

The trials enabled it to be demonstrated that the direct humidification principle is suitable up to a relative room humidity of **75-80%**. At higher humidity levels, surfaces start to become wet, which is not permissible.

**Critical from 75-80%**

The costs of a TLT installation with direct humidification system (with nozzle system) is considered to be a good 10% below that of a conventional TLT installation with twice the air flow.

**30% savings in operating costs**

Thanks to direct humidification the electrical energy consumption can be reduced by up to 45%. Water consumption is cut by up to 66%. As the water treatment for direct humidification is more costly compared to traditional humidification systems, the savings in electrical current and water yield a 30% reduction in operating costs. If all suitable installations worldwide were to be equipped with a direct humidification system, and the air flow rates correspondingly reduced, the energy saving potential would be 1.5 TWh/a.

**Savings potential**

An evaluation of the principle of the unary atomizer nozzle according to the required characteristics yields the following overview:

Criterion	Nozzle
30% reduction in operating costs compared to the present day, for the same investment costs	given
Non-drip system (shutdown cycle)	critical, to be reduced by design measures
Low maintenance (max. of once per year), reliable	critical (wear, blocking)
Homogeneous humidity distribution	good
Effective regulation facility	critical (dripping), to be reduced by design measures
Zoning possible	given
„Saleable as innovation“	more difficult
Difficult to copy	critical

The direct humidification trials with the unary nozzle as an atomizer system therefore demonstrate that the principle functions sufficiently well for most applications. A functioning system can be brought on to the market with a small development outlay.

**Trials indicate that unary nozzles are suitable.**

## Résumé

Le but de ce travail est d'évaluer et de présenter le concept de l'„humidification directe“ de l'air ambiant dans la ventilation des textiles, dont voici les caractéristiques:

13. Réduction des frais d'exploitation de 30% par rapport à ceux d'aujourd'hui, pour des coûts d'investissement constants
14. Absence de perlage
15. Moins d'entretien (max. 1 fois par an), fiabilité
16. Répartition homogène de l'humidité, bonne régulation, possibilité de zonage
17. „Vendable comme produit innovateur“
18. Difficile à reproduire

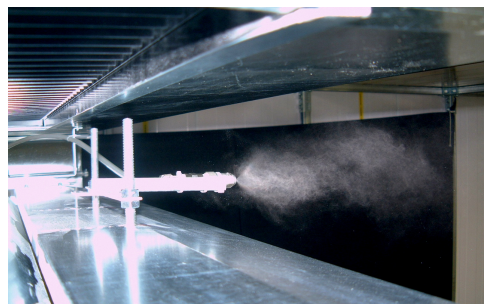
En raison des exigences posées au système correspondant, diverses variantes de la **buse pulvérisatrice haute pression à monocomposant** ont été testées.

Pour déterminer les caractéristiques requises, des mesures de la taille des gouttes ont été développées et réalisées à la Haute école spécialisée d'Argovie ainsi que des tests d'humidification directe à la société Luwa.

Le test d'humidification direct a été effectué selon le schéma suivant: de l'eau pulvérisée est ajoutée au flux d'air dans une enceinte d'essai isolée. L'humidité de l'air est augmentée de manière continue par un apport d'eau constant. L'air de l'enceinte est circulé par 15 renouvellements d'air. Dans l'enceinte d'essai, la température et l'humidité de l'air ont été mesurées à quatre endroits différents.

Le critère concernant la disposition du système de pulvérisateur était d'obtenir la meilleure répartition possible du nuage d'eau dans le flux d'air amené, sans que les surfaces environnantes soient directement mouillées. La question qui se posait à propos des essais était: à partir de quelle humidité ambiante et d'air amené les surfaces environnantes commencent-elles à être mouillées par des gouttes non-pulvérisées ou quand le perlage\* commence-t-il?

L'image suivante présente une disposition appropriée de la buse monocomposant montée à la sortie de la bande de rebond Luwa.



**Les buses à monocomposant sont des syst. appropriés**

**Mesure des gouttes et essais d'humidification**

**Evaporation due à l'augmentation continue de l'humidité**

**Quand les surfaces deviennent-elles humides?**

Une disposition optimale (sans mouillage des surfaces environnantes, telle que par ex. la bande de rebond) de la buse est facile à réaliser. Il faut seulement veiller à ce que la buse soit suffisamment éloignée de canal de sortie et à ce que qu'elle soit orientée vers le flux d'air. Convient pour l'utilisation dans une installation d'humidification directe: buse Delavan Hago 0.3-80° et la buse True Fog TF400CVF.

**Disposition correcte de la buse facile à réaliser.**

Les essais permettent de montrer que le principe de l'humidification directe est approprié jusqu'à une température ambiante relative de 75-80%. Lors d'humidités supérieures, les surfaces commencent à être mouillées, ce qui n'est pas admissible.

**Point critique à partir de 75-80%**

Le coût d'une installation TLT à système d'humidification direct (systèmes à buses) doit se situer à au moins 10% au-dessous de celui-ci d'une installation TLT conventionnelle à double quantité d'air.

**30% des frais d'exploitation peuvent être économisés.**

L'humidification directe permet d'économiser jusqu'à 45% de la consommation d'énergie électrique. La consommation d'eau peut être réduite de jusqu'à 66%. Comme le traitement de l'eau pour l'humidification directe est plus coûteux par rapport aux installations d'humidification traditionnelles, il en résulte jusqu'à 30% de diminution des frais d'exploitation dues aux économies réalisées sur l'électricité et l'eau. Si toutes les installations appropriées étaient équipées d'un système d'humidification direct et les quantités d'air réduites en conséquence, nous pourrions obtenir un potentiel d'économie énergétique de 1.5 TWh/a.

**Potentiel d'économie**

Si nous évaluons le principe de la buse de pulvérisation à monocomposant en fonction des caractéristiques requises, nous obtenons l'aperçu suivant:

Critère	Buse
Réduction des frais d'exploitation de 30% par rapport à ceux d'aujourd'hui, pour des coûts d'investissement constants	effective
Absence de perlage (processus désactivation)	critique à diminuer par des mesures au niveau de la construction
Moins d'entretien (max. 1 fois par an), fiabilité	critique (usure, obstruction)
Répartition homogène de l'humidité	bonne
Bonne régulation	critique (perlage*, à diminuer par des mesures au niveau de la construction)
Possibilité de zonage	effective
„Vendable comme produit innovateur“	difficile
Difficile à reproduire	critique

\* perlage: formation de gouttes

Les essais d'humidification directe au moyen de la buse à monocomposant comme système pulvérisateur montrent donc que ce principe fonctionne assez bien dans la plupart des applications. Un système opérationnel peut être mis sur le marché en investissant peu au niveau du développement.

**Les essais  
démontrent que  
les buses à  
monocompo-  
sant sont  
appropriées.**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ausgangslage .....</b>	<b>1</b>
1.1	Ziele .....	1
1.2	Lösungsweg .....	1
1.3	Abgrenzung des Projektes .....	4
<b>2</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Ziel und Vorgehen.....</b>	<b>6</b>
3.1	Kriterien und Fragestellungen.....	6
3.2	Vorgehen.....	7
3.2.1	Parameter .....	7
3.2.2	Charakterisierung des Versuchsraumes .....	7
<b>4</b>	<b>Mittel .....</b>	<b>8</b>
4.1	Versuchsraum .....	8
4.1.1	Definitionen .....	8
4.1.2	Prozessschema .....	9
4.1.3	Anordnung der Sensoren.....	9
4.2	Düsensysteme .....	9
4.3	Tropfenwurfkontrolle .....	12
4.4	Versuchsprogramm.....	13
4.5	Auswertungen .....	13
<b>5</b>	<b>Resultate und Beobachtungen.....</b>	<b>16</b>
5.1	Raumcharakterisierung.....	16
5.2	Düsenvergleiche .....	17
5.2.1	Tropfengrößenmessungen .....	17

5.2.2	Befeuchtungsmessungen .....	18
5.2.3	Sichtbarkeit von grossen Tropfen .....	20
5.3	Einfluss der Düsenposition .....	20
5.4	Einfluss der Prallbandeinstellung.....	22
5.5	Feuchtigkeitsverteilung im Raum.....	23
5.6	Reproduzierbarkeit.....	26
5.7	Tropfenverhalten im Versuchsraum.....	28
5.7.1	Tröpfchen in der Luftströmung.....	28
5.7.2	Tröpfchen an umgebenden Wänden und Gegenständen .....	31
5.7.3	Tröpfchen auf der Kontrollfläche.....	31
5.8	Beurteilung der Messversuche bei LUWA .....	32
5.8.1	Verbesserungsvorschläge für eventuelle weitere Versuche: .....	32
5.8.2	Einfluss der Temperatur auf die relative Luftfeuchtigkeit.....	32
5.8.3	Dynamischer Prozess .....	33
5.8.4	Wäggenauigkeit .....	33
5.9	Zusammenfassung der Resultate und Beobachtungen .....	34
<b>6</b>	<b>Systemeigenschaften .....</b>	<b>37</b>
6.1	Regelbarkeit .....	37
6.2	Lebensdauer .....	38
6.3	Vor- und Nachteile von Einstoffdüsen .....	38
6.4	Kostenvergleich .....	39
6.5	Systemvergleich bezüglich Energie- und Wasserverbrauch .....	40
6.6	Eigenschaftsbewertung der Einstoffdüsen im Direktbefeuchtungssystem.....	41
<b>7</b>	<b>Empfehlungen/ weiteres Vorgehen.....</b>	<b>42</b>
<b>8</b>	<b>Danksagung .....</b>	<b>43</b>



<b>A1. Anhang1 .....</b>	<b>44</b>
A1.1. Konzept für den Direktbefeuchtungsversuch.....	44
A1.1.1 Zielsetzung.....	44
A1.1.2 Versuchsaufbau .....	45
A1.1.3 Versuchsbetrieb .....	47
A1.1.4 Diskussion des gewählten Versuchsaufbau und -Ablauf .....	50
A1.2. Einstellungen für den LUWA Direktbefeuchtungsversuch.....	50
A1.3. Literaturverzeichnis .....	51
A1.4. Spezifikation: Temperatur- und Feuchtesensor .....	51

# 1 Ausgangslage

Bei Textillufttechnikanlagen (TLT-Anlagen) sind Luftwechselraten von 30/h durchaus üblich, da sehr hohe innere Lasten abgeführt werden müssen (Abwärme der Textilmaschinen, typ.  $300\text{W/m}^2$ ) unter Einhaltung von präzisen Luftfeuchtigkeitswerten. Insbesondere wenn sehr hohe relative Luftfeuchtigkeitswerte gefordert werden ( $>70\%$  z.B. bei Baumwollwebereien), treibt dies die Luftwechselraten bei konventionellen Textillufttechnikanlagen in die Höhe. Gelingt es, den Feuchteeintrag vom Luftwechsel zu entkoppeln, so sollte sich der erforderliche Luftwechsel bei ca. 30% aller TLT-Anlagen um ca. 50 % senken lassen. In diesem Projekt sollen Befeuchtungssysteme vertieft analysiert und bewertet werden. Das vielversprechendste Konzept soll auch in einer Demonstrationsanlage gezeigt werden. Bei guten Resultaten soll bei der Geschäftsleitung der Luwa ein entsprechendes weiterführendes Umsetzungsprojekt beantragt werden.

**Hohe Luftwechselraten durch hohe innere Lasten.**

**Entkoppelung des Feuchteeintrages vom Luftwechsel**

## 1.1 Ziele

Das Ziel des Projektes ist es, den Feuchteeintrag vom Luftwechsel bei Textillufttechnikanlagen zu entkoppeln. So sollte sich der erforderliche Luftwechsel bei ca. 30% aller TLT-Anlagen um ca. 50 % senken lassen. In diesem Projekt sollen Befeuchtungssysteme vertieft analysiert und bewertet werden. Das vielversprechendste Konzept soll auch in einer Demonstrationsanlage gezeigt werden.

**30-50% Reduzierung des Luftwechsels**

## 1.2 Lösungsweg

Die Energie- und Wasserkosten für den Betrieb der TLT-Anlagen sind auch in Drittwelt- und Schwellenländern hoch und machen einen signifikanten Anteil (20 bis 30% ohne Kältemaschineneinsatz) an den Herstellkosten des textilen Endproduktes aus. Luwa ist in diesem Markt als Marktführer weltweit tätig.

**Energiekosten sind überall hoch**

Neues Klimatisierungskonzept mit halber Luftmenge

Ansatz	Entkopplung des Feuchteeintrages in den Raum vom Luftwechsel (Direktbefeuchtung). Wassereintrag z.B. über Hochdruckdüsen direkt in den Raum.
Flankierende Massnahmen	Bei Bedarf Reduktion des Staubproblems durch geeignete Massnahmen
Kundennutzen	Tiefere Betriebskosten (E-Verbrauch)

Geringerer Raumbedarf für die TLT (geringere Kanalquerschnitte, keine Luftwäscher),

Raumfeuchte lässt sich unabhängig vom Luftwechsel und den Lasten einstellen.

Durch die reduzierten Luftmengen werden unter Umständen kompakte, vormontierte Filter- / Ventilatoreinheiten attraktiv.

Investitionskosten:

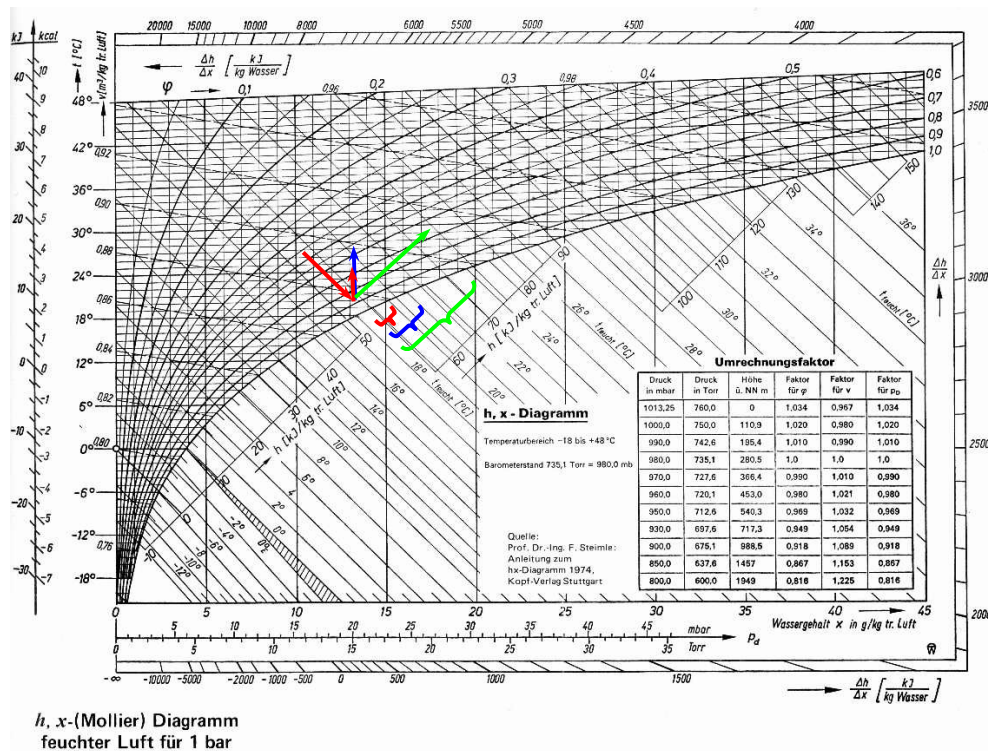
Erste Abklärungen zeigen, dass mit diesem Ansatz die Investitionskosten etwa gleich bleiben. Bei der Direktbefeuchtung dürfte noch ein Kostenoptimierungspotential vorhanden sein. Zudem halbiert sich der Raumbedarf für die Lüftungsanlagen.

**Investitionskosten bleiben etwa gleich**

Betriebskosten:

Wir rechnen damit, dass die Betriebskosten für die TLT, je nach Textilprozess und Stromtarif, dank Strom- und Wassereinsparungen 30-40% reduziert werden können.

**Betriebskosten ca. 30-40% tiefer**



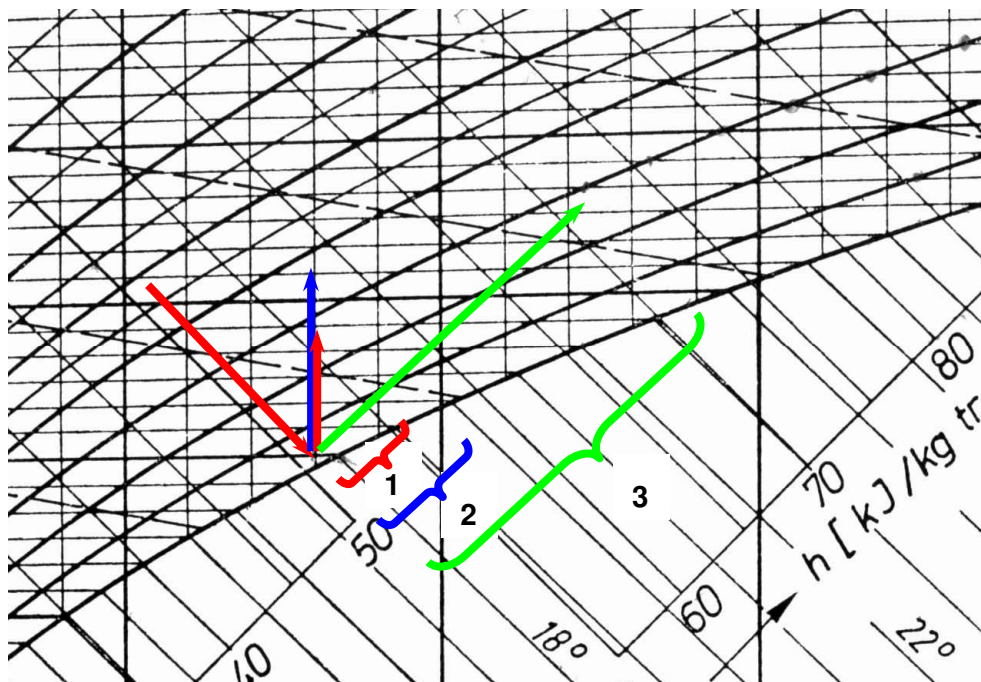


Abb. 1: Mollierdiagramm am Beispiel einer Baumwollweberei: Luft vor der Befeuchtung: 25 °C. 50% r.F..  
 1)(rot) Konventionelle Befeuchtung, Zuluft 95% r.F., Abluft 24 °C 70% r.F..  
 2) (blau) Loomspher: wie 1) , Abluft 60% r.F..  
 3) (grün) Direktbefeuchtung hier exemplarisch mit einer Abluft mit 28 °C und 70% r.F..  
 Die Länge der geschwungenen Klammern ist proportional zur pro Luftmenge abgeführten Wärmelast.

