



Masterarbeit

(Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science der Studienrichtung
Verfahrenstechnik an der Technischen Universität Graz)

Energetische Betrachtungen in der NMMO Rückgewinnung

Vorgelegt von Markus Scheibelhofer
In Zusammenarbeit mit der Lenzing Fibers GmbH

Betreuer:
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hans Schnitzer,



Technische Universität Graz

Graz, Juli 2012

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Datum: Graz, Montag, 09. Juli 2012



(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Date: Graz, 09.07.2012



(sign)

DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hans Schnitzer für die stets hilfsbereite Betreuung der Masterarbeit.

Ebenso ein recht herzliches Dankeschön an das gesamte Team der Lenzing Fibers GmbH. Allen voran Herrn Dipl.-Ing. Alois Bauer, dem externen Betreuer meiner Arbeit.

Ein recht herzliches Dankeschön meiner Freundin, ihrer Familie, sowie all jenen Freunden und Studienkollegen, die mich in den letzten Jahren unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich in jeglicher nur denkbaren Art unterstützt hat.

ABSTRACT

Tencel® fiber production is a relatively new process for the production of cellulose fibers. The production process is well known for its very low environmental impact and high recovery of solvent. The recovery of the solvent (circa 99,7% recovery) requires a large amount of energy. To minimize this energy demand the idea for a project called the “Cooling tower” was created.

The project focuses the use of the evaporation effect of a cooling tower used to extract water from the NMMO/water (solvent/water) mixture. This effect can be enhanced by increasing the residual heat required, to heat the feed stream and thus obtaining a larger temperature gradient.

As part of this work, theoretical models and experiments have been developed to calculate the energy balance of the cooling tower.

In addition, a project plan of the experimental design, installation, commissioning, an official procedure, the test series, the analysis of the measurements and ultimately a scale-up or a possible installation in the process as well as an investment estimate was included.

In this case, the project "Cooling tower" is considered as a thorough investigation covering all aspects of a project life-cycle.

The first stage was based on a calculation model, which was implemented in a "Microsoft Excel" spreadsheet program. This was made with some assumptions and further used as the basis for the test series. After the trials, the assumptions were validated by the data obtained from the test series.

Thus with the new analytical model, the investment account and the impact of regular annual cooling and evaporation rates were calculated. Here, the expected difference between warm and cold, and high and low humidity has been proved.

Another point of consideration were the observations of emissions of the cooling tower and the biological growth. Therefore a specially created aerosol measurement system was installed in the test series, and only minimal emissions in one or two digit ppm range were observed.

ABSTRACT

The idea of the concentration has been confirmed in the cooling tower. Also, due to the low fugacity of NMMO's in the temperature range up to 40°C can be expected only minimal emissions. For reducing the expected biological growth within the cooling tower a weekly shock dose of biocide is suggested.

One way to integrate the cooling tower into the Tencel® fiber production facility is by utilising the unused waste heat to the evaporation plant thus to gain the result of a higher concentration of NMMO. From an economic standpoint, the cooling tower project can be seen as a cross-heavy because of high investment costs.

However, with rising energy prices or an ideal process integration, the increase in concentration effect from a cooling tower can increase profitability.

KURZFASSUNG

Die Erzeugung einer Tencel® Faser ist ein vergleichsweise neuer Prozess zur Erzeugung von Cellulosefasern. Aufgrund der reinen physikalischen Erzeugung zeichnet sich das Tencel® Verfahren durch seine hohe Umweltfreundlichkeit aus. Um das Lösungsmittel (NMMO- N-Methylmorpholin-N-Oxid) an die 99,7 % rückzugewinnen, ist ein großer Energieaufwand erforderlich. Um diesen zu minimieren ist das Projekt „Kühlturm“ entstanden. Gezielt soll der Verdunstungseffekt eines Kühlturms genutzt werden, um Wasser aus dem NMMO/Wassergemisch zu entfernen. Der Effekt wird verbessert, indem Abwärme des Prozesses genützt wird, um den Zulaufstrom zu erwärmen und somit einen größeren Temperaturgradienten zu erhalten.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen energetische Betrachtungen durch theoretische Modelle sowie Versuchsreihen am Versuchskühlturm durchgeführt werden. Hierbei soll das Projekt „Kühlturm“ als Gesamtes betrachtet werden. Im genaueren wurde ein Projektplan erstellt, der die Versuchsplanung, die Montage, die Inbetriebnahme, ein Behördenverfahren, die Versuchsreihen, die Auswertung der Messungen und letztendlich ein Scale-up bzw. eine Integrierung in den Gesamtprozess sowie eine Amortisationsrechnung beinhaltet.

In der ersten Stufe wurde ein Berechnungsmodell, welches mit dem Tabellenkalkulationsprogramm „Microsoft Excel“ umgesetzt wurde, erstellt. Dieses wurde anhand von einigen Annahmen erarbeitet und in weiterer Folge als Basis für die Versuchsreihen verwendet. Nach den Versuchsreihen wurden die getroffenen Annahmen validiert bzw. durch gewonnene Zusammenhänge ergänzt.

Mit dem daraus gewonnenen Berechnungsmodell wurden die Amortisationsrechnung und überschlägig die jährlichen Kühlleistungen bzw. Verdunstungsraten ermittelt. Hierbei ist der zu erwartende Unterschied zwischen warmer und kalter, bzw. hoher und niedriger Luftfeuchte bestätigt worden.

In einem weiteren Schritt wurden die Emissionen des Kühlturms und die Wachstumsrate der Biologie betrachtet. Hierfür ist eigens eine Aerosolmessanlage

geplant und installiert worden. Die Versuchsreihen ergaben minimale Emissionen im ein- bis zweistelligen ppm Bereich.

Grundsätzlich ist die Idee der Aufkonzentrierung im Kühlturm bestätigt geworden. Aufgrund der Verdunstung des Wassers im Kühlturm wird NMMO aufkonzentriert. Das ist auf die niedrige Flüchtigkeit des NMMO's im Temperaturbereich bis 40°C zurückzuführen. Dies wird durch die Aerosolmessung bestätigt.

Die Reduktion des biologischen Wachstums (Keimzahl) im Kühlturm ist mittels einer wöchentlichen Schockdosierung als ausreichend zu bezeichnen.

Eine Möglichkeit den Kühlturm in die Tencel® Fasererzeugungsanlage zu integrieren ist darin gegeben, die nicht genutzte Abwärme der Eindampfanlage zu nützen, um diese infolge der Aufkonzentrierung von NMMO zu entlasten.

In finanzieller Hinsicht ist das Kühlturmprojekt aufgrund der hohen Investitionskosten als aufwendig zu bezeichnen.

Bei steigenden Energiepreisen oder einer idealen Prozessintegration kann die Aufkonzentrierung mit einem Kühlturm in finanzieller Hinsicht Rentabilität erlangen.

Inhalt

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	I
DANKSAGUNG	II
ABSTRACT	III
KURZFASSUNG	V
ABBILDUNGEN	X
TABELLEN	XI
ABKÜRZUNGEN	XII
NOMENKLATUR	XIV
1 EINLEITUNG	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel	3
1.3 Umfang der Arbeit	3
2 ENERGETISCHE BETRACHTUNGEN IN DER NMMO RÜCKGEWINNUNG	5
2.1 Einordnung des Tencel® Produktionsprozess	5
2.2 Der Tencel® Produktionsprozess	7
2.2.1 Die Spinnmasseherstellung	8
2.2.2 Die Spinnerei:	9
2.2.3 Die Spinnmassenachbehandlung:	10
2.2.4 Die Abwasseraufbereitung:	11
2.3 NMMO/Wassergemisch für den Versuch	13
2.4 Der Versuchskühlturm	14

2.4.1	Fließbild des Versuchskühlturms	15
3	STAND DER TECHNIK	17
3.1	Kühltürme	17
3.2	Energien und der Verdunstungsprozess	18
3.2.1	Wärmeströme in der Kühlturmtechnik	20
3.2.2	Grundlagen feuchte Luft	20
3.2.3	Der Kühlturmprozess	21
3.3	Sicherheitstechnik	25
3.4	Versuchsplanung und Auswertung	27
3.5	Inbetriebnahme	29
4	ENERGIEN AM VERSUCHSKÜHLTURM	30
5	VERSUCHSPLANUNG UND SICHERHEITSTECHNIK	33
5.1	Sicherheitstechnik	33
5.1.1	Verfahrensbeschreibung	33
5.1.2	Sollfunktion vs. Leitworte	33
5.1.3	Risikoprioritätszahlen größer gleich 8 und Gegenmaßnahmen	34
5.2	Grundlegende Punkte der Versuchsplanung	36
5.2.1	Versuchserwartungen	37
5.2.2	Auswahl des statistischen Modells für die Planung und Auswertung	38
5.3	Versuchsaufbau/Messungen	38
5.3.1	Probestelle 1	39
5.3.2	Probestelle 2	39
5.3.3	Probestelle 3	39
5.3.4	Probestelle 4	39
5.3.5	Probestelle 5	39
5.3.6	Probestelle 6	39
5.3.7	Probestelle 7	39
5.3.8	Probestelle 8	40
5.3.9	Probestelle 9	40
5.4	Inbetriebnahme des Versuchskühlturms	40
5.4.1	IBN- Aktivitäten des Versuchskühlturms	40

6	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	42
6.1	Versuchsbetrieb	42
6.2	Aufkonzentrierung des Kühlturms	43
6.3	Aerosolmessanlage	45
6.4	Biologie am Kühlturm	47
6.5	Scale-up des Kühlturms	48
6.5.1	Kühlleistung über den Jahreszyklus	52
6.6	Amortisation des Kühlturms	54
6.7	Einbindung in den Gesamtprozess	55
7	SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	58
7.1	Schlussfolgerungen und Zusammenfassung	58
7.2	Ausblick	59
8	EXPERIMENTELLES	61
8.1	Medien in der Anlage	61
8.2	Analysegeräte	62
8.3	Aerosolmessung	63
8.3.1	Messung des NMMO-Gehalts am Austritt des Kühlturms	63
8.4	Berechnungsfile	64
	LITERATUR	67
	ANHANG	69

ABBILDUNGEN

Abbildung 1-1 steigender Faserverbrauch im Zusammenhang mit den Megatrends	2
Abbildung 1-2 Weltweiter Faserverbrauch in Millionen Tonnen	2
Abbildung 2-1 Übersicht Faserstoffe	6
Abbildung 2-2 Fasereinteilung	6
Abbildung 2-3 Der Tencel Produktionsprozess	7
Abbildung 2-4 Der Tencelproduktionsprozess anschaulich	7
Abbildung 2-5 Die Spinnmasseherstellung	9
Abbildung 2-6 Die Spinnerei	10
Abbildung 2-7 Die Spinnmassenachbehandlung	10
Abbildung 2-8 NMMO in bzw. aus dem Prozess	11
Abbildung 2-9 Abwasseraufbereitung	12
Abbildung 2-10 Das Abwasser für den Kühlturmversuch	13
Abbildung 2-11 Der Versuchskühlturm	14
Abbildung 2-12 Das Verfahrensfießbild	15
Abbildung 3-1 Kühlturmarten	17
Abbildung 3-2 Verdunstung vs. Tauniederschlag	22
Abbildung 3-3 Zuordnung Kühlturmprozesse	22
Abbildung 3-4 Verdunstung vs. Tauniederschlag im h-x- Diagramm	22
Abbildung 3-5 Bilanz am Kühlturm	23
Abbildung 3-6 h-x- Diagramm nach Mollier	23
Abbildung 3-7 Leitworte des PAAG/HAZOP Verfahrens	25
Abbildung 3-8 Risikoprioritätszahl	26
Abbildung 4-1 Energiebilanz am Kühlturm (Bilanzgrenzen am Kühlturm)	30
Abbildung 5-1 PAAG/HAZOP Gefahrenanalyse	34
Abbildung 5-2 Versuchsaufbau mit den diversen Messungen	38
Abbildung 6-1 Aufkonzentrierung bei einer Luftgeschwindigkeit von 5,1 m/s	44
Abbildung 6-2 Aufkonzentrierung bei einer Luftgeschwindigkeit von 1,5 m/s	44
Abbildung 6-3 Tröpfchenausstrag ohne Filtervlies	46
Abbildung 6-4 Luftenthalpie über die Wassertemperaturen bei 5,1 m/s	49

INHALT

Abbildung 6-5 Luftenthalpie über die Wassertemperaturen bei 1,5 m/s	50
Abbildung 6-6 relative Luftfeuchten bei 1,5 m/s	50
Abbildung 6-7 relative Luftfeuchten bei 5,1 m/s	51
Abbildung 6-8 relative Luftfeuchten φ_1 zu φ_2 bei 5,1 m/s	51
Abbildung 6-9 relative Luftfeuchten φ_1 zu φ_2 bei 1,5 m/s	52
Abbildung 6-10 Kühlleistung über den Jahreszyklus	53
Abbildung 6-11 Verdunstung über den Jahreszyklus	53
Abbildung 6-12 Kosteneinsparung über den Jahreszyklus	54
Abbildung 6-13 Amortisationsdauer	55
Abbildung 6-14 Eindampfanlage schematisch (Ist Stand)	56
Abbildung 6-15 Kühlturmintegration schematisch (in den Ist Stand)	56
Abbildung 8-1 Aeerosolmessanlage (schematisch)	64
Abbildung 8-2 Aerosolmessanlage	64
Abbildung 8-3 Eingabefenster Berechnungsfile	65
Abbildung 8-4 Berechnungsfenster Berechnungsfile	66
Abbildung 8-5 Ausgabefenster Berechnungsfile	66

TABELLEN

Tabelle 2-1 Design Größen des Versuchskühlturms	15
Tabelle 5-1 Turm bzw. Leitung Leck	34
Tabelle 5-2 minimale Förderung somit zu hohe Wärmeenergie am Wärmetauscher	34
Tabelle 5-3 Aerosolaustrag	35
Tabelle 5-4 hochprozentiges NMMO	35
Tabelle 6-1 Aeerosolmessung	46
Tabelle 6-2 Amortisationsdauer	54

ABKÜRZUNGEN

Avivage	Beschichtung der Faser mit Fetten oder Silikonem zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften
AGB	Ausgleichsbehälter
BHKW	Biomasse-Heizkraftwerk
Cellulose Gap	Nachfrage an Cellulose Fasern übersteigt kurz- bzw. mittelfristig das Angebot
Ea	Potentielle Energie des NMMO/Wassergemisches am Eintritt des Kühlturms
EDA	Eindampfanlage
EMZ	Energie und Medienzentrale
F	Kühlturmaustrittsfläche
GPE	Galluspropylester – Stabilisator in der Spinmasse
H1L	Energie der Luft am Eintritt des Kühlturms
H1W	Energie des NMMO/Wassergemisches am Eintritt des Kühlturms
H2L	Energie der Luft am Austritt des Kühlturms
H2W	Energie des NMMO/Wassergemisches am Austritt des Kühlturms
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie
Hydrox.	Hydroxylamin
IVA	Industrielle Vorreinigungsanlage
Jato	Jahrestonnen
M	Morpholin
Man-made	Industriell hergestellte Cellulosefaser
NHDT	2-Hydroxy-4,6-Dichlor-1,3,5-triazin
NMM	N-Methylmorpholin
NMMO	N-Methylmorpholin-N-Oxid

ABKÜRZUNGEN

Nonett	Abzugsorgan, mit welchem die Kraft und die Geschwindigkeit des Kabeltransportes geregelt wird, es besteht aus 9 Stück Einzellrollen
PES	Peroxidessigsäure
PI	Aktuelle Prozessdaten der Anlage in Form eines EDV Programms
PLS	Prozessleitsystem
RPZ	Risikoprioritätszahl
R&I	Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild
Scale-up	Vergrößern, Erweitern
Septet	Abzugsorgan, mit welchem die Kraft und die Geschwindigkeit des Kabeltransportes geregelt wird, es besteht aus 7 Stück Einzellrollen
TiO ₂	Titandioxid
VE-Wasser	Vollentsalztes Wasser

NOMENKLATUR

Lateinische Symbole

a	[m ² /s]	Wärmeleitzahl
A	[m ²]	Stoffaustauschfläche
C_{M1}	[wt%]	Konzentration M in der Grube P191010
C_{M2}	[wt%]	Konzentration von M am Austritt des Kühlturms
C_{NMM1}	[wt%]	Konzentration NMM in der Grube P191010
C_{NMM2}	[wt%]	Konzentration von NMM am Austritt des Kühlturms
C_{NMMO}	[wt%]	Konzentration NMMO am Kühlturmaustritt
C_{NMMO1}	[wt%]	Konzentration NMMO in der Grube P191010
C_{NMMO2}	[wt%]	Konzentration von NMMO am Austritt des Kühlturms
C_W	[kJ/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität des Wassers
cp_d	[kJ/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität des Dampfes
cp_L	[kJ/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität der Luft
C_T	[wt%]	Konzentration Trockensubstanz
D	[m ² /s]	Diffusionskoeffizient
g	[m/s ²]	Gravitationskonstante
h_L	[kJ/kg]	Enthalpie der spezifischen feuchten Luft bezogen auf die trockenen Luft
$h_{L,s}$	[kJ/kg]	Enthalpie der spezifischen feuchten Luft bezogen auf die trockenen Luft bei Sättigung der Luft
$h_{(1+x)1}$	[kJ/kg]	Enthalpie der spezifischen feuchten Luft bezogen auf die trockenen Luft am Eintritt des Kühlturms
$h_{(1+x)2}$	[kJ/kg]	Enthalpie der spezifischen feuchten Luft bezogen auf die trockenen Luft am Austritt des Kühlturms

NOMENKLATUR

M_d	[kg/kmol]	Molmasse des Wassers
M_L	[kg/kmol]	Molmasse der Luft
m_d	[kg/h]	Massenstrom Wasser in den Kühlturm
m_{ges2}	[kg/h]	Gesamtmassenstrom aus dem Kühlturm
m_{H_2O1}	[kg/h]	Massenstrom Wasser in den Kühlturm
m_{H_2O2}	[kg/h]	Massenstrom Wasser aus dem Kühlturm
m_L	[kg/h]	Luftzugmassenstrom durch den Kühlturm
m_{NMMO1}	[kg/h]	Massenstrom NMMO in den Kühlturm
m_{NMMO2}	[kg/h]	Massenstrom NMMO aus dem Kühlturm
m_{tri}	[kg/h]	Massestrom der trockenen Luft durch den Kühlturm
m_v	[kg/h]	Massestrom an verdampften Wassers
m_w	[kg/h]	NMMO/Wassergemisch Massenstrom zum Kühlturm
m_{WW}	[kg/h]	Massenstrom des Wärmemediums
P_{KTTL}	[kW]	Pumpenleistung der Pumpe KTTL
p	[bar]	Umgebungsdruck
p_d^s	[bar]	Sättigungsdampfdruck der Umgebungsluft
p_{d2}^s	[bar]	Sättigungsdampfdruck der Luft am Austritt des Kühlturms
p_{d1}	[bar]	Dampfdruck der Umgebungsluft
p_{d2}	[bar]	Dampfdruck der Luft am Austritt
Q	[kW]	Wärmeleistung des Kühlturms
Q_{zu}	[kW]	Wärmeeintrag an das NMMO/Wassergemisch
Q_{sens}	[kW]	sensibler Wärmestrom
Q_{lat}	[kW]	latenter Wärmestrom
s	[m]	charakteristische Länge