### Energieeinsparpotential

Der Markt weltweit für TLT-Anlagen	400 Mio CHF/a
Bei einer Lebensdauer von 15 a ergibt dies	6 Mia CHF (Neuwert aller TLT-Anlagen weltweit)
Bei Kosten von 200 kCHF/100'000 m <sup>3</sup> /h Luft und einer Einsetzbarkeit bei 30 % aller TLT-Anlagen ergibt sich ein Energieeinsparpotential von	1.5 TWh/a (elektrisch)
oder	210 MW Dauerleistung weltweit
Bezogen auf die Schweiz ergibt das etwa	2.8 GWh/a
oder (in der Schweiz ist die Textilindustrie nur noch schwach vertreten)	345kW Dauerleistung

### 1.3 Abgrenzung des Projektes

Die Idee der Direktbefeuchtung ist in der Textilindustrie sehr alt und wurde auch in der Vergangenheit häufig praktiziert. Die Systeme bestehen aus einem Wasserverteilnetz und Sprühdüsen, die Wasser direkt im Produktionsraum versprühen. Die bisherigen Lösungen haben folgende Probleme:

**Idee Direktbefeuchtung ist sehr alt**

Tendenz zum Tropfen

verstopfen häufig und brauchen einen grossen Unterhalt

führen zu ungleichmässigen Feuchteverteilungen

Bedingt durch die bisher mit solchen Systemen aufgetretenen Probleme, die auch darauf gründen, dass diese als ausgesprochene Low-cost-Lösungen realisiert wurden (die Klimaanlage des armen Mannes), hat der Ansatz grundsätzlich ein schlechtes Image.

**Direktbefeuchtung gilt als Low-Cost Lösung**

Thermodynamisch ist das Potential sehr gross. In der neuen Lösung müssen die oben erwähnten Probleme eliminiert sein und ihr muss zumindest auf der Marketing-Ebene ein high-tech-image verliehen werden können. Die technischen Herausforderungen liegen neben der Zuverlässigkeit des Befeuchtungssystems in der Systemintegration.

**Probleme müssen in neuer Lösung eliminiert werden**

## 2 Einführung

Aufgrund der Resultate aus der Vorstudie wurden erste praktische Versuche nach dem Direktbefeuchtungskonzept realisiert und ausgewertet. (Das Versuchskonzept befindet sich im Anhang.) Der grosse Vorteil einer Direktbefeuchtungsanlage ist die Entkoppelung der Feuchtigkeit von der Zuluft und damit markante Kosten-und Energieeinsparungen. Anhand der Bewertung der verschiedenen Befeuchtungssysteme wurde das Zerstäubungsprinzip mittels Einstoff-Zerstäuberdüse weiterverfolgt und getestet.

**Einstoffdüse  
diente bei den  
Versuchen als  
Zerstäuber-  
prinzip**

Einstoffdüsen sind auf dem Markt als standardmässiges Produkt problemlos erhältlich. Zudem ist diese Art von Zerstäubern technisch sehr ausgereift und bietet für einen geringen Preis sehr gute Leistungen.

**Einstoffdüsen  
sind technisch  
ausgereifte  
Standard-  
Produkte.**

Als Grundlage für die Versuche diente ein Versuchsraum wie im Anhang beschrieben. Zum System gehören ein Schlitzrohr und ein Prallband auf dem die verschiedenen Befeuchtungssysteme montiert wurden.

Das Ziel dieser Versuche im weiteren Sinne war Daten über das Potential, die Risiken und das Verhalten einer Direktbefeuchtungsanlage zu sammeln. Das Ziel der Versuche im engeren Sinne war die Eignung des Befeuchtungssystems in einer Direktbefeuchtungsanlage abzuklären. Eine wichtige Fragestellung war dabei, ab welcher relativen Raumfeuchtigkeit beginnen umgebende Oberflächen durch nicht verdunstete Tropfen nass zu werden oder findet Tropfenwurf statt.

**Ziel: Potential  
und Risiken/  
Eignung der  
Befeuchtungs-  
systeme**

## 3 Ziel und Vorgehen

### 3.1 Kriterien und Fragestellungen

Für die ersten Versuche wurden folgende Kriterien definiert:

1. Möglichst gute Verteilung des Wassernebels im Zuluftstrahl, ohne dass umgebende Flächen direkt nass werden.
2. Ab welcher Raum- und Zuluftfeuchte beginnen umgebende Oberflächen durch nicht verdunstete Tropfen nass zu werden oder findet Tropfenwurf statt.

Um die Eignung des Direktbefeuchtungsprinzips möglichst genau abzuklären wurden zusätzlich verschiedene Fragestellungen in die Untersuchungen einbezogen:

**Die wichtigsten  
zusätzlichen  
Fragestellungen**

- Gibt es Unterschiede zwischen auf dem Markt erhältlichen Düsensystemen?
- Wie sieht die Verteilung der Feuchtigkeit im Raum aus?
- Welchen Einfluss hat die Position des Zerstäubungssystems auf das Verhalten des Direktbefeuchtungsprinzips?
- Welchen Einfluss hat die Einstellung des Prallbandes auf das Verhalten des Direktbefeuchtungsprinzips?
- Wie sieht das Verhalten der Tropfenbildung im Raum aus?
- Gibt es noch andere, bisher unbekannte Effekte/ Probleme?
- Wie sieht die Regelbarkeit der Systeme aus?
- Mit welcher Lebensdauer kann man bei den Systemen rechnen?
- Welche Kosten fallen an?

## 3.2 Vorgehen

Um obige Fragen beantworten zu können, wurden praktische Experimente durchgeführt. Während der Versuche wurden jeweils die Temperaturen und relativen Luftfeuchtigkeiten an drei verschiedenen Raumpunkten über die Zeit aufgenommen. Zusätzliche wurden Fotos und Videoclips von den jeweiligen Versuchen aufgenommen. Die sehr wichtige Fragestellung über das Verhalten der Tropfenbildung im Raum konnte nicht mit Fotos dokumentiert werden. Die Dokumentation beruht alleine auf Beobachtungen des Experimentators.

**Die Dokumentation der Tropfenbildung beruht auf Beobachtungen**

### 3.2.1 Parameter

Für die Versuche sind folgende veränderbare Parameter definiert worden:

- Düsenhersteller resp. Düsengeometrie
- Räumliche Position der Sensoren
- Abstand der Prallbandbleche
- Düsenposition in z-Richtung
- Düsenposition in x-Richtung

Weiter gelten folgende nicht veränderbare Parameter:

- Raumtemperatur: 24° Celsius
- Aussentemperatur: 22° Celsius
- Luftwechsel: 15fach
- Wassermassenstrom: 3.6l/h
- Wasserdruck: düsenspezifisch
- Höhe der Kontrollfläche: max. 2.5 Meter

### 3.2.2 Charakterisierung des Versuchsraumes

Zur Charakterisierung des Raumes wurde im Vorfeld zuerst ein Verdampfungsversuch durchgeführt. Dieser dient als direkter Vergleich und als Referenzmessung. Das damit verbundene Prinzip ist unabhängig von den Verdunstungsmechanismen feinsten Tröpfchen und den damit verbundenen Schwierigkeiten.

**Referenzversuch mittels Verdampfung**



## 4 Mittel

In diesem Kapitel werden die für die Versuche eingesetzten Hilfsmittel beschrieben.

### 4.1 Versuchsraum

#### 4.1.1 Definitionen

Die unteren zwei Skizzen zeigen den grundsätzlichen Aufbau des Versuchsraumes mit den integrierten Bestandteilen. Zu beachten ist, dass sich der Luftauslass nicht ganz in der Mitte des Raumes befindet.

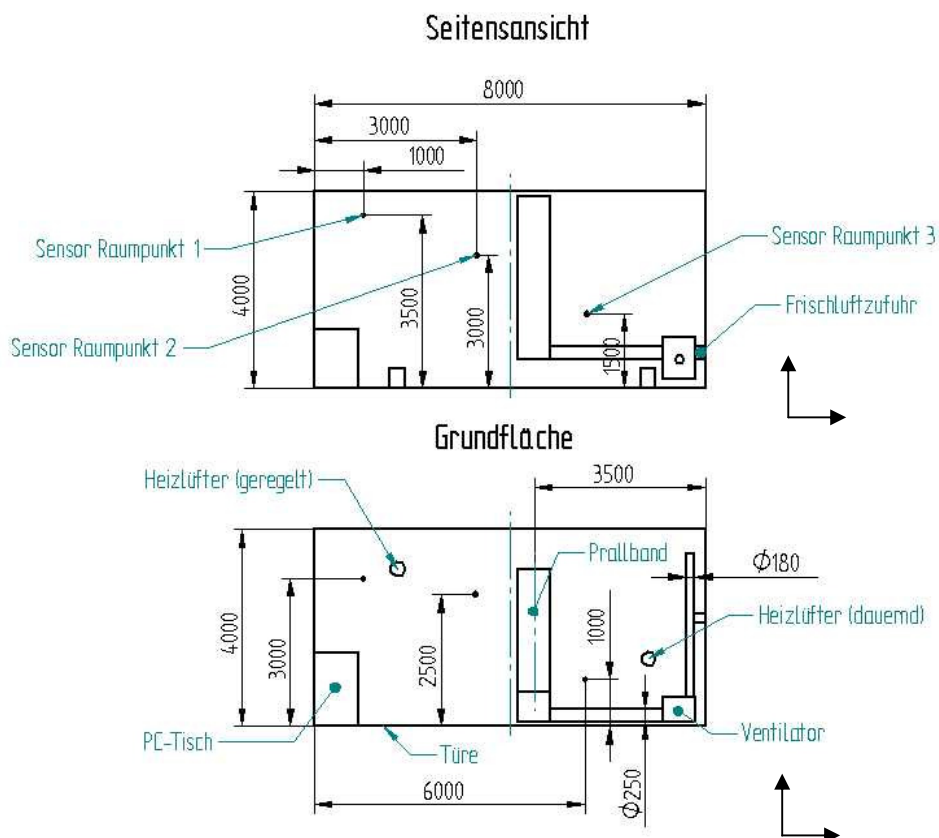


Abb. 2: Wichtigste Abmessungen des Versuchsraumes

### 4.1.2 Prozessschema

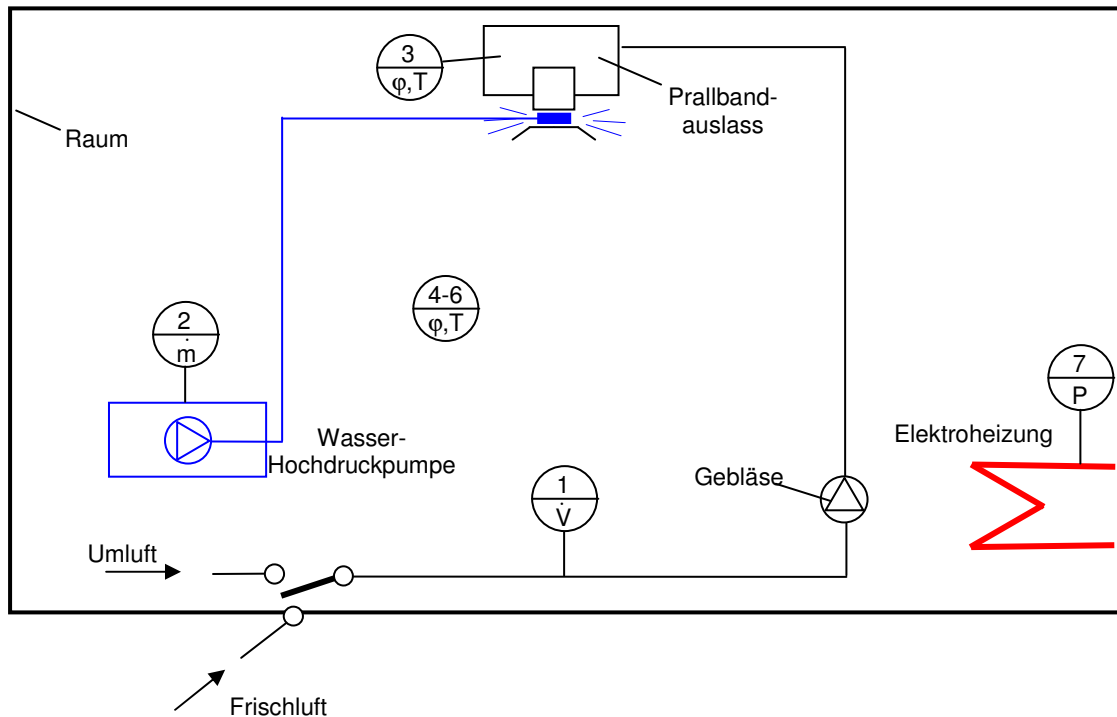


Abb. 3: Skizze des Prozessschemas

### 4.1.3 Anordnung der Sensoren

Zur Messung der Raumtemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit wurde ein kombinierter Sensor verwendet: Typ HTT II (Datenblatt im Anhang). Im Raum wurden insgesamt vier Sensoren angeordnet. Für die meisten Versuche wurden die Sensoren in Positionen wie in obiger Skizze 1 dargestellt.

Bei der Positionierung der Sensoren musste beachtet werden, dass diese durch die Tropfen nicht direkt benetzt wurden.

## 4.2 Düsensysteme

Die Einstoffdüsen wurden für die Versuche so angeordnet, dass diese direkt in den Luftstrom zeigten.

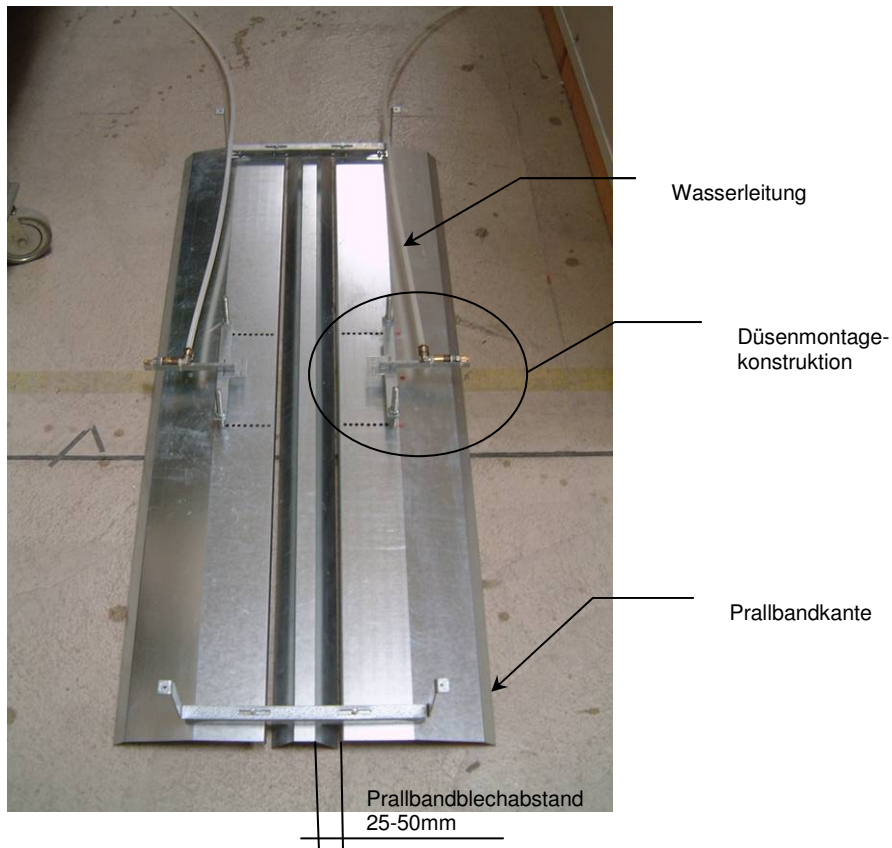


Abb. 4: Anordnung der Düsen auf dem Prallband (Sicht von oben)

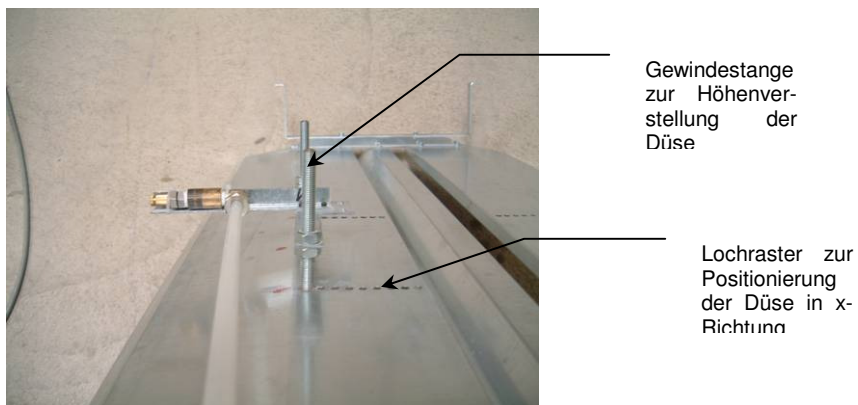


Abb. 5: Anordnung der Düsen auf dem Prallband (Sicht von der Seite)

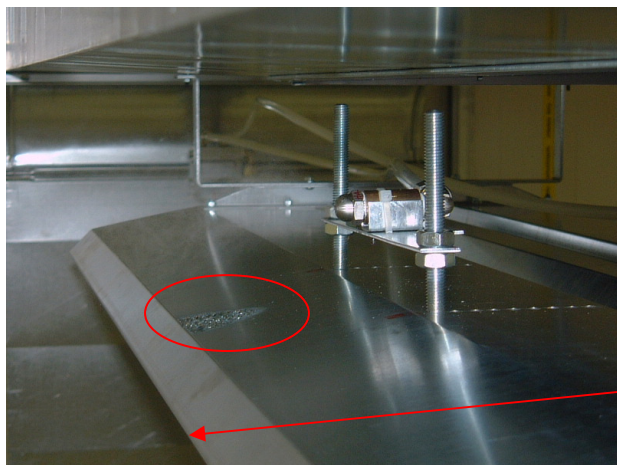
Durch den unterschiedlichen Sprühkegel und der Sprühweite resp. Sprühenergie der verschiedenen Düsen musste die Montage der Düsen flexibel gestaltet werden.

Kriterien für die Anordnung:

- Keine Benetzung der umliegenden Flächen, wie zum Beispiel Prallband, Luftauslass oder Düse selber.
- Gute Verteilung der Tröpfchen im Luftstrom

Die Strömungsverhältnisse am Prallband führen zu Rückströmungen an der Düse, die bei unzuweckmässiger Positionierung der Düse zu Benetzungen führen kann. Um dies zu verhindern mussten alle Düsen im Bereich der Prallbandkante gesetzt werden.