NOMENKLATUR

T	[°C]	Temperatur der Umgebungsluft
$T_{L,s}$	[°C]	Temperatur der Umgebungsluft bei Sättigungszustand
T_{L2}	[°C]	Lufttemperatur am Kühlturmaustritt
T_{L1}	[°C]	Temperatur der Umgebungsluft
T_{W0}	[°C]	Temperatur NMMO/Wassergemisch vor dem Wärmetauscher
T_{W1}	[°C]	Temperatur NMMO/Wassergemisch in den Kühlturm
T_{W2}	[°C]	Kühlturmkreislauftemperatur NMMO/Wassergemisch
T_{WE}	[°C]	Wärmedmedium am Eintritt des Wärmetauschers
T_{WA}	[°C]	Wärmedmedium am Austritt des Wärmetauschers
V	[m ³]	Volumen der Grube P191010
v	[m/s]	Luftgeschwindigkeit nach dem Kühlturm
V_L	[Bm ³ /h]	Luftzugvolumenstrom durch den Kühlturm
V_{trl}	[Bm ³ /h]	Volumenstrom der trockenen Luft
V_{vmax}	[m ³ /h]	Verdunstungsrate des Kühlturms
V_W	[m ³ /h]	Eingangsvolumenstrom NMMO/Wassergemisch
x_1	[kg _d /kg _{trl}]	Spezifische Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft
x_2	[kg _d /kg _{trl}]	Feuchte der Luft am Kühlturmaustritt
x_s	[kg _d /kg _{trl}]	Feuchte der Luft bei Sättigung der Luft
z	[m]	Pumphöhe am Kühlturm

Griechische Symbole

α	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangszahl
β	[m/s]	Stoffübergangszahl
Δh	[kJ/kg]	Enthalpieunterschied der Luft im Kühlturm
Δh_{v_0}	[kJ/kg]	Verdampfungsenthalpie von Wasser
Δh_{v_s}	[kJ/kg]	Verdampfungsenthalpie von Wasser beim Sättigungszustand
Δp_d	[bar]	Druckverlust der Düsen
ΔT	[°C]	Temperaturunterschied NMMO/Wassergemisch zur Luft am Kühlturmaustritt
ΔT_T	[°C]	Temperaturunterschied des Wärmemediums am Wärmetauscher
ΔT_{Turm}	[°C]	Temperaturunterschied NMMO/Wassergemisch im Kühlturm
ΔT_w	[°C]	Temperaturunterschied NMMO/Wassergemisch im Kühlturm
$\Delta T_{w\text{NMMO}}$	[°C]	Temperaturunterschied NMMO/Wassergemisch im Wärmetauscher
Δx	[kg _d /kg _{trl}]	Feuchteunterschied der Luft im Kühlturm vom Ein- bis zum Austritt
η_P	[-]	Pumpenwirkungsgrad

NOMENKLATUR

φ	[%]	relative Feuchte der Umgebungsluft
φ_1	[%]	relative Feuchte der Umgebungsluft
φ_2	[%]	relative Luftfeuchtigkeit am Austritt des Kühlturms
λ	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ	[kg/(m ² s)]	Verdunstungszahl

Dimensionslose Kennzahlen

Le	[-]	Lewissche Kennzahl
Sc	[-]	Schmidt-Zahl
Pr	[-]	Prandtl-Zahl
Me	[-]	Merkel-Zahl

1 EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Was haben eine High Tech Schutzbekleidung, ein Baby-Feuchttuch sowie eine Glasscheibe gemeinsam. Richtig! Sie bestehen alle aus Faserstoffen.

Die vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten von Faserstoffen scheinen unbegrenzt, wodurch die weltweite Nachfrage an Fasern jeglicher Art ungebrochen ist.

Weiters steigt die Zahl der Weltbevölkerung. In Schwellenländern wie China oder Indien erhöht sich der Faserverbrauch proportional mit der Bevölkerungswachstumsrate.

Bei steigendem Wohlstand wächst das Bewusstsein für Nachhaltigkeit und Ökologie (siehe Abbildung 1-1 und Abbildung 1-2).

Mit einem Weltmarktanteil von rund 30% ist die Baumwolle die wichtigste Faser für die Textilindustrie sowie die Nonwovens-Industrie.

Die Baumwollerzeugung ist mit einem intensiven Einsatz an Wasser und Pestiziden verbunden. Aufgrund der begrenzten Ackerflächen, die ebenso dringend für die weltweite Lebensmittelproduktion benötigt werden, ist die Produktionssteigerung an Baumwolle nicht mehr beliebig möglich.

Die Erzeugung diverser synthetischer Polymerfasern, mit einem Marktanteil von rund 60%, kann aufgrund der Erdölproblematik nicht als zukunftsweisend bezeichnet werden.

EINLEITUNG

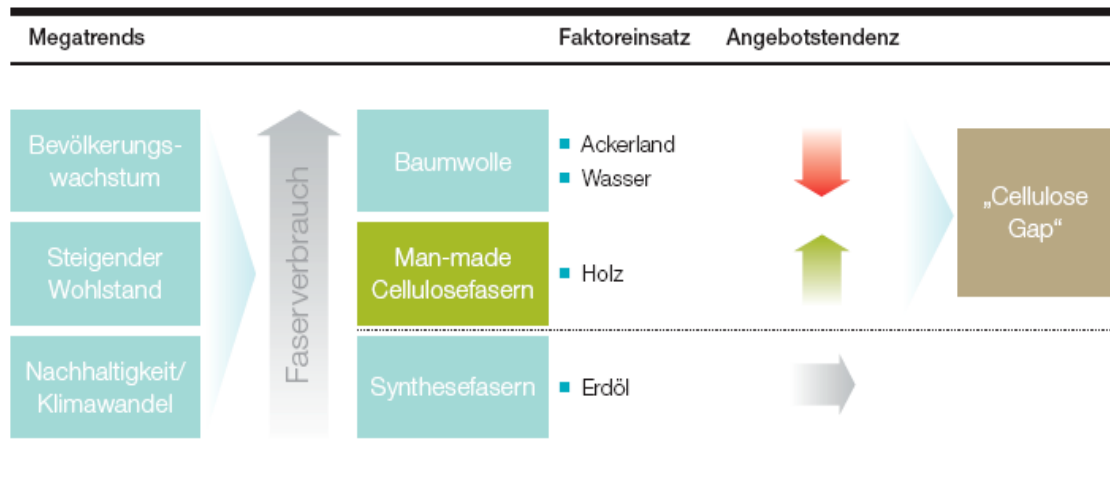


Abbildung 1-1 steigender Faserverbrauch im Zusammenhang mit den Megatrends [16]

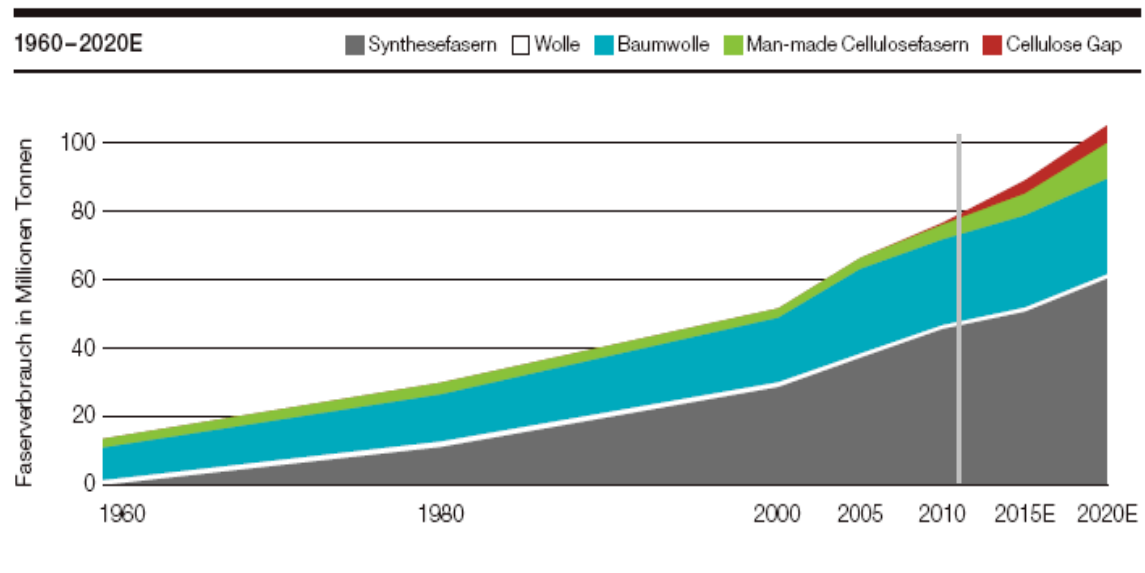


Abbildung 1-2 Weltweiter Faserverbrauch in Millionen Tonnen [16]

Eine alternative Fasererzeugung liefert das Unternehmen Lenzing, welches durch verschiedene Verfahren aus Cellulose natürliche Polymere herstellt.

In den letzten Jahren hat sich im Gegensatz zum schwefelchemieintensiven Viskoseprozess, ein neuer Fasererzeugungsprozess namens Tencel®, vormals Lyocell-Prozesses, entwickelt. Der Tencel® Prozess darf aus ökologischer Sicht als umweltfreundlich bezeichnet werden, da dieser minimale Emissionen vorweist.

Der neue Tencel® Prozess befindet sich inmitten der Optimierungsphase. Der Bereich der „Energieoptimierung des Prozesses“ ist ein wichtiger Aspekt, um ökologisch sowie ökonomisch wettbewerbsfähig zu sein bzw. zu bleiben. Es ist ausreichend Motivation vorhanden, um sich in dieser Masterarbeit eingehend mit dieser Thematik zu befassen.

1.2 ZIEL

Beim Tencel® Prozess ist im Bereich der Lösungsmittelrückgewinnung ein hoher Energiebedarf gegeben. Der hohe Energiebedarf ist zu minimieren.

Eine Innovation in der Rückgewinnung des NMMO könnte durch die Verwendung eines Kühlturms gegeben sein. Zur Wiedergewinnung des Lösungsmittels soll der Verdunstungseffekt des Turms zur Aufkonzentrierung des Lösungsmittels genutzt werden. Im genaueren soll das Lösungsmittel, das nicht flüchtig ist, vom Wasser getrennt werden. Somit könnte die herkömmliche Eindampfanlage und deren Energiebedarf vermindert werden.

Gezielt gilt es, in einem Versuch, einen geringen **Lösungsmittelanteil** in einem offenen Kühlturm **einzudicken**.

Hiermit soll eine genaue Aussage hinsichtlich des **Energieeinsparungspotentials** und somit eine Datenbasis für eine Einbindung in den Produktionsprozess geschaffen werden.

Um eine Gesamtaussage zur Verwendung eines Kühlturms zu ermöglichen, sollen während der Versuche die **Emissionen** am Kühlturmaustritt sowie die **Biologie** im Kühlturm analysiert bzw. betrachtet werden.

1.3 UMFANG DER ARBEIT

Der Kühlturmversuch kann als gesamtes Projekt verstanden werden. In der Einarbeitungsphase soll ein gezieltes Projektmanagement (siehe Anhang11) durchgeführt werden, um die zur Verfügung stehenden Ressourcen effizient zu nützen. Dies soll unter anderem durch ständige Aktualisierung bzw. Anpassung des Projektverlaufs ermöglicht werden.

EINLEITUNG

In weiterer Folge soll ein Behördenverfahren, die Beschaffung der benötigten Anlagenteile, die Montage und die Inbetriebnahme des Kühlturmes als Meilenstein gesehen werden.

Weiters gilt es eine Bilanzierung des Turmes sowie die Sicherheitstechnik zu berücksichtigen, um die Versuchsplanung in Hinblick auf die Versuchsdurchführung möglichst effizient zu gestalten.

Die Versuche sollen gezielt durchgeführt werden, um im Anschluss aussagekräftige Werte bzw. Aussagen zu ermöglichen.

Die Auswertung bzw. die gesamtanlagentechnische Betrachtung soll das Projekt Kühlturm in Form dieser Masterarbeit letztendlich abrunden.

2 ENERGETISCHE BETRACHTUNGEN IN DER NMMO RÜCKGEWINNUNG

In diesem Kapitel soll der Tencel® Produktionsprozess sowie die Einbindung des Kühlturmversuches dargestellt und erklärt werden. Ebenso soll ein energetischer Hintergrund für eine Verwendung eines Kühlturms in der NMMO Rückgewinnung gegeben werden.

2.1 EINORDNUNG DES TENCEL® PRODUKTIONSPROZESS

Grundsätzlich wird zwischen Natur- und Chemiefaserstoffen, den „manmade“- Fasern, unterschieden (siehe Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2).

Die Naturfaserstoffe werden in organische (pflanzliche Faserstoffe somit in Cellulose bzw. tierische Faserstoffe also Eiweiß) sowie anorganische Faserstoffe (Glas, Asbest) eingeteilt.

Bei den Chemiefaserstoffen muss zwischen den natürlichen Polymeren, den synthetischen Polymeren und den Nicht-Polymeren unterschieden werden.

**Faserstoffe
Übersicht**

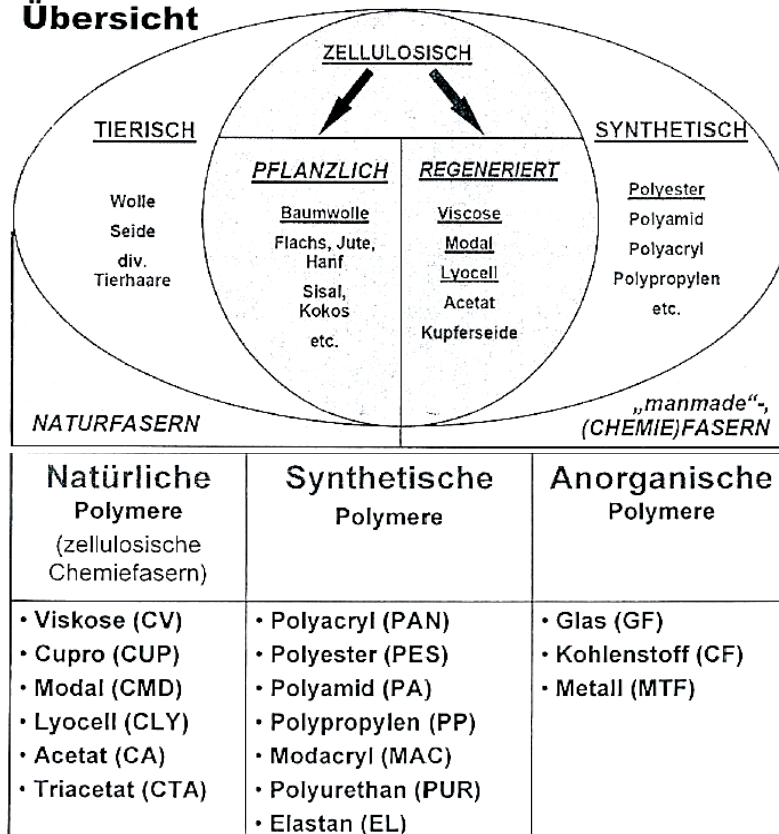


Abbildung 2-1 Übersicht Faserstoffe [6]

Fasern					
Naturfasern		Chemiefasern (Man-made Fasern)			
		aus natürlichen Polymeren		aus synthetischen Polymeren	aus anorganischen Substanzen
aus Eiweiß	aus Cellulose	aus Cellulose	aus Eiweiß	Polyester Polyamid Elastan Polypropylen Polyuretan Acryl* Polytetrafluorethylen*	Carbon* Keramik Glas Metall
Wolle Seide Angora Kaschmir etc.	Baumwolle Leinen Hanf Jute etc.	Viscose* Modal* Lyocell* Cupro Acetat etc.	Kasein Kollagen Ardein Zein		

Abbildung 2-2 Fasereinteilung [16]

Der Tencel® Produktionsprozess (vormals Lyocell Produktionsprozess) kann in die Rubrik der regenerierten cellulosen Chemiefasern eingeteilt werden (auch natürliche Polymere genannt).

2.2 DER TENCEL® PRODUKTIONSPROZESS

Nun soll der Tencel® Produktionsprozess am Lenzing Unternehmensstandort Heiligenkreuz beschrieben werden (siehe Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4), um zur NMMO- Aufkonzentrierung überzuleiten.

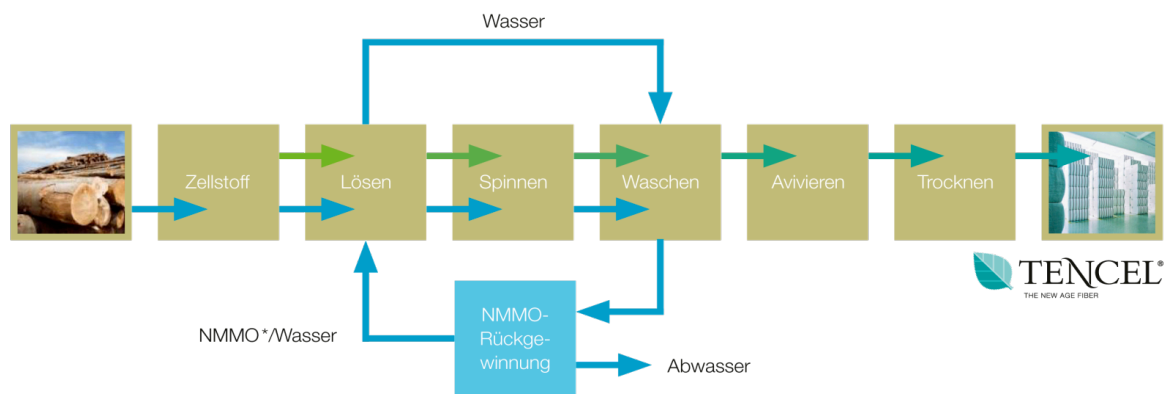


Abbildung 2-3 Der Tencel Produktionsprozess [16]

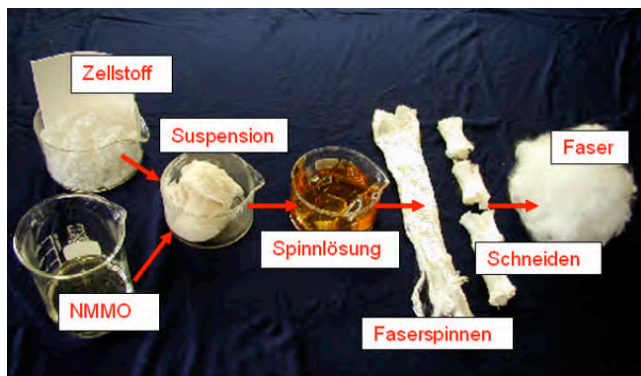


Abbildung 2-4 Der Tencelproduktionsprozess anschaulich [16]

„Beim Tencel® Prozess ist wie bei der Viskoseherstellung der Rohstoff Holz. Aus ihm wird der Zellstoff herausgelöst. Dieser wird direkt, ohne chemische Modifizierung gelöst, filtriert und zu Fasern versponnen. Dieses neuartige Produktionsverfahren zeichnet sich durch die so gut wie vollständige Kreislaufführung des Lösungsmittels NMMO (N-Methylmorpholinoxid ist ein wässriges, organisches Lösungsmittel) aus.“ [16]

Zur genaueren Erklärung soll der Tencel® Prozess in folgende Teilbereiche eingeteilt werden:

- Spinnmasseherstellung
- Spinnerei
- Spinnmassenachbehandlung
- Abwasseraufbereitung

Grundsätzlich spricht man von einer Produkt- sowie von einer Wasseraufbereitungslinie.