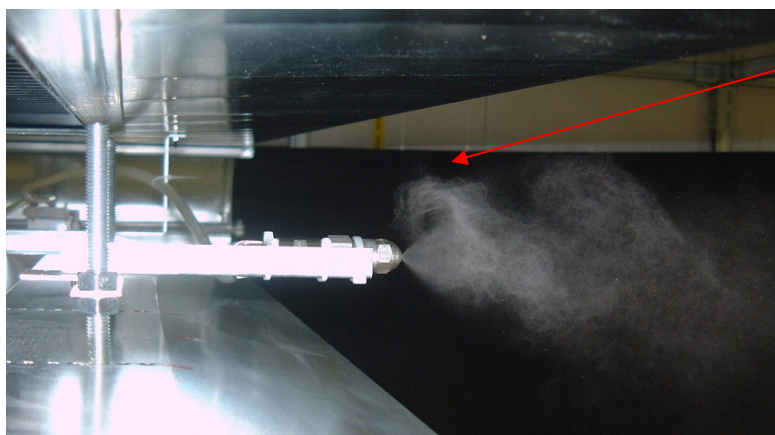
**Rückströmung  
kann zur  
Benetzung  
führen**



Prallbandkante

Abb. 6: Schlechte Anordnung der Düse (Sicht von der Seite.)

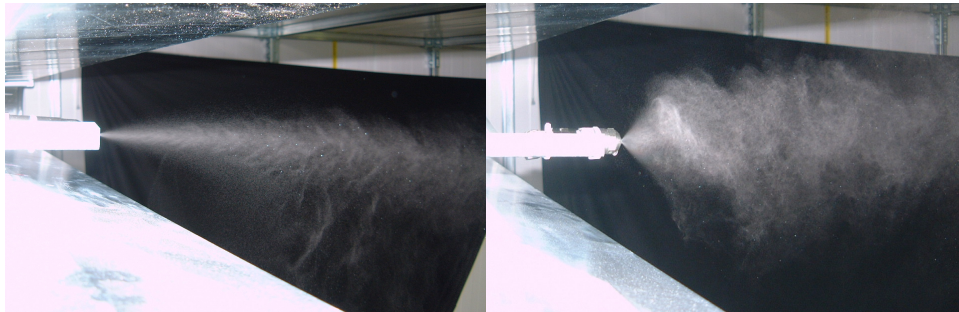
In Abb. 6 ist deutlich sichtbar, dass zu weit hinter der Prallbandkante montierte Düsen dazu führen, dass der Auslass beschlägt.



Rückström-  
bereich

Abb. 7: Rückströmverhalten

In Abb. 7 ist im oberen Bereich des Prallbandes die Rückströmung deutlich zu sehen. Diese kann dazu führen, dass der Düsenkörper beschlägt. Der Rückströmungseffekt kann durch eine Verringerung des Prallbandblechabstandes verringert werden. Zusätzlich sind der Sprühkegelwinkel einer Düse und die kinetische Energie der Tröpfchen für die Tragweite des Beschlagens wichtig.



*Abb. 8: Unterschiedliche Sprühbilder verschiedener Düsentypen*

*Abb. 8* zeigt die Unterschiede in der Form des Sprühkegels verschiedener Düsen.

### 4.3 Tropfenwurfkontrolle

Um einen möglichen Tropfenwurf oder Kondensationen zu visualisieren wurden Kontrollflächen zu Hilfe genommen. Diese Kontrollflächen bestehen aus einer sehr glatten und optisch reflektierenden Oberfläche. Zudem ist es von Vorteil, wenn die Oberfläche wasserabstossend ist. Am besten eignet sich ein Spiegel.

**Glatte und reflexive Oberfläche.**

Hält man die Kontrollfläche so gegen eine Lichtquelle, dass sich die Lichtquelle darin spiegelt, kann man auch feinste Tröpfchen erkennen. Man kann sogar beobachten, wie die Tröpfchen wieder verdunsten.

**Feinste Tröpfchen gut erkennbar Oberfläche.**

Zusätzlich kann zum Teil mit bloßem Auge ein Tropfenwurf gesehen werden. Dazu braucht es einen kontrastreichen Hintergrund und eine Lichtquelle. Somit kann eine schlechte Düse sofort identifiziert werden. Auch die menschliche Haut reagiert sehr sensitiv auf möglichen Tropfenwurf.

**Tropfenwurf mit Auge und Haut sichtbar/spürbar**

Das quantitative Erfassen (z.B. Fotografieren, Messen) dieser feinsten Tröpfchen ist schlecht realisierbar. Aus diesem Grund wurde für die Versuchsreihe darauf verzichtet. Trotzdem können durch Beobachtungen ein relativer Vergleich mit verschiedenen Befeuchtungssystemen und der ungefähre Beginn des Tropfenwurfes bestimmt werden.

**Quantitative Erfassung schwierig**



## 4.4 Versuchsprogramm

<b>Vorversuche</b>	Raumcharakterisierung mittels Verdampfung
	Einstellung der Düsenposition
	Einstellung der Heizregelung
<b>Hauptversuche</b>	Untersuchung von 7 verschiedenen Düsen
	Reproduzierbarkeitsversuche (unterschiedliche Tage)
	Unterschiedliche Düsenposition (Höhe)
	Unterschiedliche Einstellungen am Prallband
	Verschiedene Sensorpositionen (Feuchtigkeitsverteilung)

## 4.5 Auswertungen

Die Versuche wurden jeweils mit Excel ausgewertet worden.

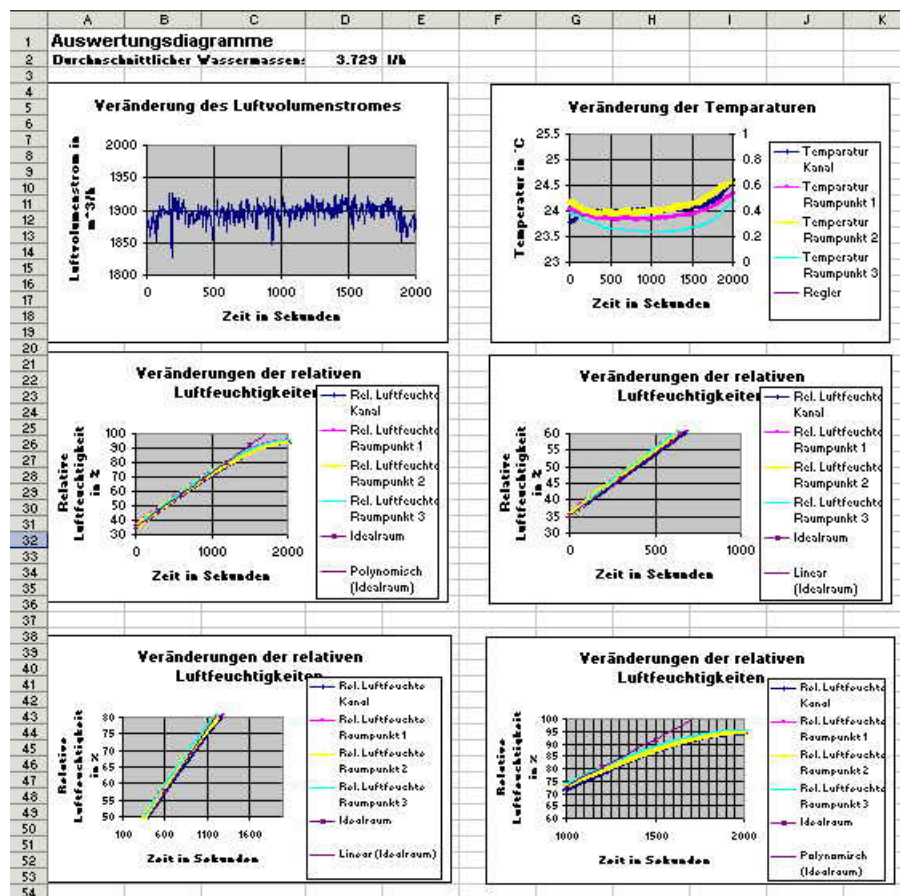


Abb. 9: Beispiel: Auswertungsdiagramme

Das Beispiel in *Abb. 9* zeigt den Aufbau des Auswerteblasses. Die zwei oberen Diagramme zeigen den Luftstrom und die Veränderung der Temperaturen. Zusätzlich zur Temperatur ist (falls eingetreten) der Zustand der Temperaturregelung aufgezeigt (Zustand 1 oder 0). Die vier unteren Diagramme zeigen die Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeiten. Zur besseren Darstellungen wurden verschiedene Bereiche vergrößert.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Zeitraum	Zeit	Luftvolumenstrom	TT Kennl.	r.F. Kennl.	TT Room 1	r.F. Room 1	TT Room 2	r.F. Room 2	TT Room 3	r.F. Room 3	Wasserinhaltsumstr.	r.F. Heides Regler	Wasserzamm.	Volumenstrom		Bemerkungen	
2	0 14:45:00	1174.510041	23.7105481	35.2144462	24.0254004	24.9481923	24.1750793	35.4521446	23.9450574	35.0321299	3.4	25.111396	0	21.42				
3	5 14:45:03	1175.499710	23.7101051	35.4024299	24.0260941	25.2359923	24.1917447	35.7248971	23.9444612	35.0949471	3.4							
4	10 14:45:10	1175.125904	23.7148714	35.4431771	24.0321655	25.4061854	24.1751423	34.6174023	23.9547227	35.0544322	3.4							
5	15 14:45:23	1184.652101	23.7161231	35.7121349	24.0241594	25.5643134	24.1162481	34.2121045	23.9471741	35.0792712	3.4							
6	20 14:45:29	1181.196627	23.7147791	34.6311635	24.0112129	25.0591462	24.1164958	34.3489512	23.9521517	35.0231614	3.4							
7	25 14:45:32	1189.237844	23.8023811	36.1775512	24.0243101	26.0297192	24.1972176	34.5471012	23.9442024	34.9174847	3.4							
8	30 14:45:31	1175.225945	23.8101011	34.3874043	24.0101644	24.2096176	24.0771254	34.7621467	23.9431577	34.9165203	3.4							
9	35 14:45:43	1175.491982	23.8052124	34.5118157	24.0261609	24.7411511	24.1951523	34.9181754	23.9548847	34.9174424	3.4							
10	40 14:45:41	1176.010199	23.8117164	34.7274319	24.0461174	24.7241697	24.1821239	34.7261247	23.9557211	34.9121217	3.4							
11	45 14:45:52	1197.387252	23.8124274	37.0171952	24.0115274	24.9511962	24.1621439	37.8421452	23.9547702	34.9191421	3.4							
12	50 14:45:59	1184.248313	23.8240771	37.2912158	24.0247762	27.4747109	24.0101921	37.7447191	23.9491207	37.0347141	3.4							
13	55 14:46:02	1180.283145	23.8251242	37.4072244	24.0221491	27.7851199	24.1721992	37.1159621	23.9541907	37.4099731	3.4							
14	60 14:46:01	1172.044742	23.8302207	37.4314091	24.0210171	28.1359111	24.1121411	37.9581792	23.9521045	37.7100584	3.4							
15	65 14:46:13	1184.571544	23.8303232	37.7691799	24.0403229	28.1681711	24.1691521	38.0951116	23.9494135	38.3021551	3.4							
16	70 14:46:18	1152.545115	23.8320282	37.9917194	24.0002247	38.3182529	24.1681910	38.3781774	23.9479191	38.3242241	3.4							
17	75 14:46:23	1190.744212	23.8417144	38.1624241	23.9991547	38.1917319	24.1621214	38.7221241	23.9291952	38.4431171	3.4							
18	80 14:46:29	1171.637817	23.8471011	38.3161411	23.9791914	38.3171947	24.1691521	38.0791241	23.9277199	38.4444771	3.4							
19	85 14:46:32	1187.040077	23.8524259	38.5324242	23.9852161	38.5220951	24.1691519	38.3016144	23.9301191	38.9781912	3.4							
20	90 14:46:31	1184.072102	23.8492129	38.7106077	23.9819645	38.6191645	24.1641476	38.6216145	23.9291777	38.9010172	3.4							
21	95 14:46:43	1191.265152	23.8747144	38.8904277	23.9181011	38.3461071	24.1611421	38.7716145	23.9211582	38.9581497	3.4							
22	100 14:46:41	1192.330101	23.8894144	39.1611212	23.9181212	38.4601212	24.1611917	38.9791195	23.9201195	38.9521212	3.4							
23	105 14:46:43	1181.630141	23.8103101	38.2781341	23.9761952	40.1022024	24.1671355	40.1019222	23.9161102	38.4191421	3.4							
24	110 14:46:59	1195.624615	23.9232292	38.4912151	23.9616191	40.2294477	24.1972176	40.2352135	23.9024017	40.6200084	3.4							
25	115 14:47:02	1184.1962102	23.9169912	38.9781012	23.9637491	40.1662041	24.0161255	40.4961741	23.9092192	40.2023782	3.4							
26	120 14:47:01	1194.648124	23.9089982	39.7416149	23.9634249	40.4444722	24.0731355	40.1596141	23.9017992	40.7067814	3.4							
27	125 14:47:10	1192.792115	23.9052322	38.1023181	23.9561951	40.61021	24.0621235	40.7621957	23.9179427	41.0491957	3.4							

Abb. 10: Beispiel: Versuchsdaten

In den Spalten B-L sind die jeweiligen Daten aus dem Messprogramm. Die Spalte M beinhaltet die Werte aus den Idealraumberechnungen. Spalte N zeigt den Reglerstatus zum jeweiligen Zeitpunkt. Spalte O zeigt das Gewicht der Waage zum jeweiligen Zeitpunkt. In der Spalte Q findet man Bemerkungen/ Beobachtungen besonders zur Tropfenbildung im Raum.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>Versuchsbeschreibung</b>								
2	Filename	Düsenversuch-6							
3	Datum	20.01.2004							
4	Düse	Dalavan							
5	Regler	24.2°C							
6	Pumpe	34bar							
7	Venti	18,05 Hz							
8	Bilder	2529							
9									
10	Prallband	40mm							
11	Düsenposition	y							
12		20 mm vor Kante Prallband							
13	Heizlüfter	hinten							
14		dauerdn Stufe 10, o							
15		vorne							
16									
17	Bemerkung:	Grundsätzlicher gleicher Versuch wie Düsenversuch-5							
18		Ev. ist im oberen Bereich der Sensor träger							
19		Zu weiteren Untersuchungen wurde im nächsten Versuch die Düsen ausgetauscht (hinten<--> vorne)							
20		Es hat keine Regelung stattgefunden							
21									

Abb. 11: Beispiel: Versuchsbeschreibung

Auf dem Tabellenblatt Versuchsbeschreibungen findet man die wichtigsten Angaben zum Versuch.

	A	B	C	D	E	F
1	<b>Idealraumberechnungen</b>					
2						
3	Temperatur Anfang		23.99 °C			
4						
5	Dichte Sättigung		0.02175606	kg/m³		
6						
7	rel. Feuchte Anfang		0.35181396	dimensionslos		
8						
9	Dichte Dampf Anfang		0.00765408	kg/m³		
10						
11	Luftvolumen		126	m³		
12						
13	Dampfmasse Anfang		0.96441467	kg		
14						
15	Massendifferenz/ 5min		0.31	kg		
16						
17						
18	Sättigungsdichte	bei	24 °C		0.02177	kg/m³
19	Tabellenwert	bei	25 °C		0.02304	kg/m³
20		t=0	23.99 °C		0.02175606	kg/m³
21		t=1	23.90 °C		0.02164844	kg/m³
22		t=2	23.85 °C		0.0215803	kg/m³
23		t=3	23.87 °C		0.02160096	kg/m³
24		t=4	23.88 °C		0.02162158	kg/m³
25		t=5	23.97 °C		0.021727	kg/m³
26		t=6	24.16 °C		0.02197569	kg/m³
27		t=7	24.54 °C		0.02245494	kg/m³
28		t=8	0.00 °C		-0.00871	kg/m³
29		t=9	0.00 °C		-0.00871	kg/m³
30		t=10	0.00 °C		-0.00871	kg/m³

Abb. 12: Beispiel: Idealraumberechnungen

Auf dem letzten Blatt der Auswertung findet man die Berechnungen für den Idealraum. Wichtig ist, dass der Wert der Massendifferenz/ 5min von Hand berechnet und in das vorgesehene Feld eingegeben werden muss.



## 5 Resultate und Beobachtungen

Folgende Resultate und Beobachtungen sind mit den Zerstäuberdüsen erarbeitet worden.

Resultate aus  
Düsenver-  
suchen

### 5.1 Raumcharakterisierung

Mit Hilfe von drei Tauchsiedern ( $P_{\text{elektrisch}} = \text{je } 1000 \text{ Watt}$ ) wurde in der Mitte des Raumes direkt unterhalb des Prallbandauslasses Wasser bis zur Verdampfung erhitzt. Mittels einer Waage konnte die Gewichtsabnahme über die Zeit ermittelt werden und somit der Wassermassenstrom ermittelt werden.

Verdampfung  
mittels  
Tauchsieder

Durch die Erwärmung des Wassers wird automatisch Wärme in den Versuchsraum eingespielen. Der Anteil der Wärme der für die Verdampfung des Wassers gebraucht wird, beträgt somit ca. 75%. Die Verlustwärme hat eine Erwärmung des Raumes zur Folge. Der Versuchsraum müsste sich somit um ca.  $3,9^\circ \text{C/h}$  erwärmen. Tatsächlich hat sich der Versuchsraum stärker erwärmt, was sich durch die zusätzliche Wärmeabgabe von diversen Geräten wie PC, Ventilator oder auch vom Menschen erklärt. Zudem wurden die  $3,9^\circ \text{C}$  mit Hilfe einer durchschnittlichen Wärmekapazität gerechnet. Diese würde sich aber eigentlich mit steigender Temperatur und Feuchtigkeit ändern.

Temperatur-  
anstieg während  
des Versuches

Bei der Auswertung wurde der Anstieg der Temperatur mitberücksichtigt.

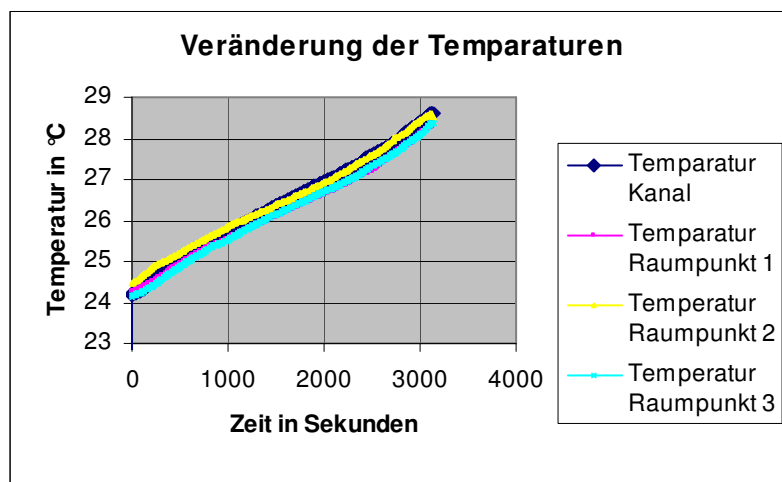


Abb. 13: Veränderung der Temperaturen während des Verdampfungsversuches

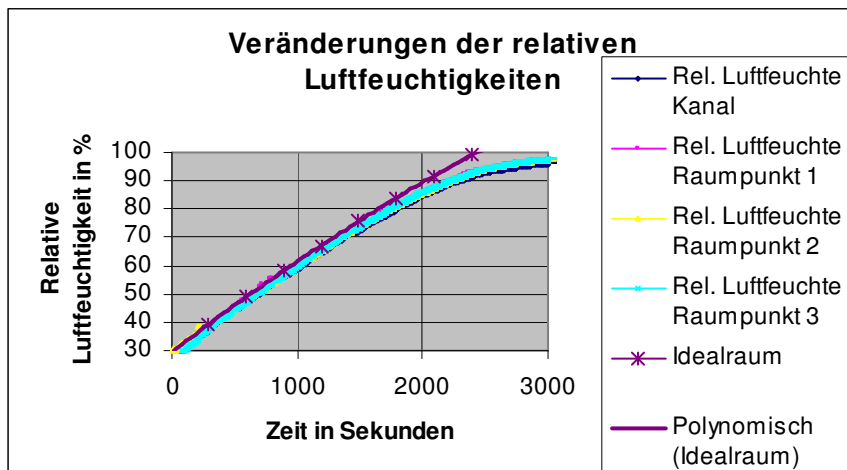


Abb. 14: Referenzmessung mittels Verdampfung

Gut zu beobachten ist, dass die Verteilung der Luft im Raum ziemlich gut verläuft. Dies sieht man daran, dass die Linien der relativen Luftfeuchtigkeiten an den verschiedenen Messpunkten gemessen sehr exakt aufeinander liegen. Bei ca. 70% beginnt das Auseinanderklaffen der Idealraumkurve und der Kurve mit den realen Luftfeuchtigkeiten, was bedeutet dass sich irgendwo im Raum Wasser ansammelt.