An erster Stelle soll die Produktlinie erklärt werden, um anschließend die Herkünfte der Abwässer besser zu erläutern.

2.2.1 Die Spinnmasseherstellung

Die Spinnmasse wird im sogenannten Filmtruder hergestellt (Spinnmasseherstellung siehe Abbildung 2-5). Der Filmtruder ist ein Dünnschichtfilmverdampfer, welcher das Gut unter Scherwirkung, hoher Temperatur und Druck in den richtigen Lösungsbereich bringt (Lösefenster zwischen Wasser/NMMO/Zellstoff).

Um die ideale Spinnmasse nach dem Filmtruder zu erhalten, muss Zellstoff gemahlen und die richtige Menge an NMMO, Additiven bzw. Stabilisatoren beigelegt werden.

Nach dem Filmtruder müssen die unlöslichen Stoffe herausgefiltert werden, damit der anschließende Spinnvorgang nicht behindert wird.

Um die Verarbeitungsfähigkeit der Spinnmasse während sämtlicher Arbeitsschritte zu gewährleisten, muss diese ständig auf ca. 100°C gehalten werden, womit ein Auskristallisieren der zähen Flüssigkeit verhindert wird.

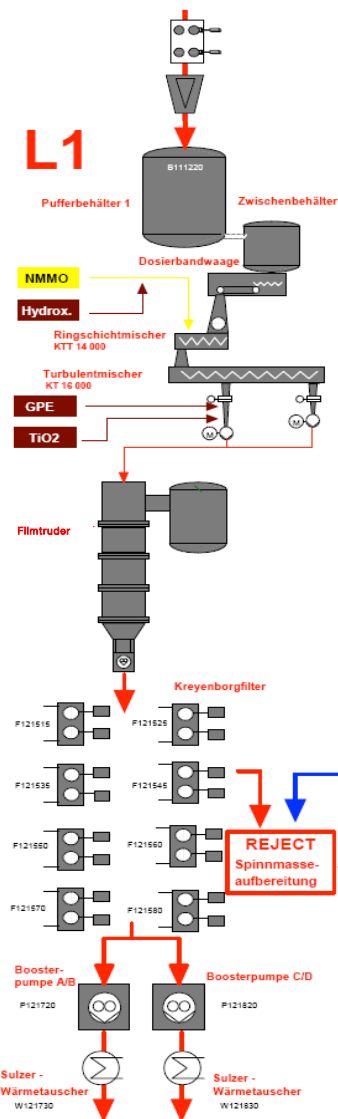


Abbildung 2-5 Die Spinnmasseherstellung [16]

2.2.2 Die Spinnerei:

Die aus dem Filntruder kommende Spinnmasse wird durch die Spinndüsen in Form von Spinnfäden gebracht und über einen Luftspalt in das Spinnbad eingetaucht. Durch das verdünnte NMMO/Wassergemisch im Spinnbad fällt die Spinnmasse aus, wodurch sich das Endlos-Filament (Tencel® Faser) bildet. Das Faserkabel wird abgezogen, gewaschen und geschnitten (siehe Abbildung 2-6).

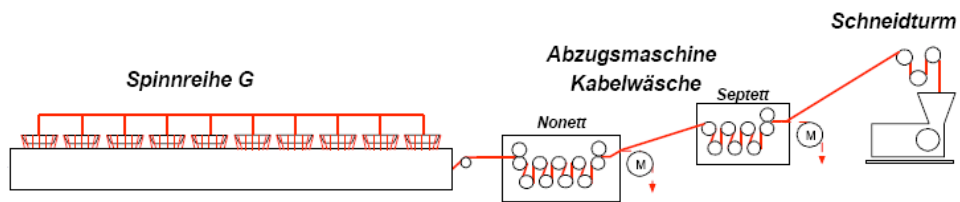


Abbildung 2-6 Die Spinnerei [16]

2.2.3 Die Spinnmassenachbehandlung:

Im Anschluss wird die Faser vom NMMO befreit, vernetzt, aviviert, getrocknet und verpresst (siehe Abbildung 2-7).

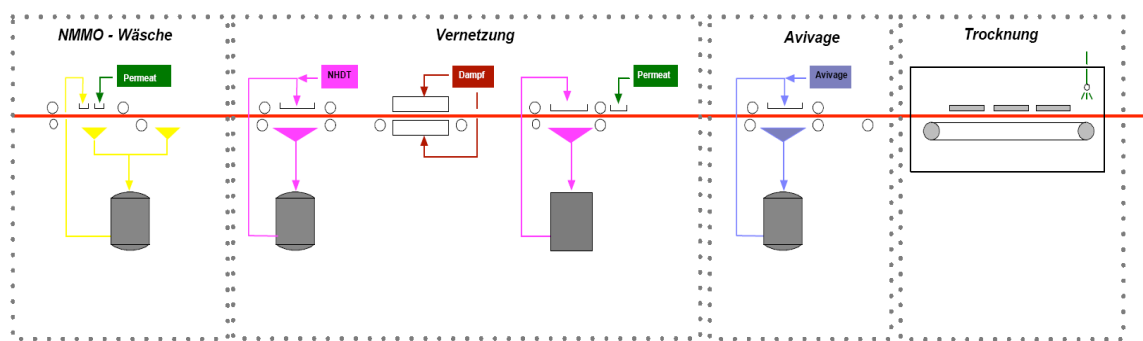


Abbildung 2-7 Die Spinnmassenachbehandlung [16]

2.2.4 Die Abwasseraufbereitung:

Aus dem Produktkreislauf ist erkennbar, dass eine beachtliche Menge an NMMO für den Prozess benötigt wird. Um den Prozess ökologisch und ökonomisch zu gestalten ist eine effiziente NMMO-Rückgewinnung nötig. Beim gesamten NMMO-Rückgewinnungsprozess wird ein sehr großer Anteil der Gesamtenergie des Energieaufwands des Produktionsstandortes benötigt.

Bevor die Wasseraufbereitungslinie erklärt wird, sollen Fakten des NMMO im Prozess erläutert werden (siehe auch Abbildung 2-8):

- Rückgewinnung an NMMO im Bereich von 96-99,8%
- Bei einer Produktion von 60.000 jato Tencel®-Faser spricht man von ca. 1.500 kg NMMO_{50%ig} pro Tag, welches als „make up“ benötigt wird

Aufteilung des NMMO

- ca. 3% in das Cellulosegranulat (verkaufsfähiges Produkt bzw. Abfall)
- < 0,8% in die Abluft
- Rest in das Abwasser

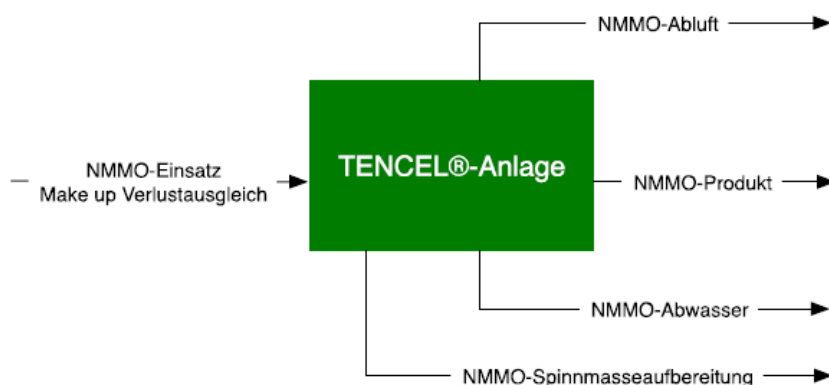


Abbildung 2-8 NMMO in bzw. aus dem Prozess [16]

In der Abbildung 2-9 ist die Wasseraufbereitungslinie skizziert.

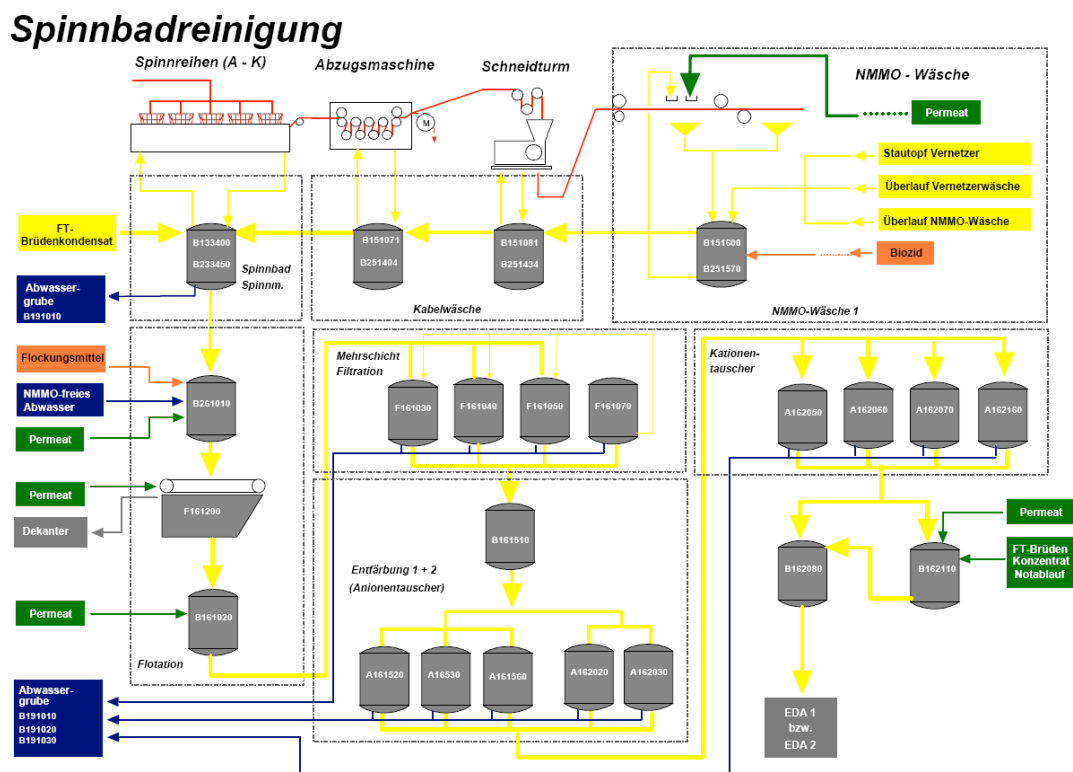


Abbildung 2-9 Abwasseraufbereitung [16]

Der wesentliche NMMO-Anteil kommt aus dem Spinnbad, sowie aus der Nachbehandlung der Fasern.

Um das NMMO weiterverwenden zu können, muss es von Schmutzstoffen befreit sowie aufkonzentriert (Abdampfen von Wasser, großer Energieverbrauch) werden.

Grundsätzlich wird das aus dem Spinnbad, aus der Kabelwäsche bzw. aus der NMMO-Wäsche erhaltene NMMO zuerst flотиert. In weiterer Folge wird das NMMO/Wassergemisch in einem Mehrschichtfilter filtriert sowie in Kationen- und Anionentauschern entfärbt. Das Gemisch wird in der Eindampfanlage auf die erforderlichen 78% (erforderlich für die Weiterverarbeitung) NMMO-Gehalt

aufkonzentriert. Vor allem die Eindampfanlage benötigt immense Anteile an Energien. Der hohe Energieverbrauch könnte durch eine Vorkonzentrierung mittels eines bzw. mehrerer Kühltürme verringert werden.

Ebenfalls sind noch einige Gruben vorhanden, um die Abwasseraufbereitung zu vervollständigen.

Um die abwassertechnischen Anlagen (z.B. die Mehrschichtfilter, Ionentauscher) ständig betriebsbereit zu haben, müssen diese ständig rückgespült bzw. gereinigt werden. Die Abwässer aus diesen Reinigungsschritten werden in den diversen Gruben gesammelt und weiterverwertet (siehe Abbildung 2-10).

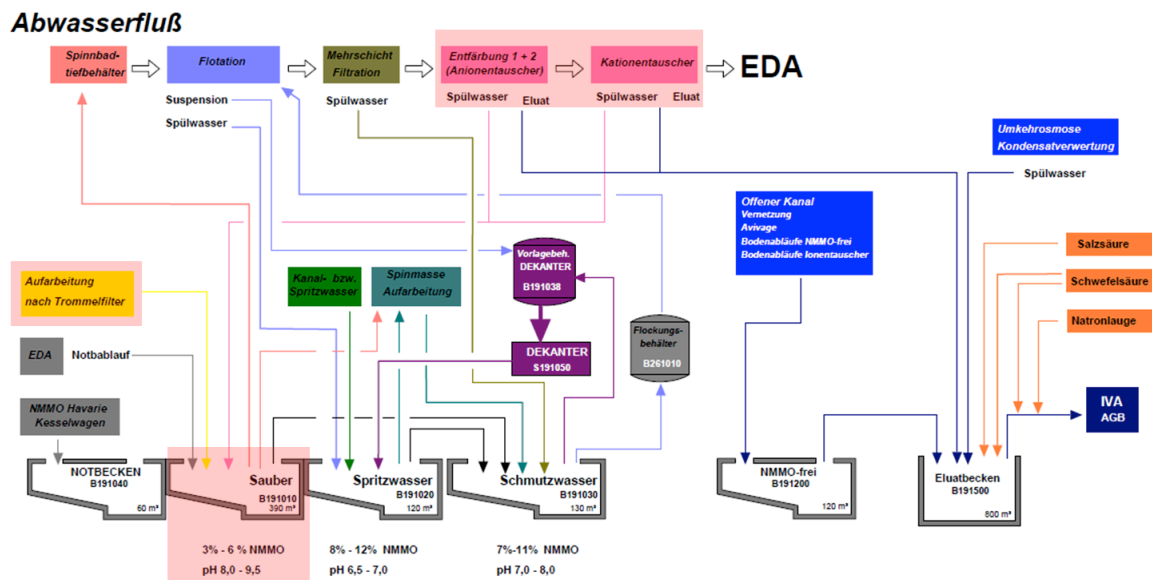


Abbildung 2-10 Das Abwasser für den Kühlturmversuch [16]

2.3 NMMO/WASSERGEMISCH FÜR DEN VERSUCH

In der für den Versuch essentiellen Grube B191010 (10er Grube) ist ein sauberes niedrig konzentriertes NMMO/Wassergemisch vorhanden, welches hauptsächlich aus den Spülungen der Ionentauscher (diskontinuierlich) sowie aus der Spinnbadaufarbeitung (mittels Trommelfilter also diskontinuierlich) gespeist wird.

Dieses NMMO/Wassergemisch soll für die Kühlturmversuche verwendet werden. Nachdem der Prozess sowie die Herkunft des NMMO/Wassergemisches für die Versuchsreihen erklärt wurden, soll an dieser Stelle der Versuchskühlturm bzw. dessen Einbindung in den derzeitigen Prozess erläutert werden.

2.4 DER VERSUCHSKÜHLTURM

Für die Verwendung eines Kühlturms sprechen viele Vorteile. Durch den Verdunstungseffekt verlässt den Kühlturm am Austritt reines Wasser, womit das Lösungsmittel aufkonzentriert wird. In der Eindampfanlage würde somit eine geringere Energiemenge benötigt. Ebenso ist die Wartung des Kühlturms als unproblematisch anzusehen.

In der Abbildung 2-11 ist der Versuchskühlturm vom Unternehmen Balcke-Dürr GmbH dargestellt. Mit seinen Maßen von 3500x3500x3800mm ist er ideal für einen Versuchsbetrieb geeignet.

Dieser wird mit einem NMMO/Wassergemisch gespeist, wobei das Wasser verdunstet wird. Somit ergibt sich die Aufkonzentrierung des NMMO (Verfahrensbeschreibung siehe 2.4.1).



Abbildung 2-11 Der Versuchskühlturm

Die Design-Größen des Kühlturms sind in der Tabelle 2-1 aufgelistet (Indizes siehe Nomenklatur):

Tabelle 2-1 Design Größen des Versuchskühlturms

Versuchskühlturm	
V_W	60l/s
V_{vmax}	2,5m³/h
Δp_d	0,412 bar
T_{W1}	40°C
T_{W2}	33°C
Q	1758 kW

2.4.1 Fließbild des Versuchskühlturms

In der Abbildung 2-12 ist das erarbeitete Fließbild (siehe Anhang4) für den Kühlturmversuch dargestellt. Hierbei sind die vorhandenen Armaturen, die Einbindungspunkte in die bestehende Anlage sowie die benötigten Messanlagen eingetragen. In weiterer Folge soll die Funktionsweise des Turms erläutert werden.