**Gute Verteilung  
der Luft im  
Raum**

## 5.2 Düsenvergleiche

### 5.2.1 Tropfengrössenmessungen

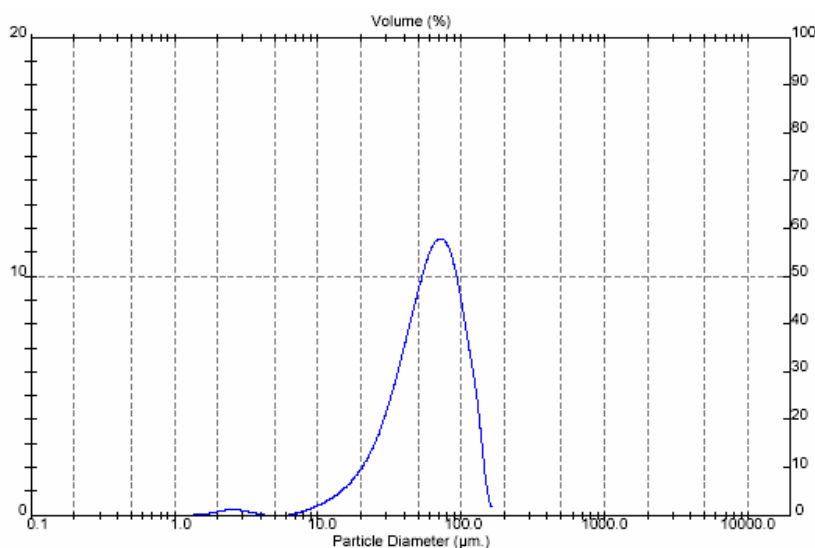


Abb. 15: Tropfengrössenspektrum der Stielow-Düse gemessen bei 1.8kg/h:  
 $d_{0.5/0.9} \rightarrow 62/110 \mu\text{m}$

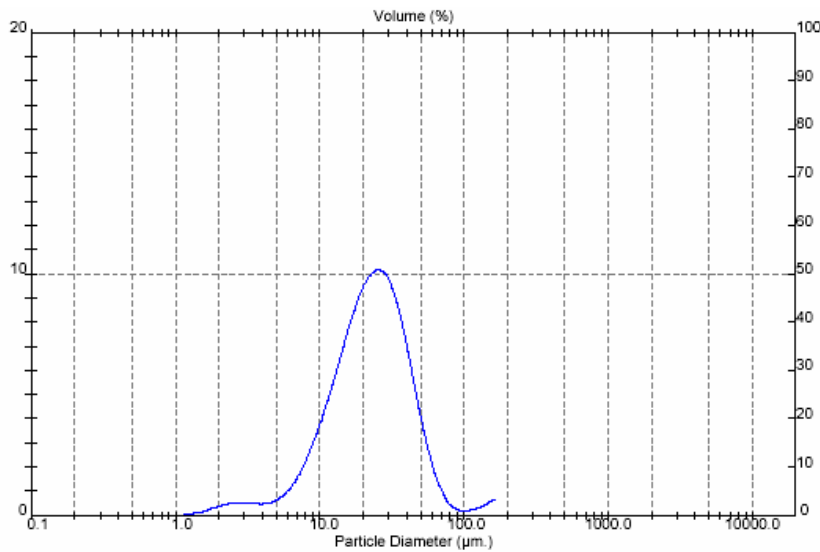


Abb. 16: Tropfengrössenspektrum der Delavan-Düse gemessen bei 1.8kg/h:  $d_{0.5}/d_{0.9} \rightarrow 23/47 \mu\text{m}$

Dieser markante Unterschied im Tropfengrössenspektrum ist auch sehr deutlich im Versuchsraum zu sehen. Nur schon von Auge kann die oberste Düse als schlecht beurteilt werden.

Bemerkung: Das Messgerät kann nur Tropfen bis zu einer Grösse von 180µm messen.

## 5.2.2 Befeuchtungsmessungen

Vergleicht man obige Düsen im Versuchsraum können ähnliche Unterschiede erkannt werden.

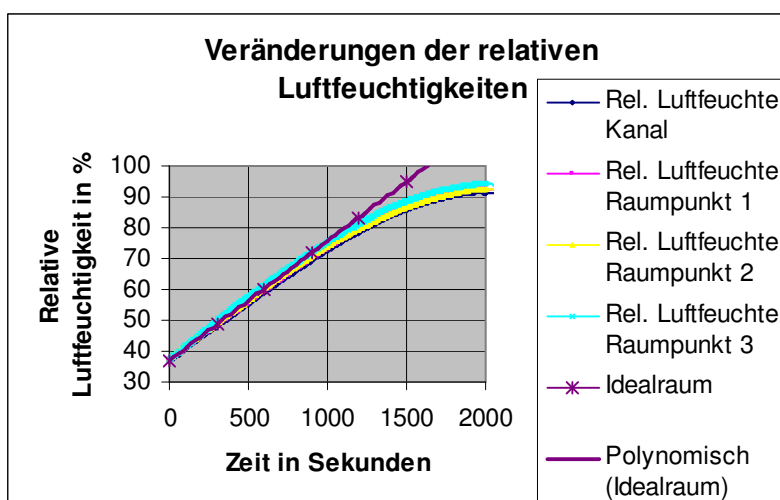


Abb. 17: Veränderungen der rel. Luftfeuchtigkeiten während eines Versuches mit der Stielow Düse.

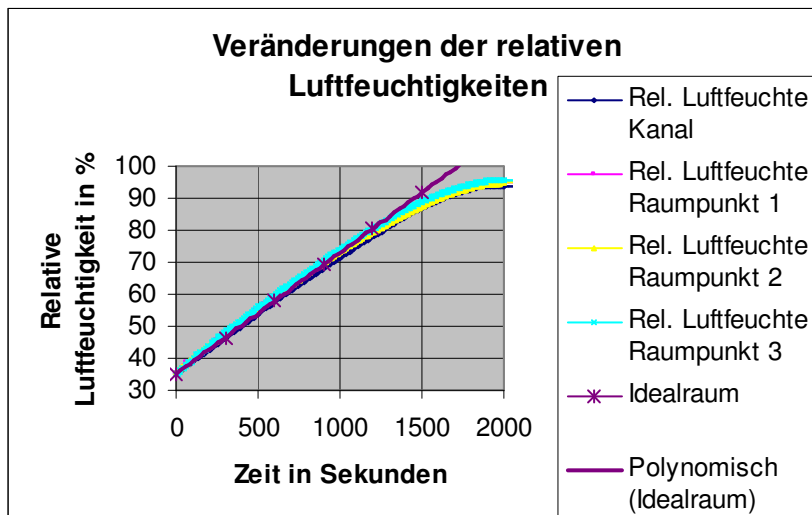


Abb. 18: Veränderungen der rel. Luftfeuchtigkeiten während eines Versuches mit der Delevan Düse.

Das Auseinanderklaffen der Kurven beginnt bei der Düse mit den grösseren Tropfen (Stielow-Düse) früher. Was bedeutet, dass die Verdunstung schlechter sein muss. Dieses Verhalten ist zu erwarten gewesen. Noch besser ist dieses Verhalten mit folgender Grafik zu sehen.

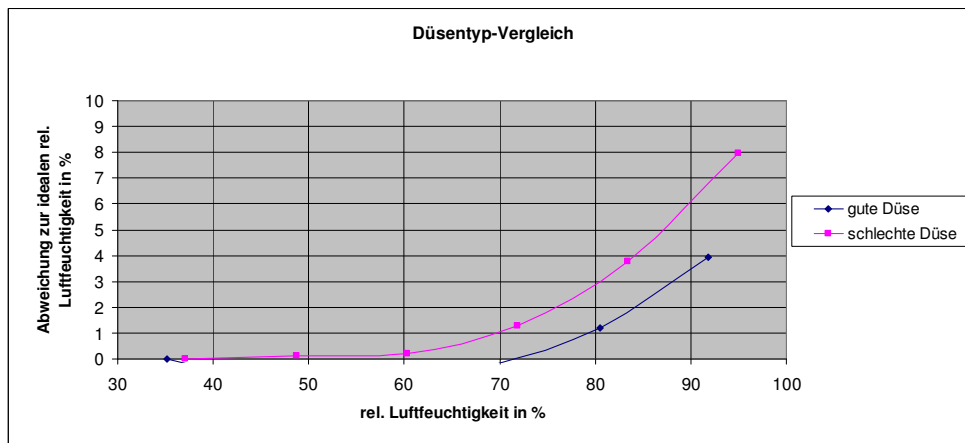


Abb. 19: Vergleich zweier Düsen und deren Abweichung von der Idealraumkurve. Die Idealraumkurve gibt die rel. Luftfeuchtigkeit bei optimaler Verdunstung im Versuchsraum an (das eingedüste Wasser verdunstet sofort).

Die hier ausgewählten Beispiele sind Extreme. Dementsprechend kleinere Qualitätsunterschiede von Düsen (Tropfenspektren) sind noch schlechter zu erkennen. Eine bessere Bewertung der Düse kann durch Auffangen von eventuell vorhandenen Tröpfchen mit der Kontrollfläche sein und durch Beobachtung des Tropfenverhaltens im Luftstrom.

**Unterschiede anhand der Diagramme schwierig zu erkennen**

Eine allfällige Verstopfung oder ein Funktionsfehler einer Düse kann relativ gut aus den Diagrammen entdeckt werden (Siehe Düsenversuch-8).

### 5.2.3 Sichtbarkeit von grossen Tropfen



Abb. 20: Sprühbild der Stielow Düse (ohne Zuluftstrom)

Auffällig sind hier die grossen Tropfen im Sprühbild. Im Vergleich dazu: Düse ohne auffällig grosse Tropfen.



Abb. 21: Sprühbild der Mee Düse (ohne Zuluftstrom)

Im Vergleich zur oberen Düse sind hier keinerlei grössere Tropfen erkennbar. Somit sind schlechte Düsen relativ rasch zu entdecken.

### 5.3 Einfluss der Düsenposition

Der Einfluss der Düsenposition auf das Verdunstungsverhalten im Versuchsraum ist gering. Es scheint als ob eine hohe Stellung der Düse eher eine ungünstigere Verdunstung bewirkt.

**Einfluss der  
Düsenhöhe  
gering**

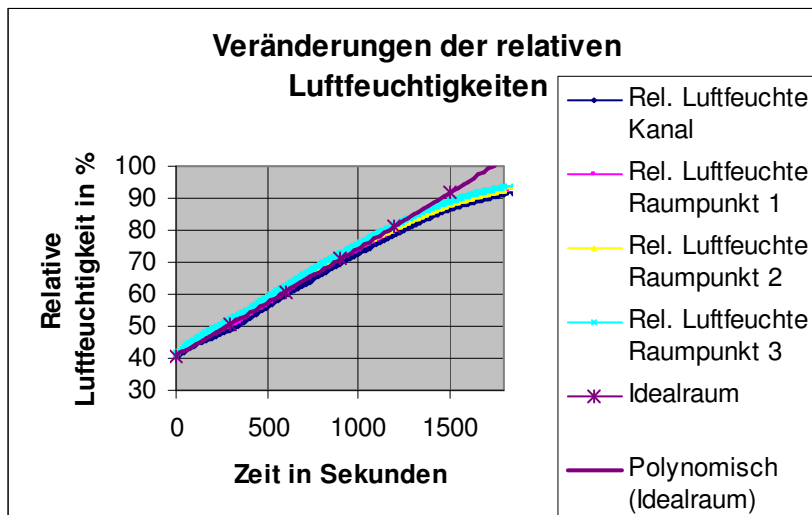


Abb. 22: Sehr tiefe Position der Düse (Düsenversuch-16)

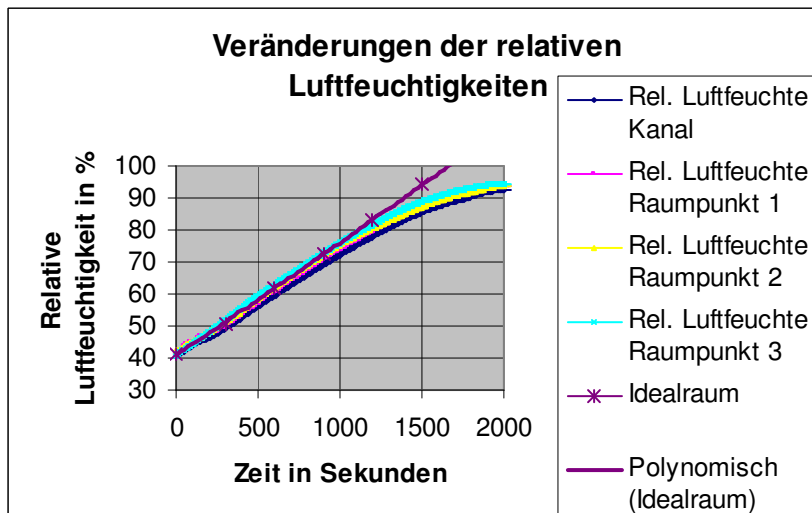


Abb. 23: Höchstmögliche Position der Düse (Düsenversuch-12)

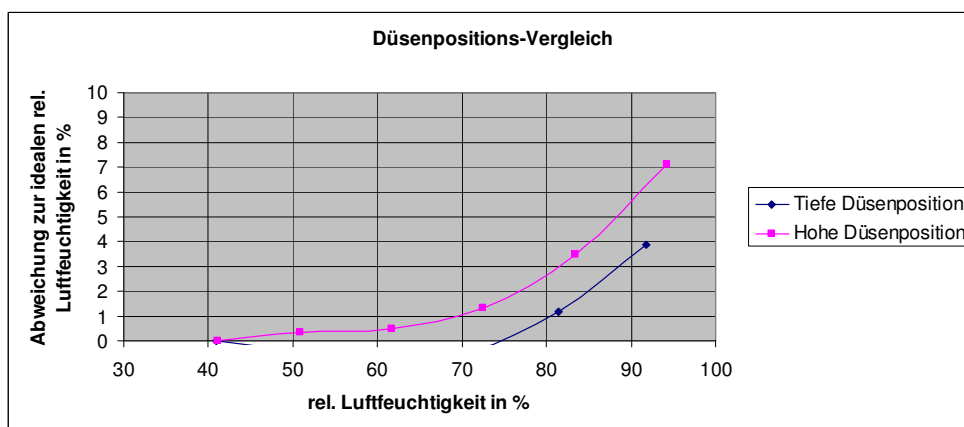


Abb. 24: Vergleich der Düsenposition und deren Abweichung von der Idealraumkurve.

## 5.4 Einfluss der Prallbandeinstellung

Bei grösserem Abstand der Prallbandbleche scheint die Verdunstung weniger optimal zu verlaufen. Das Gros der Tropfen erfährt eine geringere Beschleunigung in x-Richtung. Aus diesem Grund wird die Verdunstungsstrecke verkürzt.

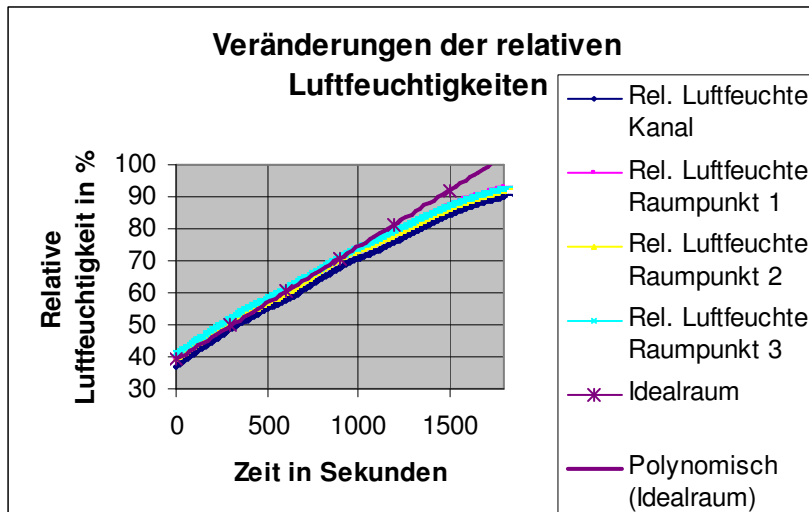


Abb. 25: Grösstmöglicher Abstand des Prallbandes (Düsenversuch-15)

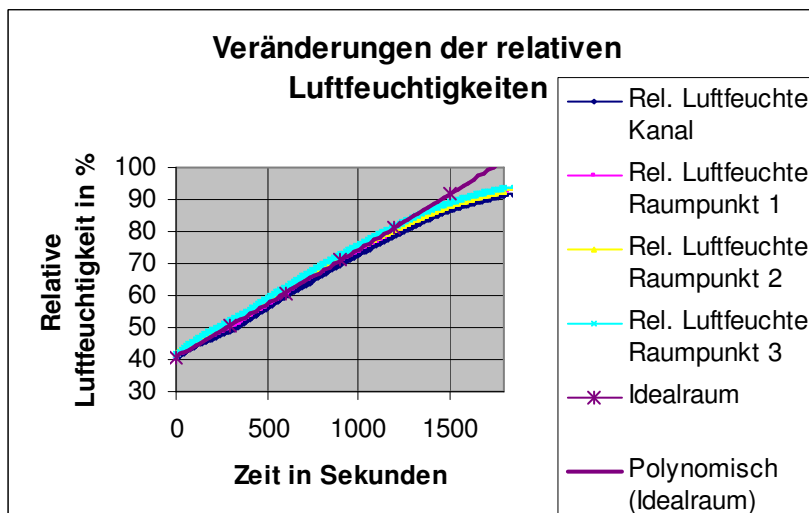


Abb. 26: Kleinstmöglicher Abstand des Prallbandes (Düsenversuch-16)

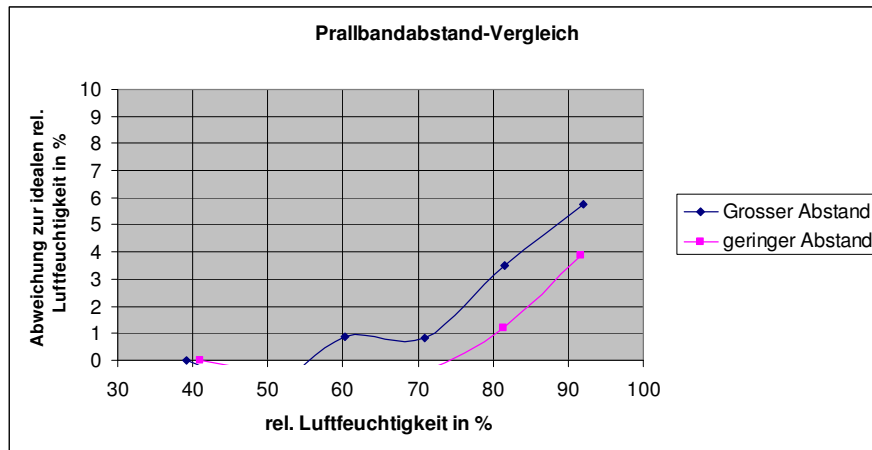


Abb. 27: Vergleich der Prallbandabstandes und deren Abweichung von der Idealraumkurve.