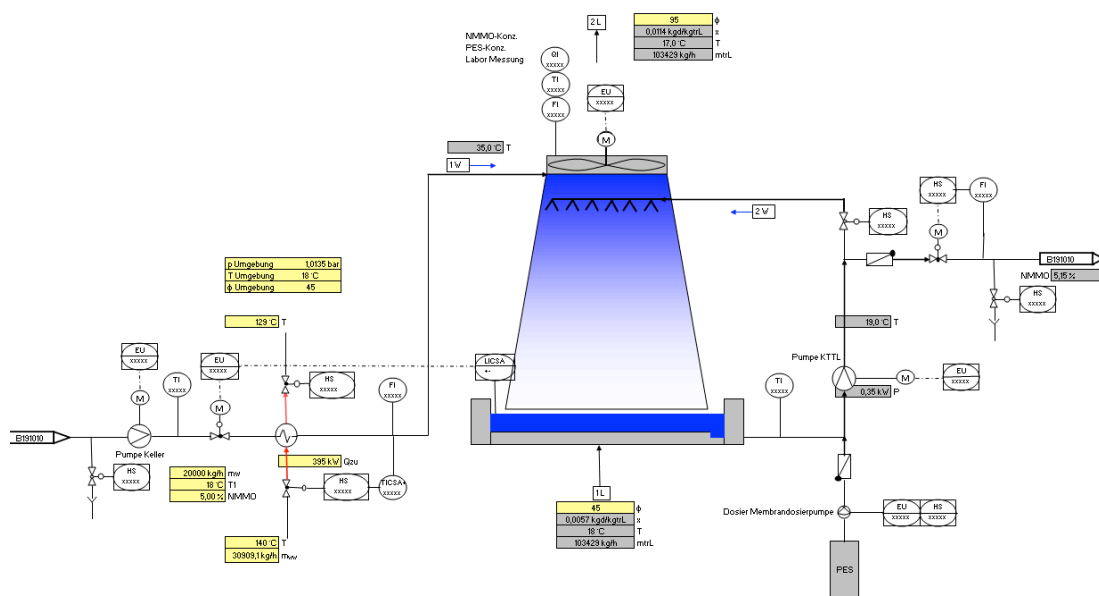


Abbildung 2-12 Das Verfahrensließbild

Aus der Grube B191010 (10er Grube) werden die Prozessspülwässer für einen Eindickungsversuch entnommen.

Aus der Rohrleitung 191065-100-206-7.5.1, welche die Spülwässer zu den Spinnmassetiefbehältern leitet, werden gleich nach dem Grubenausgang Spülwässer entnommen (Radicord Kühlwasserschlauch- schwarz DN80). Nach dem Versuch werden die Spülwässer direkt in die 10er Grube zurückgefördert.

Nach der Grubenpumpe P191012 werden im Bereich der Säule 21E eine weitere Pumpe „Druckerhöhung (Pumpe Keller)“ und ein Wärmetauscher (ermöglicht verschiedene Versuchsfahrweisen) zwischengeschaltet.

Die Spülwässer werden in den Innenhof „Tanklager Süd“ zum Kühlturm gefördert. Die Zu- und Ableitung des NMMO/Wassergemisches ist an denselben Stellen angeordnet.

Am Kühlturm ist die Kreiselpumpe „Grundfoss (KTTL)“ vorhanden. Das ist eine Pumpe, um die Spülwässer umzuwälzen bzw. in die 10er Grube zurückzuleiten.

Am Kopf des Kühlturmes ist ein Ventilator montiert, der Luft durch den Turm zieht.

Der Durchfluss des NMMO/Wassergemisches wird durch das Regelventil nach der Pumpe „KTTL“ eingestellt. Hierbei wird das Regelventil händisch betätigt.

Die Pumpe „Keller“ wird mit dem Regelventil, das mit dem Füllstandsmesser im Turm verbunden ist, geregelt.

3 STAND DER TECHNIK

In diesem Kapitel sollen die bisher bekannten technischen Grundlagen des Projektes erläutert werden. Am Beginn wird die Kühlturmtechnik allgemein beschrieben. Anschließend folgt die Beschreibung der thermodynamischen Grundlagen. In weiterer Folge werden die für das Projekt wichtigen Punkte der Sicherheit, der Versuchsplanung/Auswertung bzw. der Inbetriebnahme dargestellt.

3.1 KÜHLTÜRME

Nach [2] fallen in der chemischen Industrie große nicht nutzbare Abfallwärmemengen an. Diese Abwärme sollte ohne Beeinträchtigung der Umwelt abgegeben werden.

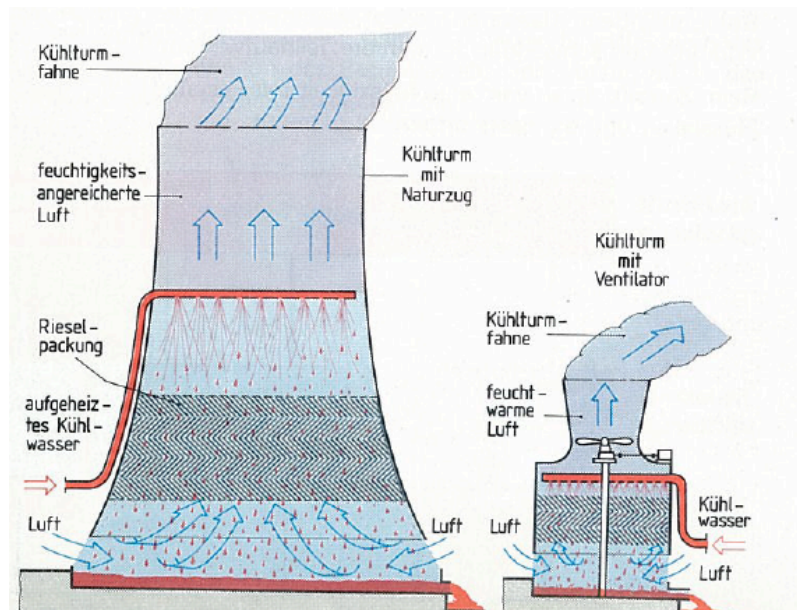


Abbildung 3-1 Kühlturmarten [2]

Es soll ein aufgeheiztes Wasser im Kühlturm abgekühlt werden. Die Abkühlung erfolgt durch die Luft. Um den Stoff- bzw. Wärmeaustausch effizient zu gestalten, ist eine große Oberfläche nötig. Dies erfolgt durch eine Zerstäubung mittels Sprühdüsen, sowie durch das Herabrieseln in einer Packung. Ebenfalls wird der

Wärmeaustausch durch eine Teilverdunstung des Wassers noch verbessert, da die Verdampfungswärme entzogen wird.

Es gibt zwei Arten von Kühltürmen (siehe Abbildung 3-1), den Kühlturm mit Naturzug (geringerer energetischer Aufwand) der dementsprechend groß gebaut werden muss, und es gibt den Kühlturm mit Ventilator. Bei beiden Türmen verlässt das Wasser den Kühlturm in reiner Form.

Die grundsätzlichen Vorteile eines Kühlturms mit Ventilator zum Naturzug sind somit:

- Geringerer Platzbedarf
- Regelung

Mit einem Kühlturm gibt es weiters die Möglichkeit Eindampfkosten zu sparen. Da die Eindampfkosten in der EDA hoch sind, wurde eine Studie durchgeführt, um diese durch den Einsatz eines Kühlturms zu minimieren.

Ein Kühlturm benötigt Energien in Form von Pump- bzw. Ventilatorantriebsenergie.

Durch die Nützung der Abwärme für den Kühlturm bzw. durch die Aufkonzentrierung kann die Eindampfanlage entlastet werden. Für die Durchführung der Studie sind die Grundlagen der Thermodynamik essentiell.

3.2 ENERGIEN UND DER VERDUNSTUNGSPROZESS

„Energie ist eine physikalische skalare Größe, die notwendig ist um Substanzen zu erwärmen und zu komprimieren, Massen zu beschleunigen oder entgegen einer Kraft zu bewegen und um elektrischen Strom fließen zu lassen. Häufig wird Energie einfach auch als die Fähigkeit, mechanische Arbeit zu verrichten, beschrieben. Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet werden (Energieerhaltungssatz, 1. Hauptsatz der Thermodynamik). Mit Energieerzeugung im technischen Sinne wird die Erzeugung einer bestimmten Energieform aus einer anderen Energieform ausgedrückt. Die Umwandlung von Energieformen ineinander stellt die Grundlage der Nutzung von Energie durch den Menschen dar. Verschiedene Energieformen sind beispielsweise kinetische Energie (Bewegungsenergie), potentielle Energie (Energie

aufgrund der Lage in einem Kraftfeld, z.B. dem Schwerfeld der Erde), thermische Energie (Wärmeenergie) oder elektrische Energie.

Nun kann Energie jedoch nicht unbegrenzt von einer in eine andere Form und wieder zurück umgewandelt werden. Ein Maß für die Irreversibilität dieser Umwandlungen und somit die Wertigkeit einer Energieform ist die Entropie¹. Bei der Umwandlung von höherwertigerer Energie (z.B. elektrischer Energie) zu niedrigwertigerer Energie (z.B. Wärmeenergie bei Umgebungstemperatur) nimmt die Entropie zu. Zustandsänderungen mit großer Entropiezunahme lassen sich nur schwer wieder rückgängig machen. Das Prinzip, dass gesamt gesehen die Entropie immer zunimmt und einem Maximum entgegenstrebt, wird als zweiter Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet.

Ein mehr oder weniger großer Teil der Energie wird also bei einer Umwandlung immer soweit entwertet, dass er de facto „verlorengegangen“ ist. Dadurch kann dieser Energieanteil praktisch nicht mehr umgewandelt und genutzt werden“.[13]

Nach [1] ist der Verdunstungsprozess ein thermodynamischer Ausgleichsprozess, welcher stets dem Gleichgewicht zustrebt und irreversibel ist. An der Wasseroberfläche erfolgt ein Phasenwechsel, von wo aus Dampf in die Luftschicht eindringt. Ebenso tritt der Dampf wieder in den Wasserverband ein. Dieser ständige Phasenwechsel (molekulare Diffusion) hängt von den jeweiligen Energien der Moleküle in den jeweiligen Phasen ab.

In der Grenzschicht zwischen der Luft und dem Wasser erfolgen somit Stoff-, Energie- sowie Wärmeaustausch.

Laut der Extremalbedingung der chemischen Thermodynamik wird ein Gleichgewicht angestrebt. Dieses wird im Kühlturm aber nicht erreicht. Hierzu müsste vor allem die Austauschzeit- bzw. fläche um ein Vielfaches vergrößert werden.