## 5.5 Feuchtigkeitsverteilung im Raum

Grundsätzlich sind Unterschiede in der Verteilung der Feuchtigkeit festgestellt worden. Jedoch muss bemerkt werden, dass nur mit vier Temperatur/Feuchtigkeitssensoren gearbeitet wurde, was zur mehrmaligen Wiederholung der Versuche in unterschiedlicher Sensoranordnung führte. Da die Regelung der Temperatur sehr rudimentär erfolgte, kann es bei den verschiedenen Versuchen zu Abweichungen kommen.

**Ungleichmässige Verteilung ist festgestellt worden**

Die festgestellten Unterschiede in der Feuchtigkeitsverteilung waren im Maximum ca. **8%**. Folgende Bilder zeigen die Resultate und die jeweilige Sensorposition.

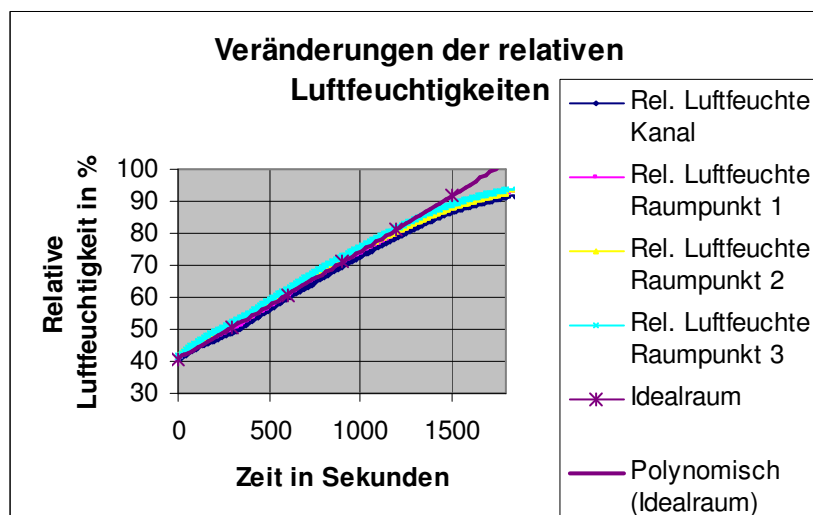


Abb. 28: Düsenversuch-16: Veränderung der Luftfeuchtigkeit. Für die Sensorposition siehe Abb. 2.



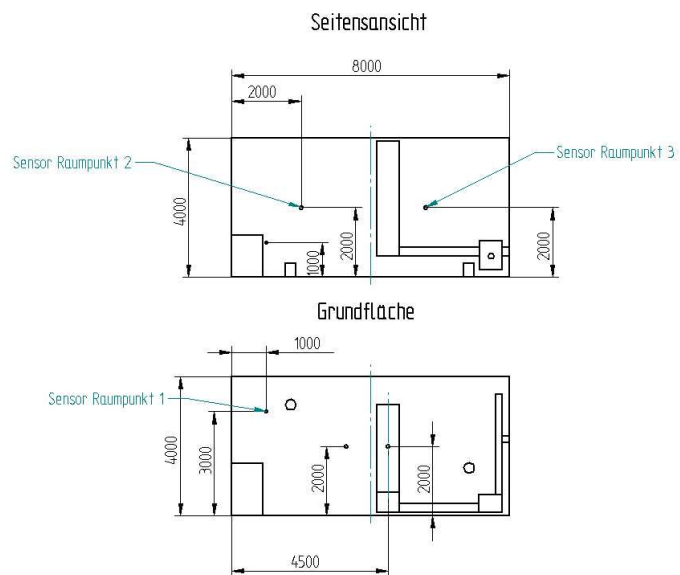


Abb. 29: Anordnung der Sensoren im Düsenversuch-17.

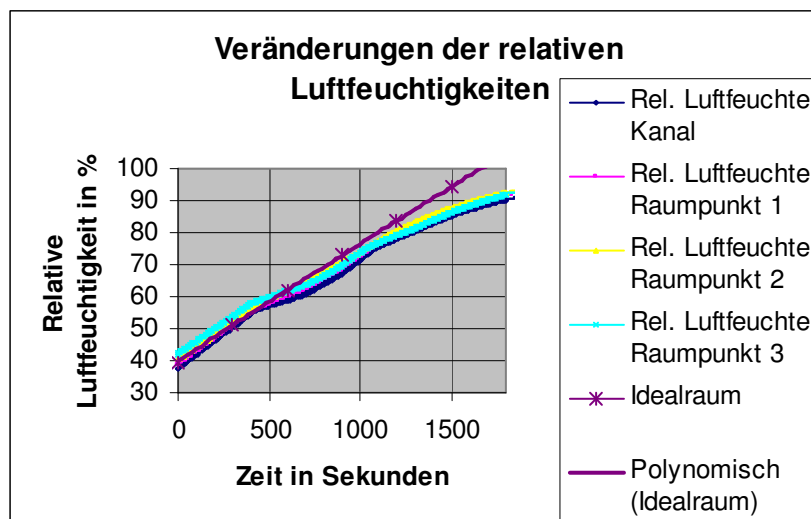


Abb. 30: Düsenversuch-17: Veränderungen der Luftfeuchtigkeiten

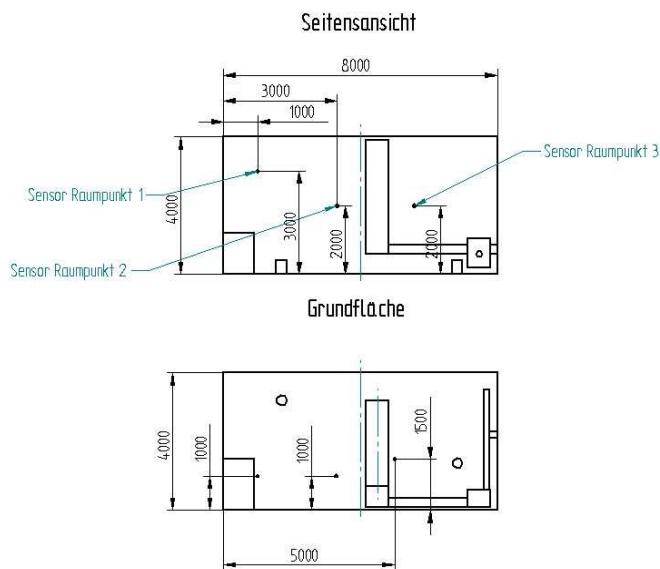


Abb. 31: Anordnung der Sensoren im Düsenversuch-18

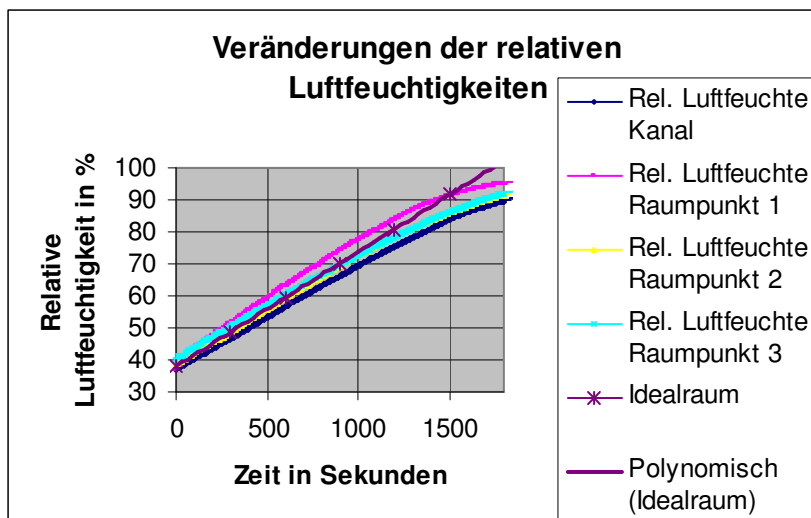


Abb. 32: Düsenversuch-18: Veränderungen der Luftfeuchtigkeiten

Bemerkung: Die Temperatur beim Raumpunkt 1 in Düsenversuch-18 ist ca. um 1 ° Celsius kälter als das Mittel an den anderen gemessenen Orten. Bei tiefer Temperatur (ausgelöst durch die örtliche Verdunstung) ist bei gleicher Wassermenge in der Luft die relative Luftfeuchtigkeit höher (siehe Mollier-Diagramm). Aus diesem Grund geht die Verteilung der Feuchtigkeit unmittelbar mit der Verteilung der Temperatur einher.

**Verteilung der Feuchtigkeit ist direkt abhängig von der Verteilung der Temperatur**

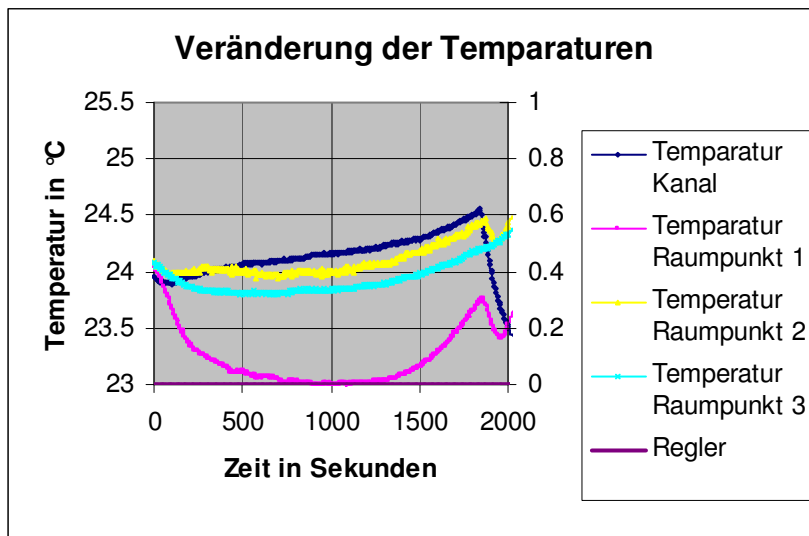


Abb. 33: Düsenversuch-18: Veränderungen der Temperaturen

Zusammenfassend einige Feststellungen über die Feuchtigkeitsverteilung:

- Nach Beobachtungen aus den Versuchen ist die Feuchtigkeitsverteilung überraschend gut. (Man bedenke die Versuche sind dynamisch und die Temperaturregelung, sowie die Wärmeeinspeisung ist nicht optimal)
- Tendenziell ist an den Enden des Versuchsraumes die Feuchtigkeit am höchsten.
- Die Feuchtigkeit unterhalb des Prallbandes ist etwa gleich wie die mittlere Feuchtigkeit im Raum.
- Dort wo die Tröpfchen sichtbar hinströmen ist die Feuchtigkeit gross.

## 5.6 Reproduzierbarkeit

Die Schwierigkeit der Reproduzierbarkeit liegt in der Konstanthaltung der Temperatur. Da kleine Temperaturänderungen einen grossen Einfluss auf den Wert der relativen Luftfeuchtigkeit haben, ist es schwierig Versuche exakt zu wiederholen. Trotzdem ist die Reproduzierbarkeit gut. Bei einem Versuch konnten Abweichungen festgestellt werden, die höchstwahrscheinlich durch Restwasser aus vorherigen Versuchen stammten.

**Reproduzierbarkeit ist zufriedenstellend**

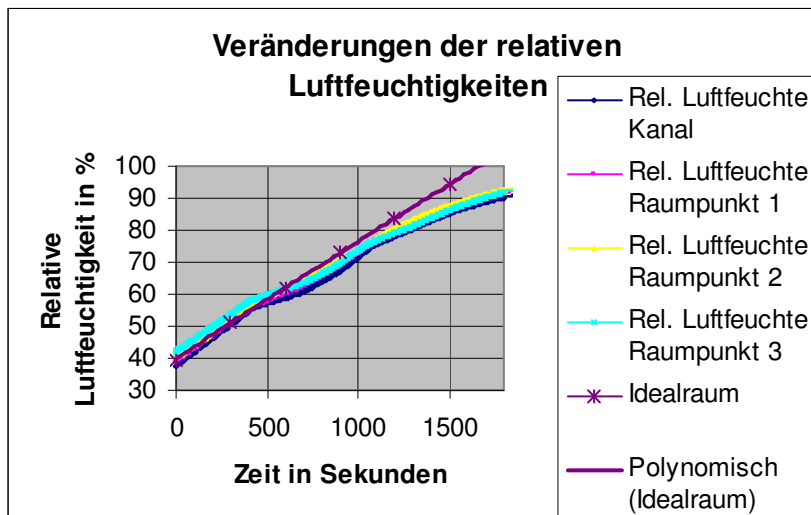


Abb. 34: Düsenversuch-17: Veränderungen der Luftfeuchtigkeiten.

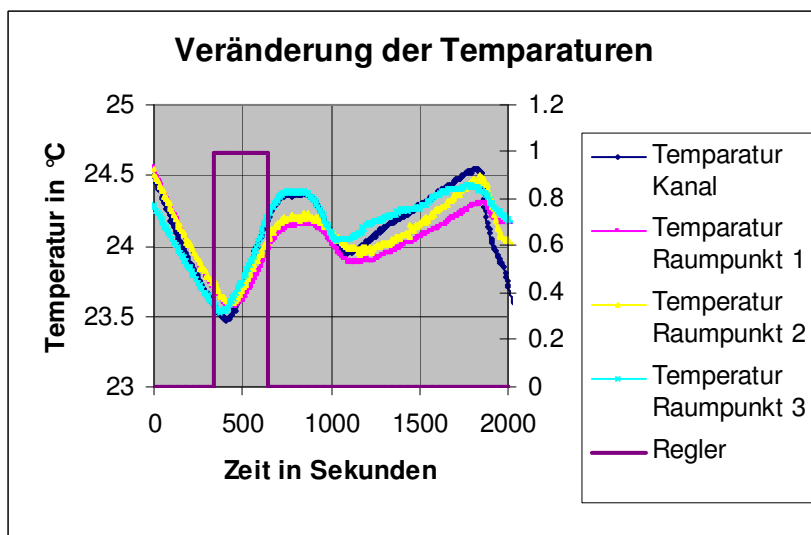


Abb. 35: Düsenversuch-17. Veränderung der Temperaturen

In diesem Versuch ist der Einfluss der Temperatur von weniger als 1° Celsius deutlich zu sehen. Zur Berechnung der Idealraumkurve ist jeweils das Mittel der Temperaturen aus den verschiedenen Raumpunkten berechnet worden. Eine genaue und exakte Regelung der Temperatur ist dementsprechend aufwendig.

Zu beobachten ist auch ein Temperaturanstieg am Ende der Versuche. Dieser Effekt ist bei jedem Versuch aufgetreten. Dies ist ein Indiz für eine schlechte Verdunstung (kein Bedarf von Verdunstungswärme).

**Temperaturanstieg am Ende der Versuche deutet auf geringe Verdunstung**

## 5.7 Tropfenverhalten im Versuchsraum

Grundsätzlich entstehen beim Zerstäuben von Flüssigkeiten immer Tropfen/ Tröpfchen. Die entscheidende Frage ist:

Auf welcher Höhe und bei welcher Luftfeuchtigkeit entstehen wie viele und wie grosse Tropfen und wie ist das Verhalten der Tropfen untereinander.

Die Höhe muss definiert werden. Bei welcher Luftfeuchtigkeit dies geschieht ist ein Resultat der vorliegenden Versuche. Wie viele und wie gross die Tropfen sind, kann man im Versuchsraum nicht ermitteln. Aus Beobachtungen kann jedoch das Verhalten der Tropfen gut beschrieben werden.

Die bestimmenden Faktoren für obige Frage sind:

- Qualität des Zerstäubungssystems
- Tropfenspektrum des Zerstäubungssystems
- Prinzip des Zerstäubungssystems
- Art der Oberfläche
- Verschmutzungsgrad der Oberfläche
- Position der Kontrollfläche in der xy-Ebene

Grundsätzlich stellt sich die Frage, auf welcher Höhe die Bildung von Tröpfchen untersucht werden soll. Im Versuchsraum wurden folgende Stellen untersucht:

**Definition der  
Kontrollflächen**

- Decke des Versuchsraumes und vorstehende Gegenstände wie Lampenabdeckungen usw.
- Boden
- Seitenwände
- Kontrollflächen bis zu einer max. Höhe von 2.5 Meter.

### 5.7.1 Tröpfchen in der Luftströmung

#### a) Prallband:

Die Strömungen am Prallband sind sehr turbulent und zudem komplex und schwierig zu visualisieren.

Tendenziell kann mit dem Abstand des Prallbandbleches die Wurfweite der Tröpfchen eingestellt werden.

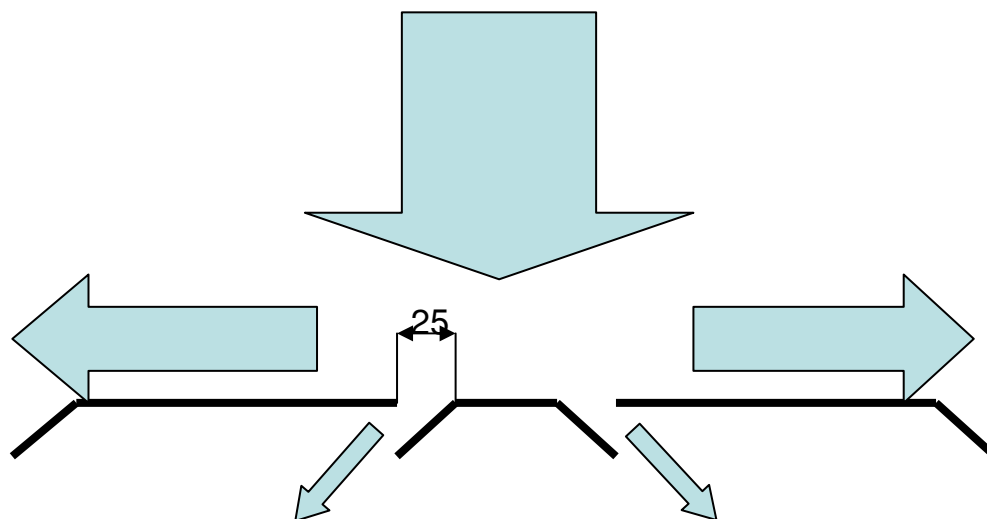


Abb. 36: Strömungsverhältnisse am Prallband bei kleinem Abstand der Prallbandbleche.

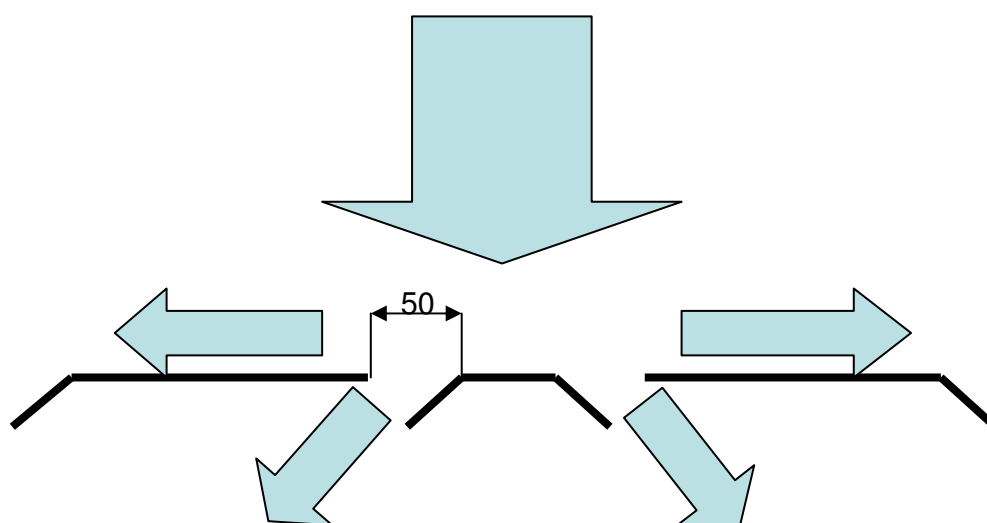


Abb. 37: Strömungsverhältnisse am Prallband bei grossem Abstand der Prallbandbleche.

Die Pfeile in Abb. 37 deuten die Strömungsgeschwindigkeiten und der Anteil der Luft an. Die Abstände der Prallbandbleche haben die folgenden Extreme 25 und 50mm.

Tendenziell kann mit der obersten Einstellung eine grosse Wurfweite erreicht werden. Die Tröpfchen sind somit zeitlich länger unterwegs und haben dementsprechend mehr Zeit um zu verdunsten. Zudem kann mit dieser Einstellung der Effekt der Rückströmung an der Düse reduziert werden.

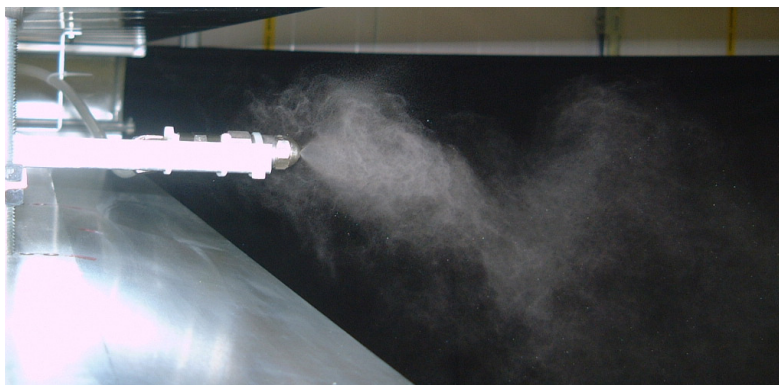
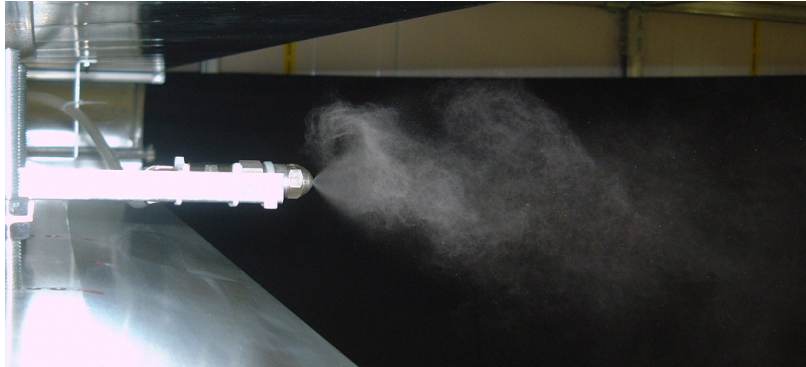
**Kleiner Abstand  
vergrössert  
Verdunstungs-  
strecke**

Mit maximalem Abstand der Prallbandbleche werden die Tröpfchen in horizontaler Richtung weniger stark mitgerissen. Somit fallen die Tröpfchen schneller zu Boden, was sich deutlich mit erhöhtem Auffangen von Tröpfchen auf der Kontrollfläche zeigt. Zudem sind die Tröpfchen auf der Haut spürbar.

**Grosser  
Abstand  
verkürzt  
Verdunstungs-  
strecke**

Die Verteilung der Feuchtigkeit ist mit Abstand 50mm tendenziell besser.

#### **b) Zerstäubungsdüsen:**



*Abb. 38: Diese drei aufeinander geschossenen Bilder zeigen wie stark die Luftströmung den Sprühnebel beeinflussen.*

#### **c) Luftströmung**

Durch visuelle Beobachtung der Tröpfchen im Raum sind Qualitätsunterschiede gut sichtbar. So sind zum Beispiel grössere Tropfen, die aus dem Sprühnebel herausfallen gut zu sehen. Auch die Häufigkeit

**Relativer  
Vergleich  
möglich**

von grösseren Tropfen ist zu sehen. Somit ist ein relativer Vergleich der Zerstäubungsqualität möglich.

### 5.7.2 Tröpfchen an umgebenden Wänden und Gegenständen

Obwohl der Tröpfchenstrom zum Teil direkt auf die vorstehende Lampenabdeckung gestossen ist, hat es zu keinem Zeitpunkt der Versuche Bildung von grösseren Tropfen gegeben. Nie hat es von Lampenabdeckungen heruntergetropft.

**Keine  
Tropfenbildung  
an hervorsteh-  
enden  
Abdeckungen**

Ist der Prallbandblechabstand klein eingestellt, stellt man eine grössere Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung fest. Dies bewirkt, dass die Tröpfchen aufgrund der kleinen Verhältnisse des Versuchsraumes an die hintere und vordere Wand geschlagen werden. Trotz dieses Verhaltens wurde zu keiner Zeit der Untersuchungen Laufrinnsale entdeckt, es wurden nicht einmal sichtbare Tropfen festgestellt.

**Keine  
Benetzung an  
Wänden**

Bei sehr hohen Luftfeuchtigkeiten ca. ab 90% ist zum Teil festgestellt worden, dass der Boden beschlagen hat.

An den Zuluftrohren der Raumlüftung sind bei jedem Versuch Kondensationsspuren aufgetaucht. Dies aus dem Grund, weil das Lüftungsrohr eine Wärmebrücke zur Aussenumgebung bildet. Die Oberflächentemperatur des Lüftungsrohres müsste zwischen 21 und 22 ° Celsius sein.

### 5.7.3 Tröpfchen auf der Kontrollfläche

Bei den besten Düsen, die gemessen wurden, schlagen sich bei ca. 60% Luftfeuchtigkeit die ersten feinen Tröpfchen auf 1,5m Höhe ab. Diese Tröpfchen sind jedoch so fein, dass sofort eine Nachverdunstung stattfindet. Diese ersten Tröpfchen verdunsten jedoch innerhalb von wenigen Sekunden. Die Anzahl neuer Tröpfchen und die Verdunstungsgeschwindigkeit halten sich in diesem Bereich die Waage.

**Erste Tropfen  
bei ca. 60% rel.  
LF.**

Erhöht man die Luftfeuchtigkeit über 60% sind immer mehr Tröpfchen sichtbar. Ständig kommen neue Tröpfchen hinzu, wobei die Verdunstung der einzelnen Tröpfchen immer etwa gleich schnell abläuft.

**Kontinuierliche  
Häufung von  
Tröpfchen auf  
der Oberfläche**

Bei ca. 75-80% liegen die Tröpfchen so dicht beieinander, dass sie sich verbinden können. Je nach Oberfläche beginnen sich die Tröpfchen früher oder später zu verbinden. Auf einer sauberen Oberfläche kann man auch noch bei 90% rel. Luftfeuchtigkeit einzelne Tröpfchen erkennen, wobei bei verschmutzter Oberfläche der Zusammenschluss der Tröpfchen schon bei ca. 75-80% beginnt. Diese 75-80% rel. Luftfeuchtigkeit ist als kritisch zu betrachten.

**Verschmutzung  
fördert  
Tropfenbildung**



## 5.8 Beurteilung der Messversuche bei LUWA

Die Auswertungen zeigen, dass es eher schwierig ist Einflüsse wie Prallbandabstand, Feuchtigkeitsverteilung und Düsenposition genau zu erarbeiten. Zusätzlich ist der Zeitpunkt bei der umgebende Oberflächen durch nicht verdunstete Tropfen nass werden oder Tropfenwurf stattfindet nicht genau festzulegen. Trotzdem konnten durch eingehende Beobachtungen während den Versuchen das Tropfenverhalten relativ genau beschrieben werden. Die Fragestellungen und Kriterien für den ersten Direktbefeuchtungsversuch konnte somit beantwortet resp. eingehalten werden.

Einflüsse der Parameter schwierig zu eruieren

### 5.8.1 Verbesserungsvorschläge für eventuelle weitere Versuche:

- Einsatz von mehr Sensoren (HTT II)
- Bessere Regelung der Temperatur
- Bessere Verteilung der Wärme im Raum
- Waage mit grösserer Auflösung (jetzt nur auf 20g genau)
- Einsatz von entkalktem Wasser

### 5.8.2 Einfluss der Temperatur auf die relative Luftfeuchtigkeit

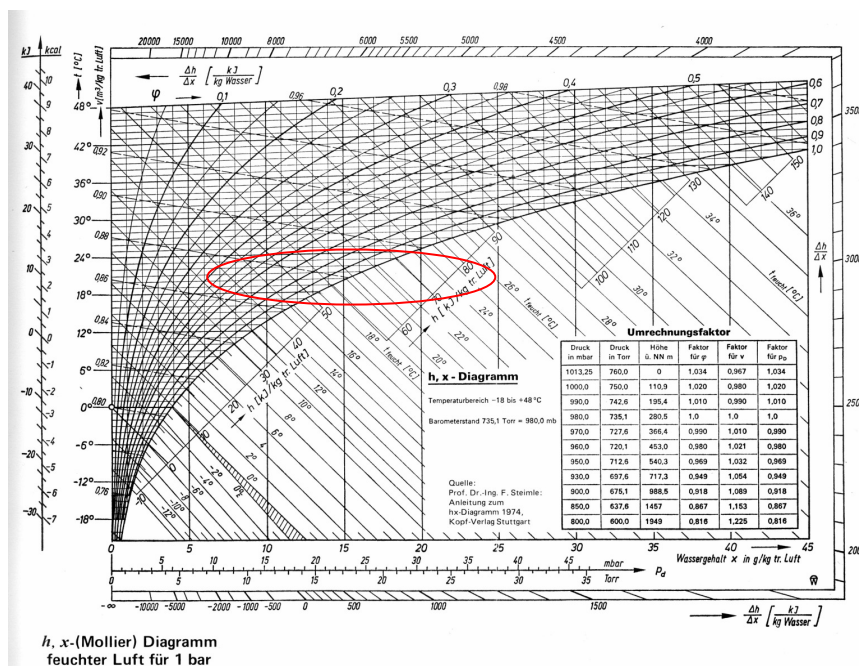


Abb. 39: Mollier-Diagramm

Obiges Diagramm zeigt den Wassergehalt der Luft bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten und Temperaturen. Man muss beachten dass die Kurve mit den rel. Luftfeuchtigkeiten mit steigender Temperatur immer flacher wird. Das heisst: lokale Temperaturunterschiede (verursacht z. B. durch Lüfter) können markante Unterschiede in der relativen Luftfeuchtigkeit ergeben. Ein Beispiel: Herrscht bei einer mittleren Raumfeuchtigkeit von 70% und 24° Celsius ein lokaler Temperaturunterschied von 1° C ergibt das an dieser Stelle eine relative Luftfeuchtigkeit von 65%.

**Temperaturunterschiede haben grossen Einfluss auf Feuchtigkeitswerte**

### 5.8.3 Dynamischer Prozess

Die Untersuchungen im Versuchsraum sind dynamischer Natur. Lokale Temperatur und Feuchtigkeitsunterschiede sind daher eher schwierig zu ermitteln.

### 5.8.4 Wäggenauigkeit

Der Wassermassenstrom wurde jeweils mit Hilfe der Massendifferenz einer Waage bestimmt. Die Genauigkeit der Bestimmung des Wassermassenstromes ist deshalb zeitabhängig.

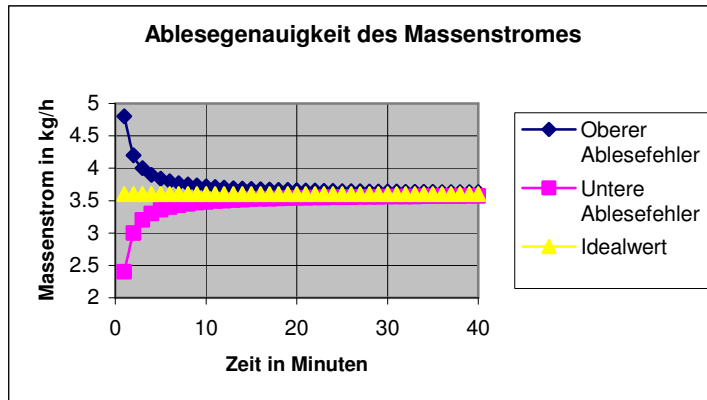


Abb. 40: Ablesefehler bei der Massenstrombestimmung

Abb. 40 zeigt wie gross der Fehler sein kann, wenn man aus der Massendifferenz den Wassermassenstrom bildet.

Nach 30 Minuten (angestrebte Versuchszeit) ist der Ablesefehler  $\pm 0.04$  kg/h. Bildet man den Wassermassenstrom bereits nach 10 Minuten könnte sich ein maximaler Fehler von  $\pm 0.12$  kg/h ergeben. Das heisst die Kontinuität des Wassermassenstromes kann somit nicht ermittelt werden. Eine Veränderung des Wassermassenstromes durch unterschiedliche Wasserniveaus oder Drücke (Pulsationen) konnte nicht ermittelt werden.

**Kontinuität des Massenstromes konnte nicht bestimmt werden**

## 5.9 Zusammenfassung der Resultate und Beobachtungen

- Es gibt sicht- und messbare Unterschiede zwischen Düsen verschiedener Hersteller.
- Der Zusammenschluss von nicht verdunsteten Tröpfchen ist von der Art und dem Verschmutzungsgrad der Oberfläche abhängig. Dreck und ölige Oberflächen benetzen stärker.
- Bei ca. 65-70% relativer Luftfeuchtigkeit weichen die Idealraumkurve und die reale Kurve voneinander ab.
- Bei ca. 75-80% relativer Luftfeuchtigkeit beginnen sich nicht verdunstete Tröpfchen zu grösseren Tropfen zusammenzuschliessen.
- Anhand der Auswertediagrammen ist es eher schwierig Rückschlüsse auf die Qualität der Befeuchtung zu ziehen.
- Das Tropfenverhalten kann von Auge gut beobachtet werden. Düsen mit schlechtem Tropfenspektrum können sogar visuell ausgesondert werden.
- Die Montagehöhe der Düse auf dem Prallband hat wenig Einfluss auf die Befeuchtung.
- Bei grossem Abstand der Prallbandbleche wird die Verdunstungsstrecke verkürzt. Die Tröpfchen fallen durch verminderte horizontale Strömung schneller nach unten.
- Die gemessene Verteilung der relativen Feuchtigkeit im Versuchsraum war im Maximum 8%. Ursache der Abweichung ist unter anderem auch die örtliche Abweichung der Temperatur.
- Die Reproduzierbarkeit der Temperatur ist schwierig zu realisieren. Da die Temperatur ein bestimmender Faktor für die relative Luftfeuchtigkeit ist, ist ein exakter Vergleich verschiedener Versuche schwierig.
- Ein Temperaturanstieg bei hohen Luftfeuchtigkeiten ist ein Indiz für die sinkende Verdunstungsleistung.
- Kleine Temperaturunterschiede haben einen grossen Einfluss auf den Wert der relativen Feuchtigkeit.

Werden die Düsen korrekt montiert und betrieben, ist es grundsätzlich möglich, ein Direktbefeuchtungssystem in Kombination mit dem Luwa-Prallbandauslass so zu betreiben, dass die an das System gestellten Anforderungen erfüllt werden. Die erwarteten Betriebskosten- und Energie-Einsparungen sollten erreicht werden können.

## Definition der kritischen Luftfeuchtigkeit:

Die kritische relative Luftfeuchtigkeit wird definiert als diejenige Luftfeuchtigkeit bei der sich nach einer vertikalen Verdunstungsstrecke von zwei Metern auf einer Oberfläche nicht verdunstete Tröpfchen zu grösseren Tropfen zusammenschliessen.

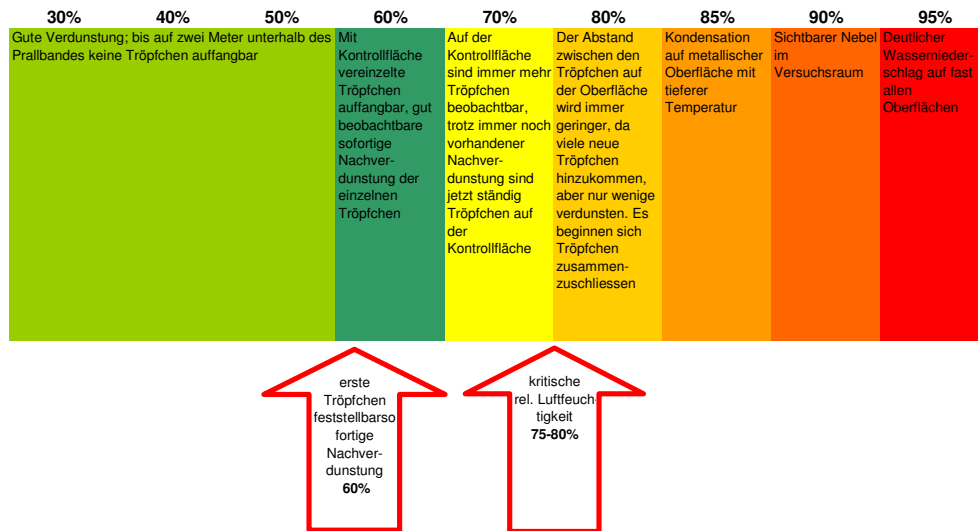


Abb. 41: Resultat aus den visuellen Beobachtungen im Versuchsraum.

Düsen Nr.	1	2	3	4	5 (Luwa Nr. 9)	6 (Luwa Nr.10)	7 (Luwa Nr. 11)	8 (Luwa Nr. 3)
Bezeichnung	airless 5.4	Nebeldüsen Modell 121	HAGO- Düse 0.3-80° H-DFN Nickelsilver	TP400004-TC	TF 100CVBS	TF 400CVF	MM50AD	Swirl Jet 10
Prinzip		Hohlkegeldüse		Flachstrahldüse				
Hersteller	Stielow	Schlick	Delavan	SSCO	True Fog USA	True Fog USA	True Fog USA	Mee USA
Durchlass (mm)	0.1	0.1	0.3	0.13				
Kosten SFr. /Stk.	450	112	48	62				
Literleistung (l/h)	4	1.86	1	3.6	2.3	2.3	2.3	1.7
Druck (bar)	40	30	3	50	30	30	30	30
Tropfengrösse (Mikrometer); Angaben vom Hersteller	unter 10	22	20 (bei 3bar)	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben
Druck (bar)	41	12.5	34	25	25	20	21	35
Literleistung (l/h)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Tropfengrösse (Mikrometer); gemessen d0,5/0,9	62/117	keine Messung	27/51	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung	42/87
Besonderes	Rubin bestückt, doppelte Standzeit,			40° Sprühwinkel, Hartmetalleinsatz, Farbsprühdüse				
Beurteilung	schlechteste Düse, deutlich sichtbare grosse Tropfen, gemessenes Tropfenspektrum ist deutlich höher als bei den anderen	Gute Zerstäubung, relativ grosswinkliger Zerstäubungswinkel, Gefahr von Benetzung ist vorhanden	Sehr gute Düse, gute Verdunstung, gutes Tropfengrössenspektrum, vereinzelt fallen Tröpfchen aus dem Sprühnebel	flacher Strahl, somit keine Benetzungsgefahr, eine Düse weist eine deutliche Asymmetrie des Strahles auf (Qualität!), sicht-und spürbare grössere Tröpfchen	gute Zerstäubung, am Anfang keine Tröpfchen auffangbar	Sehr gute Zerstäubung, keinerlei grössere Tröpfchen erkennbar, gute Resultate im Versuchslabor, späte Bildung von Tröpfchen	Gute Zerstäubung, ungefähr gleiches Verhalten wie Düse Nr. 5	Gute Zerstäubung, obwohl gemssenes Tropfenspektrum deutlich höher als z. B bei Delavan Düse,

Tab. 1: Beurteilung der für die Versuche verwendeten Zerstäuberdüsen.

Der Farbencode in der Düsentabelle zeigt die Eignung der getesteten Düsen für den Einsatz in einem Direktbefeuchtungssystem. Wobei Rot für „nicht geeignet“ und Dunkelgrün für „sehr gut geeignet“ steht.

## 6 Systemeigenschaften

### 6.1 Regelbarkeit

In der ersten Versuchsreihe wurde im Versuchsraum die rel. Luftfeuchtigkeit kontinuierlich erhöht. Im realen Fall wird die Luftfeuchtigkeit auf einem bestimmten Niveau reguliert. Die Regelbarkeit der Zerstäubungssysteme ist deshalb wichtig.

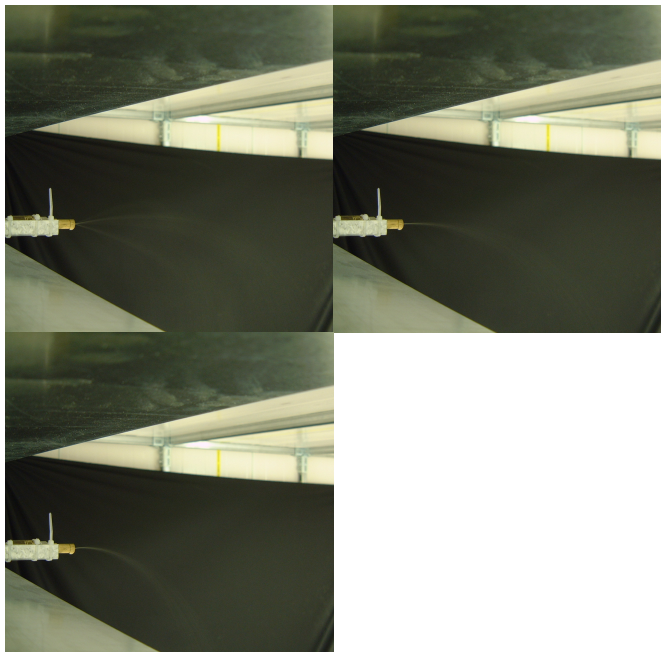
**Eine Regelung der Befeuchtung ist notwendig**

Die Regelung kann auf zwei Arten erfolgen:

- On-Off Regelung
- Regelung des Wassermassenstromes

Die Zerstäubungsdüse neigt dazu bei Druckverlust zu tropfen, wie folgende Bilder zeigen. Für eine On-Off Regelung wäre dies sicherlich unbrauchbar.

**Bildung von grossen Tropfen beim Ausschalten**



*Abb. 42: Verhalten der Düsen beim Ausschalvorgang*

Abb. 42 zeigt das Verhalten der Düse beim Ausschalten der Pumpe. Beim Ausschalten der Pumpe verändert sich der Druck langsam, was zu dieser Grosstropfenbildung neigt.

Die Regelung des Wassermassenstromes hat eine Veränderung des Druckes zur Folge. Inwieweit sich die Tropfengrösse bei unterschiedlichen Drücken verändert ist düsenabhängig. Grundsätzlich wird aber die Tropfengrösse bei kleinerem Druck grösser.

**Grössere  
Tropfen bei  
geringerem  
Massenstrom  
resp. Druck**

Die Auswirkungen von mechanischen Systemen, welche eine schnelle Druckveränderung ermöglichen (wie z.B. Rückschlagventile direkt bei der Düse), auf das Nachtropfen, sind nicht untersucht worden.

## 6.2 Lebensdauer

Zerstäubungsdüsen erfahren einerseits eine Abnutzung der mechanisch beanspruchten Teile (Erosion), andererseits kann es zu Verstopfungen kommen, die sich negativ auf die Qualität der Zerstäubung auswirken. Die Verwendung von entkalktem weichem Wasser ist deshalb zu empfehlen.

**Erosion und  
Verstopfungen  
bestimmen  
Lebensdauer**

## 6.3 Vor- und Nachteile von Einstoffdüsen

<b>Einstoffdüse</b>
+ Kostengünstig
- Standardprodukt
+ Rein mechanisch, keine elektrischen Komponenten
- Enger Sprühkegel (Feuchtigkeitsverteilung)
- Wasserzufuhr mit Druck
+ Lärmemission klein
- Tropfenbildung bei Ausschaltvorgängen (Nachtropfen)
- Weniger Wassermassenstrom (weniger Druck) gibt grössere Tropfen
+ Keine Benetzungsgefahr
+ Technisch ausgereift
- Ausfallüberwachung aufwendig

Tab. 2: Vor- und Nachteile von Einstoff Zerstäubungsdüsen

## 6.4 Kostenvergleich

<b>ANLAGEKOSTEN</b>	
<b>Konventionelle Raumbefeuchtung</b>	
Befeuchtungs- und Filteranlage mit 100'000 m3/h	197'000.--
<b>Raumbefeuchtung mit Düsensystem und Befeuchtungs- und Filteranlage mit Wascher</b>	
Befeuchtungs- und Filteranlage mit 50'000 m3/h	137'000.--
Düsensystem AMCO	40'000.--
Wasseraufbereitung	18'000.--
Total	<b>195'000.--</b>
<b>Raumbefeuchtung mit Düsensystem und Lüftungs- und Filteranlage ohne Wascher</b>	
Lüftungs- und Filteranlage mit 50'000 m3/h	112'000.--
Düsensystem AMCO	70'000.--
Wasseraufbereitung	35'000.--
Total	<b>217'000.--</b>

<b>BETRIEBSKOSTEN (siehe auch Kap. 6.5)</b>	
Grundlagen: 48 Wochen/a, 7 Tage/ Woche, Total 8064 h/a Strompreis CHF 0.12 CHF/kWh, Wasserpreis CHF 4.50/m3, inkl. Abwasser, Osmose-Wasser (Aufbereitungskosten) 7.5 CHF/m3	
Konventionelle Raumbefeuchtung	89'583.--
Raumbefeuchtung mit Düsensystem und Wascher	58'581.--
Raumbefeuchtung mit Düsensystem ohne Wascher	60'577.--



## 6.5 Systemvergleich bezüglich Energie- und Wasserverbrauch

Grundlagen:

Konventionelle Raumbefeuchtung mit Befeuchtungs- und Filteranlage berechnet für 100'000 m<sup>3</sup>/h (Investitionskosten: für Neuanlage CHF 197'000.--)

48 Wochen/Jahr Betrieb., 7 Tage/Woche, Total 8064 Betriebsstunden/Jahr  
Strompreis CHF 0.12 / kWh, Wasserpreis CHF 4.50 / m<sup>3</sup>, inkl. Abwasser  
Osmose-Wasser (Aufbereitungskosten) CHF 7.50 / m<sup>3</sup>

Für die Raumbefeuchtung mit Düsensystem wurde angenommen, dass sie im Vergleich zur konventionellen Raumbefeuchtung mit halber Luftmenge betrieben wird.

	Einheit	Konventionelle Raumbefeuchtung	Raumbefeuchtung mit Düsensystem und Lüftungs- und Filteranlage <b>mit</b> Wascher	Raumbefeuchtung mit Düsensystem und Lüftungs- und Filteranlage <b>ohne</b> Wascher
Antriebsleistung (Ventilator, Wasserpumpe)	[kW]	57	34	31
<b>Jährlicher Energieverbrauch</b>	<b>[MWh]</b>	<b>456</b>	<b>270</b>	<b>247</b>
Energiekosten	[CHF/a]	54'674	32'417	29'611
Wasserverbrauch Wascher	[l/h]	962	481	
Wasserverbrauch Düse	[l/h]		90	320
<b>Jährlicher Wasserverbrauch</b>	<b>[m<sup>3</sup>/a]</b>	<b>7'758</b>	<b>4'605</b>	<b>2'580</b>
Wasserkosten	[CHF/a]	34'909	20'720	11'612
Kosten Osmose-Aufbereitung von Düsenwasser	[CHF/a]	0	5'443	19'354
<b>TOTAL Kosten/a</b>	<b>[CHF/a]</b>	<b>89'583</b>	<b>58'581</b>	<b>60'577</b>

## Energieeinsparpotential

Der Markt weltweit für TLT-Anlagen	400 Mio CHF/a
Bei einer Lebensdauer von 15 a ergibt dies	6 Mia CHF (Neuwert aller TLT-Anlagen weltweit)
Bei Kosten von 200 kCHF/100'000 m <sup>3</sup> /h Luft und einer Einsetzbarkeit bei 30 % aller TLT-Anlagen ergibt sich ein Energieeinsparpotential von	1.5 TWh/a (elektrisch)
oder	210 MW Dauerleistung weltweit
Bezogen auf die Schweiz ergibt das etwa	2.8 GWh/a
oder (in der Schweiz ist die Textilindustrie nur noch schwach vertreten)	345kW Dauerleistung

## 6.6 Eigenschaftsbewertung der Einstoffdüsen im Direktbefeuchtungssystem

Kriterium	Düse
30% reduzierte Betriebskosten gegenüber heute, bei gleichbleibenden Investitionskosten	gegeben
Nicht tropfend	kritisch, durch konstruktive Massnahmen zu verringern
Wenig Unterhalt (max. 1mal jährlich), zuverlässig	kritisch (Verschleiss, Verstopfen)
Homogene Feuchteverteilung	gut
gute Regelbarkeit	kritisch (on/off, Nachtropfen), durch konstruktive Massnahmen zu verringern
Zonierung möglich	gegeben
„Als Innovation verkaufbar“	schwieriger
Schwierig kopierbar	kritisch

Tab. 3: Bewertung der Einstoffdüsen nach den formulierten Zielen.

## 7 Empfehlungen/ weiteres Vorgehen

In einer ersten Runde muss aus den gesammelten Daten und Beobachtungen der Entscheid gefällt werden, ob sich das Direktbefeuchtungssystem für den Einsatz in der Textilindustrie eignet oder nicht. Wie kritisch die Tropfenbildung für den Einsatz in der Textilindustrie ist, muss von erfahrenen Mitarbeitern der LUWA beurteilt werden.

**Entscheid über  
Eignung der  
Direktbe-  
feuchtung**

Um Aussagen über die Eignung eines Direktbefeuchtungssystems bei realeren Bedingungen machen zu können, müssen Versuche bei konstanter Luftfeuchtigkeit gemacht werden. Dazu bedarf es einer Regelung der Zerstäuberdüsen. Dabei muss das Problem der Tropfenbildung bei Ausschaltvorgängen gelöst werden.

**Versuche bei  
konstanter  
Luftfeuchtigkeit**

Ist der Bedarf an genaueren Untersuchungen der Direktbefeuchtung vorhanden, wird empfohlen die Versuchseinrichtung zu verbessern und aufzubauen.

**Verbesserung  
der Versuchs-  
einrichtung**

## 8 Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung gilt ein spezieller Dank dem BFE, welches es erst ermöglicht hat dieses Projekt zu realisieren.

## **A1. Anhang1**

### **A1.1. Konzept für den Direktbefeuchtungsversuch**

#### **A1.1.1 Zielsetzung**

Es sollen repräsentative Versuche mit verschiedenen Düsensystemen durchgeführt werden, um die verschiedenen auf dem Markt erhältlichen Düsentypen auf Ihre Eignung für den Einsatz in einem Direktbefeuchtungssystem zu prüfen.

Diese Düsen werden im Bereich eines Luwa-Prallbandauslasses möglichst optimal angeordnet. Die Anordnung dürfte düsenspezifisch sein und wird in Vorversuchen ermittelt.

#### **Kriterium für die Vorversuche:**

Eine möglichst gute Verteilung des Wassernebels im Zuluftstrahl, ohne dass umgebende Flächen direkt nass werden.
--

#### **Kriterium für die erste Versuchsserie:**

Ab welcher Raum- und Zuluftfeuchte beginnen umgebende Oberflächen durch nicht verdunstete Tropfen nass zu werden oder findet Tropfenwurf statt.
---

### A1.1.2 Versuchsaufbau

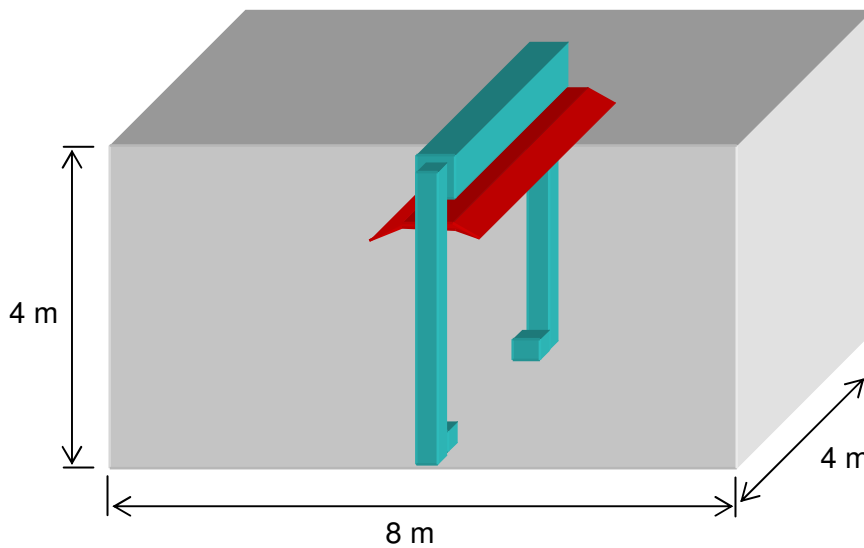


Abb. 43: Abmessungen des Versuchs-Raumes und grobe Einbausituation des Prallbandluftauslasses.

Für die Versuche soll ein Raum gemäss Abb. 43 mit einem Prallbandluftauslass ausgerüstet werden.

#### a) Zusammenstellung des benötigten Materials

Bezeichnung	Anforderung/Beschrieb	Pendenzen/Zuständigkeit
1. Raum	<p>Abmessungen: 8×4×4m (l×b×h)</p> <p>Luwa-Panelsystem inkl. Bodenisolation und einer Türe. Aufgebaut wird der Versuch im heutigen TLT-Labor</p> <p>Variante: Mit isolierenden Plastikbahnen luftdicht abgeschlossen gegenüber Umgebung</p> <p>Innere Oberfläche sollte nirgends 24 °C unterschreiten (Kondensation), Boden muss eventuell aufgeständert werden (Lenzlinger?)</p> <p>Umgebung: beheizter Raum (22 °C)</p>	<p><b>Luwa:</b> Abklären zu Luwa-Panelsystem: Kosten, Dicke, Ecklösung (Wärmebrücken!), Termin/Lieferfrist</p>
2. Lüftungssystem	<p>Reines Umluftsystem, 15 Luftwechsel/h</p> <p>1 Prallbandluftauslass (Stützengrösse: 1025×225 mm, Luftbelastung 1900 m<sup>3</sup>/h)</p> <p>Volumenstrommessstrecke 1500-2500 m<sup>3</sup>/h - Ventilator(mit FU) - Verbindung zu Deckenauslass - Prallbandauslass. Im Versuch wird mit Umluft gefahren, Luft sollte am Boden in der</p>	<p><b>Luwa:</b> Material ausser Leitungen und Auslass sollten vorhanden sein und muss nur zusammengestellt werden. Wer beschafft das Material und übernimmt Systemzusammenbau?</p>

	Mitte des Raumes erfasst werden. Zur schnellen Lüfterneuerung ist eine Umschaltmöglichkeit Umluft/Aussenluft vorzusehen.	
3. Direktbefeuchtung	<p>Druck: 0 - 100 bar, Wassermenge: 3-4l/h</p> <p>Leitungen Stahl, Kupfer, Kunststoff (für tiefe Drücke)</p> <p>Pumpe mit Druckregler ist vorhanden</p>	<p><b>Luwa:</b> Kann Pumpe mit nur 3-4 l/h betrieben werden?</p>
4. Messtechnik	<p>Gerät zur Messung des Wassermassenstrom: Mechanische Waage ist vorhanden</p> <p>4 Luftfeuchte/Temperaturmessgeräte (30-95% r.F.) sind vorhanden</p> <p>Datalogger und Anemometer sind vorhanden</p>	<p><b>awtec:</b> klärt Kosten für eine elektronische, dataloggertaugliche Variante ab.</p> <p><b>Luwa:</b> Ansprechpartner für Messgeräte: Hr. Röschli Programmierung Datalogger: Hr. Dennler</p>
5. Elektroheizung	4 kW Elektroheizung (Heizlüfter) zur Kompensation der Verdunstungskälte	<p><b>Luwa:</b> Ansprechpartner für Regler: Hr. Röschli</p>
6. Dampfbefeuchter	Dampfbefeuchter zur Charakterisierung des Systems. Verdunstungsleistung: 3-4 kg Wasser/h	<p><b>awtec:</b> evaluiert Lösungsvarianten (Axair oder Haushaltsluftbefeuchter).</p>
7. Weiteres Hilfsmaterial	<p>Rollgestell oder ähnliches für die Montage der verschiedenen Düsensysteme</p> <p>Rauchgenerator zur Visualisierung der Raumluftrichtung</p>	<p><b>Luwa:</b> Ansprechpartner für Rauchgenerator: Röschli</p>

## b) Prozessschema

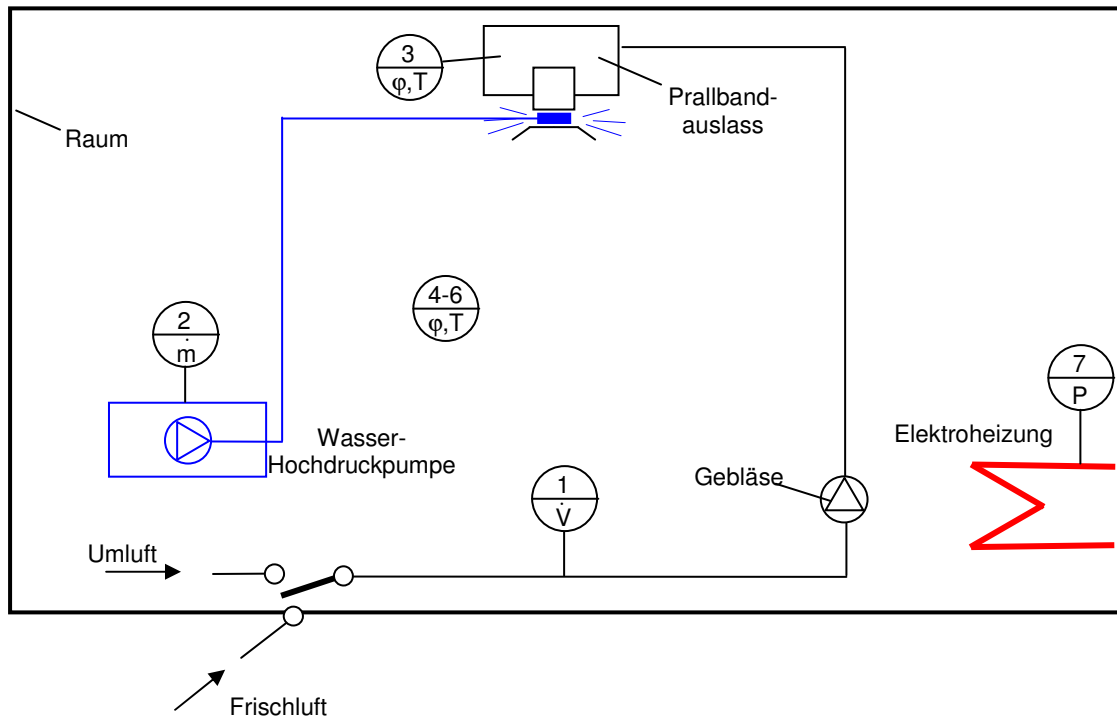


Abb. 44: Schema des Versuches inklusive den Messstellen.

Messtellen-Nr.	Messgrösse	Bereich
1	Luft-Volumenstrom	1500-2500 m <sup>3</sup> /h
2	Gesamt-Wassermassenstrom	0-3 kg
3-6	Luft-Feuchte/Temperatur	30-90% r.F./ 20-30 °C
7	El. Heizleistung	0-5 kW

Tab. 4: Zusammenstellung der Messtellen.

### A1.1.3 Versuchsbetrieb

#### a) Gewählte Randbedingungen

Während des Versuches soll die Luft durch kontinuierliches Befeuchten von Zustand A (24 °C 40% r.F.) in den Zustand B (24 °C 100% r.F.) übergeführt werden (Abb. 45).



## Kriterium für die erste Versuchsserie:

Ab welcher Raum- und Zuluftfeuchte beginnen umgebende Oberflächen durch nicht verdunstete Tropfen nass zu werden oder findet Tropfenwurf statt?

Die erste Versuchsserie erfolgt in einem möglichst luftdichten Versuchsraum im reinen Umluftbetrieb. Die umgewälzte Luftmenge soll 1900 m<sup>3</sup>/h betragen, was einem 15-fachen Luftwechsel entspricht. Die Luftbelastung des Auslasses wie auch die Luftwechselrate entspricht der in der Praxis zu erwartenden Grösse. Dadurch sind realitätsnahe Strömungsverhältnisse zu erwarten. Einzig die thermische Last ist mit etwa 3.3 kW oder 100 W/m<sup>2</sup> eher knapp bemessen. Dies wird aber bewusst in Kauf genommen, um eine vernünftige Versuchsdauer von ca. 30 min zu erhalten (Abb. 46). Die Antwortzeit des Systems beträgt ca. 4min (1 Luftwechsel).

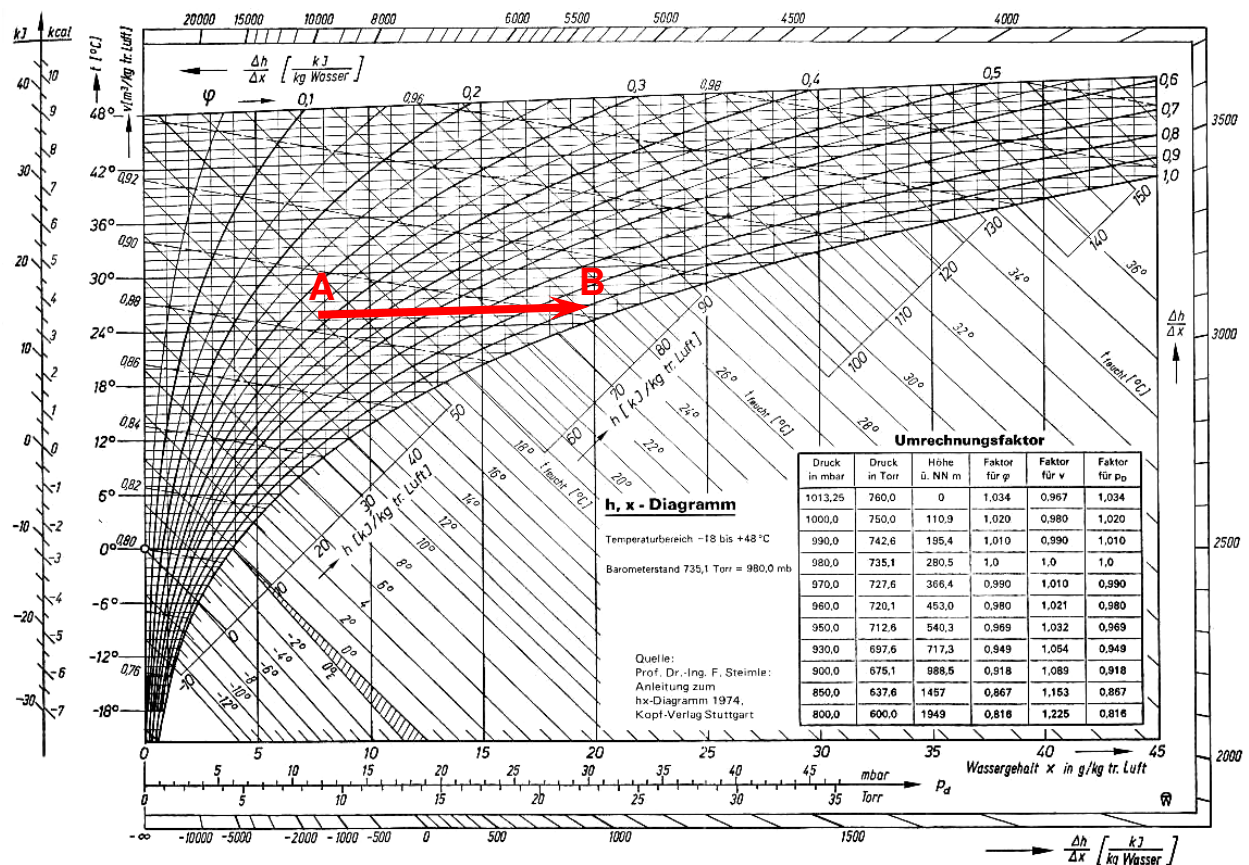


Abb. 45: Während des Versuchs soll die Luft durch kontinuierliches Befeuchten von Zustand A (24 °C 40% r.F.) in den Zustand B (24 °C 100% r.F.) übergeführt werden. Wird dazu Wasser im Raum versprüht, muss entsprechend nachgeheizt werden.

Die Raumtemperatur von 24 °C wurde gewählt, weil diese noch realistisch ist ohne gleich Kondensationserscheinungen zu haben und gleichzeitig ein praxisnaher Wassermassenstrom ermöglicht wird.

## Auslegung des Direktbefeuchtungsversuch

$x(t)$	[g/kg]	spez. Wassergehalt der Luft im Raum	
$X(t)$	[g]	gesamter Wassergehalt der Luft im Raum	
$dt$	10 [s]	Zeitschritt	
$m_{wDüse}$	1 [g/s]	Wassermassenstrom in der Düse	3.6 l/h
$M_{Luft}$	150 [kg]	Gesamtluftmenge im Raum	128 m <sup>3</sup>
$x_u$	7.5 [g/kg]	Wassergehalt der Umgebungsluft	
$L$	0 [1/h]	Luftwechsel	
$m_{Luft}$	0 [kg/s]	Frischluftmassenstrom	

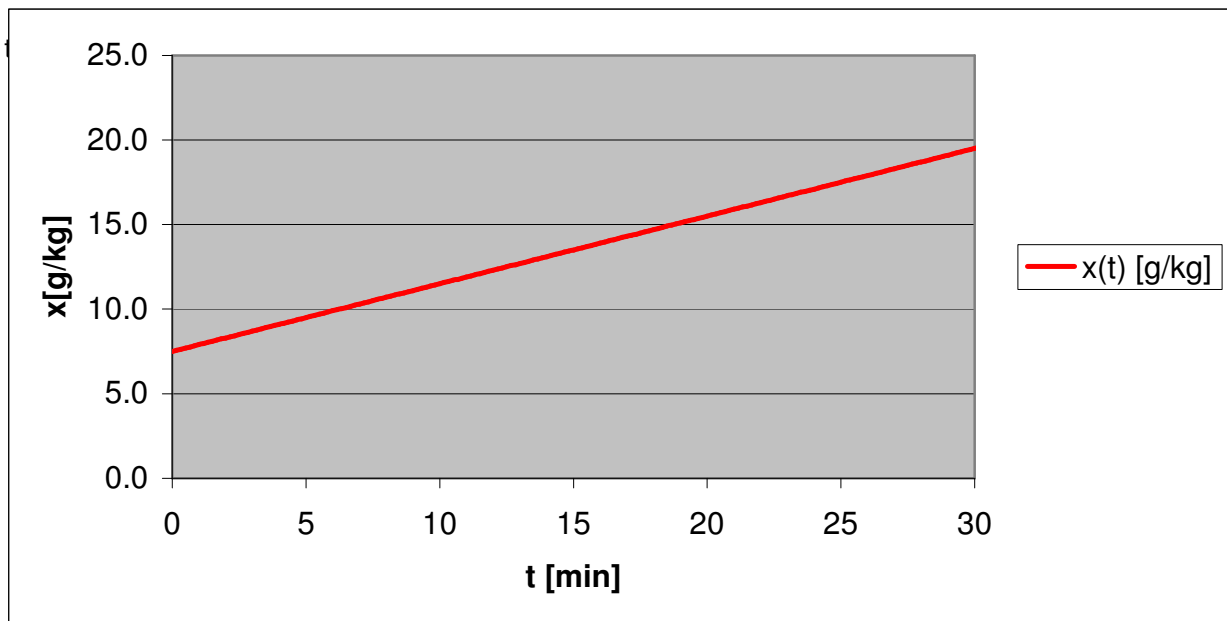


Abb. 46: Verlauf des Wassergehaltes der Luft  $x$  [g Wasser / kg Luft] bei den oben angegebenen Bedingungen, wenn kein Luftaustausch mit der Umgebung stattfindet und kein Niederschlag oder Auskondensieren von Wasser stattfindet.

### b) Charakterisierung des Systems

Vor den ersten Düsen-Versuchen soll das Versuchs-System mit einem Dampfbefeuchter charakterisiert werden. Bei einer konstanten Verdampferleistung sollte der Wassergehalt der Luft linear ansteigen sofern kein Feuchteverlust durch Kondensation oder Luftundichtigkeit auftritt.

### c) Versuchsablauf

1. Die Heizung wird so eingestellt, dass der Versuchsraum von mindestens 24°C-warmer Luft umgeben ist.
2. Die Luft im Versuchsraum wird auch auf 24°C eingestellt.
3. Das Umluftsystem wird gestartet und solange betrieben, bis die Raumluftfeuchte und Temperatur konstant sind (kein Restwasser von früheren Versuchen).

4. Das Befeuchtungssystem wird gestartet und der Wassereintrag in den Raum und die Feuchte in Funktion der Zeit gemessen.
5. Ein allfälliges Ausfallen von Wasser wird anhand von Differenzen zwischen Wassergehalt in der Raumluft und eingetragener Wassermenge, sichtbarem Tropfenwurf und mit Papier belegten Kontrollflächen erfasst (gibt's noch eine bessere Methode?).

#### **A1.1.4 Diskussion des gewählten Versuchsaufbau und -Ablauf**

Die Luftvolumenströme wurden praxisnah gewählt.

Die mit dem Direktbefeuchtungssystem eingetragenen Wassermengen entsprechen denjenigen eines Direktbefeuchtungssystems, das noch mit einer zentralen Zuluftbefeuchtung ausgestattet ist. In diesem Fall wäre in der Praxis aber mit einer Zuluftfeuchte von 95% und einer deutlich tieferen Raumluftfeuchte (z.B. 70%) zu rechnen. Im Versuch werden jedoch beide Werte aus praktischen Gründen parallel erhöht. Dennoch rechnen wir mit qualitativ guten Aussagen. Mit dem vielversprechendsten System können zudem noch weitere Versuche gemacht werden, um dessen Grenzen noch besser ausloten zu können (grössere Befeuchtungsleistungen, erhöhte Zuluftfeuchte). Diese sind jedoch aufwändiger und entsprechend weniger geeignet für eine breite Reihenuntersuchung.

#### **A1.2. Einstellungen für den LUWA Direktbefeuchtungsversuch**

Frequenz am Ventilator für $1900\text{m}^3/\text{h}$ -->	ca. 18.05 Hz
Ventilator Laufrichtung:	-->
Pumpe Laufrichtung:	<--
Sensor für Temperaturregelung:	TTRaum 2
Regelgrösse:	24 °C
Schlick-Düsen:	12,5bar Druck= 3,6l/h (30Hz)
Delavan-Düsen:	34bar Druck= 3.6l/h (30Hz)
SSCO-Düsen:	25bar Druck=3.6l/h (30Hz)
Stielow-Düsen:	41bar Druck = 3.6l/h (30 Hz)
Düse Nr. 9 True Fog	25bar Druck =3.6l/h (30 Hz)
Düse Nr. 10 True Fog	20bar Druck =3.6l/h (30Hz)
Düse Nr. 11 True Fog	21bar Druck = 3.6l/h (30Hz)

Düse Nr. 3 Mee Swirl Jet

35bar Druck =3.6l/h (30Hz)

Heizung:

Grundlast: Lüfter hinten (Stufe 10, o)

Regellast: Lüfter vorne (Stufe 10, o)

### A1.3. Literaturverzeichnis

- **Liquid atomization**, L.Bayvel & Z. Orzechowski; Washington, Taylor&Francis cop. 1993
- **Zerstäubungstechnik**, Prinzipien, Verfahren, Geräte; Günter Wozniak; Berlin, Springer 2003

### A1.4. Spezifikation: Temperatur- und Feuchtesensor

# HTT II

#### Reference sheet

For more details, please refer to the HTT II reference manual

#### Referenzblatt

Für weitere Details, bitte HTT II Referenz-Handbuch beachten

#### Feuille de référence

Pour plus de détails, veuillez consulter le manuel de référence du HTT II

#### Hoja de referencia

Para mas detalles, consultar el manual de referencia del HTT II



Zellweger Luwa AG  
Wilstrasse 11  
CH-8610 Uster / Switzerland

## Luwa

#### Technical data (shortform):

Supply:		
Supply-voltage:	15..40 VDC or	For Luwa P/N:
	16..30 VAC, 50/60Hz	119 326
	90..260VAC	For Luwa P/N:
		119 327
Power-consumption:	2.5 W	All models

Environment:		
Storage-temp. (transmitter):	-10..+60°C	
Operating temp. (transmitter):	0..+50°C	
Operating temperature (sensor):	-20..+80°C	
Operating humidity (transmitter):	5..95 %RH	
Operating humidity (sensor):	5..100%RH	
Vibration:	IEC 68-2-27	
Shock:	IEC 68-2-6	
Safety:	EN61010 / CE	
Protection:	IP 32	Transmitter
	IP 65	Sensor

Relative Humidity:		
Measuring-range:	6..100%RH	
Measuring-tolerance:	±0.5%	@ +25°C, ±1°C
	±1.0%	@ 0..+50°C
	±2.0%	@ -20..+80°C
	±2.0%	Not cal. (0..50°C)
Repeatability:	< 0.3%	
Drift:	< 1.0% / year	

Temperature:		
Measuring range:	-20..+80°C	Equiv. -4..+176°F
Measuring tolerance:	±0.2K	@ +15..+35°C
	±0.5K	@ -20..+80°C
Repeatability:	< 0.1K	No cal. needed

Conversions (range):		
Dewpoint temperature:	-40..+50°C	-40..+140°F
Specific enthalpy:	0..166 kJ/kg	8..79 btu/lb
Abs. humidity:	0..49 g/kg	0..343 gr/lb

Interfaces (selectable):		
Voltage:	0..10V or 2..10V	RL ≥ 10kΩ
Current:	0..20mA or 4..20mA	RL ≤ 500Ω
CANopen:	According to CIA DS-301	

The HTT II is compliant to: 

Document: HTT II Bulletin index1, Version: 4-5-2000  
© 2000 Z. Uster, RTI department