¹ Die Entropie ist ebenso wie die Energie eine physikalische Größe und wurde ursprünglich in der Thermodynamik eingeführt. Heute kann sie aus der statistischen Mechanik und der Quantenphysik abgeleitet werden.

3.2.1 Wärmeströme in der Kühlturmtechnik

In der Kühlturmtechnik wird der gesamte Wärmestrom in einen latenten und einen sensiblen Wärmestrom aufgeteilt (siehe Gleichung (3-1)), wobei der sensible Wärmestrom als fühlbarer Wärmestrom (Temperaturänderung) bezeichnet wird.

Der latente Wärmestrom zieht keine Temperaturänderung mit sich (Wärme durch den Phasenübergang). Die Beladung (auch spezifische Luftfeuchte) der Luft wird in Form von x ausgedrückt (kg Wasser pro kg Luft). Der Wärmestrom ergibt sich aus dem Massenstrom (m_{trl}) und der Enthalpieänderung der Luft Δh (genaue Indizes siehe Nomenklatur).

$$\begin{aligned}
 \dot{Q} &= \dot{Q}_{sens} + \dot{Q}_{lat} \\
 \dot{Q}_{sens} &= \Delta h v_0 \cdot m_{trl} \cdot (x_2 - x_1) \\
 \dot{Q}_{lat} &= (c p_L \cdot T_L + (x_2 - x_1) \cdot c p_d \cdot T_L) \cdot m_{trl} \\
 \dot{Q} &= m_{trl} \cdot \Delta h_{(1+x)}
 \end{aligned}
 \tag{3-1}$$

3.2.2 Grundlagen feuchte Luft

In der Gleichung (3-2) sind die wichtigsten Grundlagen bei Berechnungen mit der feuchten Luft aufgelistet. Am Beginn sieht man die relative Luftfeuchtigkeit (φ), die in der Trocknungstechnik häufig Verwendung findet. Sie beschreibt den Anteil an Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit zur Sättigung in der Luft in Prozent.

Der nächste wichtige Zusammenhang ist mit der Antoine-Gleichung beschrieben. Sie gibt den Sättigungsdampfdruck (p_D =Partialdruck von Wasser) als Funktion der Temperatur (T) wieder. Bei der Verwendung der Antoine-Gleichung, welche aus der Clausius-Clapheyronschen- Gleichung abgeleitet wurde, ist auf die Verwendung der richtigen Einheiten großer Wert zu legen. In dieser Arbeit wird der Logarithmus, die Druckeinheit hPa=mbar sowie die Temperatureinheit °C verwendet.

Weiters werden noch wichtige Stoffdaten der Luft und des Wasserdampfes benötigt, um die Enthalpie (setzt sich aus latenter und sensibler Enthalpie zusammen) der Luft

bzw. des NMMO/Wassergemisches zu ermitteln, um die Energiebilanz am Versuchskühlturm zu vervollständigen.

$$\varphi = \frac{p_d}{p_d^s}$$

$$\lg p_d^s = A - \frac{B}{C - T}$$

$$p_d^s [\text{hPa}]$$

$$T [^\circ\text{C}]$$

$$A = 8,19625$$

$$B = 1730,46$$

$$C = 233,42$$

(3-2)

$$x = \frac{m_d}{m_L} = \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{irL}}} = \frac{M_d}{M_L} \cdot \frac{p_d}{p - p_d}$$

$$h_{(1+x)} = c_{pL} \cdot T_L + x \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_L)$$

$$c_W = 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$c_{pd} = 1,81 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$c_{pL} = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

3.2.3 Der Kühlturmprozess

Nach [1] wird der Kühlturmprozess als stationärer Prozess in einem offenen System gesehen. Über die Systemgrenzen hinweg werden ständig große Stoffströme an Wasser bzw. Luft bewegt. Gleichgewicht stellt sich nur an den Phasengrenzen ein, ansonsten herrscht ein Gefälle hinsichtlich Temperatur, Konzentration sowie Kinetik. Die Zustandsgrößen für den Prozess sind Druck, Volumen, Temperatur, Konzentrationen und die Enthalpie.

Grundsätzlich wird der in dieser Arbeit verwendete Kühlturmtyp dem Grundprozess (1) zugeordnet (siehe Abbildung 3-2, Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4).

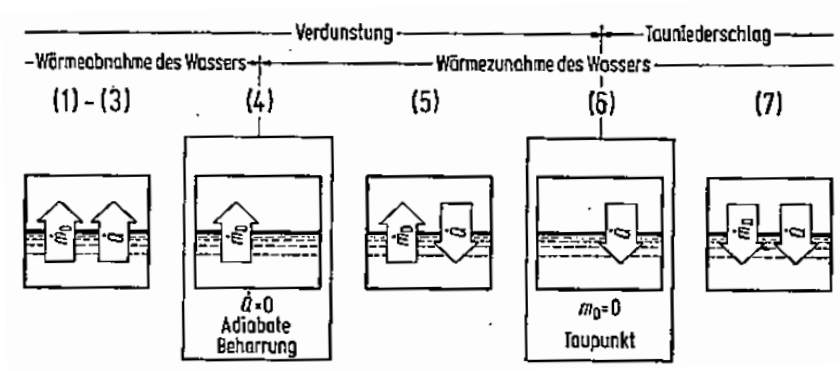


Abbildung 3-2 Verdunstung vs. Tauniederschlag [1]

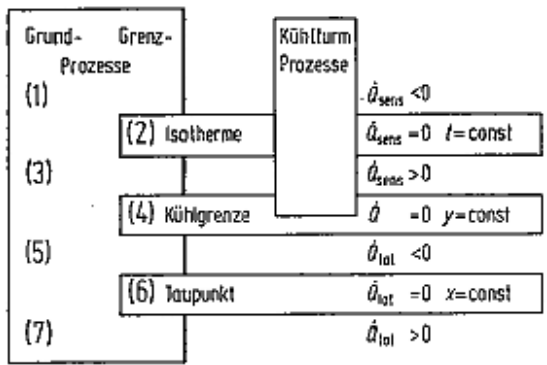


Abbildung 3-3 Zuordnung Kühlturmprozesse [1]

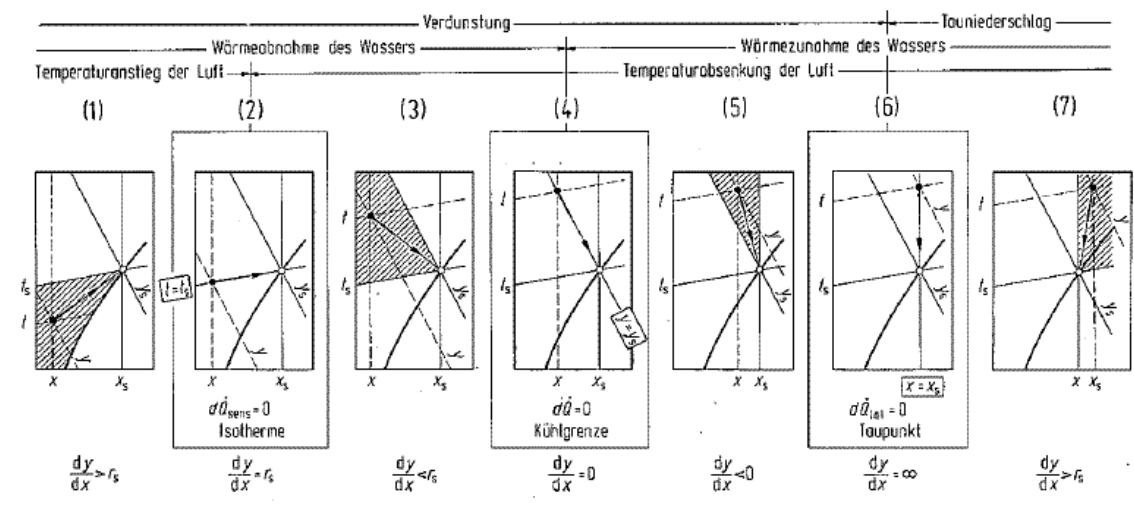


Abbildung 3-4 Verdunstung vs. Tauniederschlag im h-x- Diagramm [1]

Die Luft nimmt Wasser und Wärme auf. Die sensible Wärmemenge repräsentiert also den Wärmeverlust des Kühlwassers bzw. die Wärmeaufnahme der Luft im Kühlturm bezogen auf die Temperaturänderung. Die latente Wärmeänderung beschreibt die Wärmemenge in Form des verdunsteten Anteils an Wasser.

Um den Kühlturmprozess bilanzieren zu können, ist dieser als Mischungsprozess zu sehen. Die Grundlagen für eine Bilanzierung liegen dementsprechend in einer Stoff- bzw. Energiebilanz, wobei die Systemgrenzen um den ganzen Kühlturm gelegt werden (siehe Abbildung 3-5).

Stoffbilanzen

Trockene Luft $\dot{m}_L = \text{const.}$

Wassergehalt der Luft

$$\dot{m}_L x_0 + \dot{m}_D = \dot{m}_L x_n$$

$$\dot{m}_D = \dot{m}_L (x_n - x_0) .$$

Kühlwasserstrom

$$\dot{m}_{wn} - \dot{m}_D = \dot{m}_{w0}$$

$$\dot{m}_D = \dot{m}_{wn} - \dot{m}_{w0} .$$

Wärmebilanz

$$\dot{m}_L h_0 + \dot{m}_{wn} h_{wn} = \dot{m}_L h_n + \dot{m}_{w0} h_{w0} .$$

Abbildung 3-5 Bilanz am Kühlturm [1]

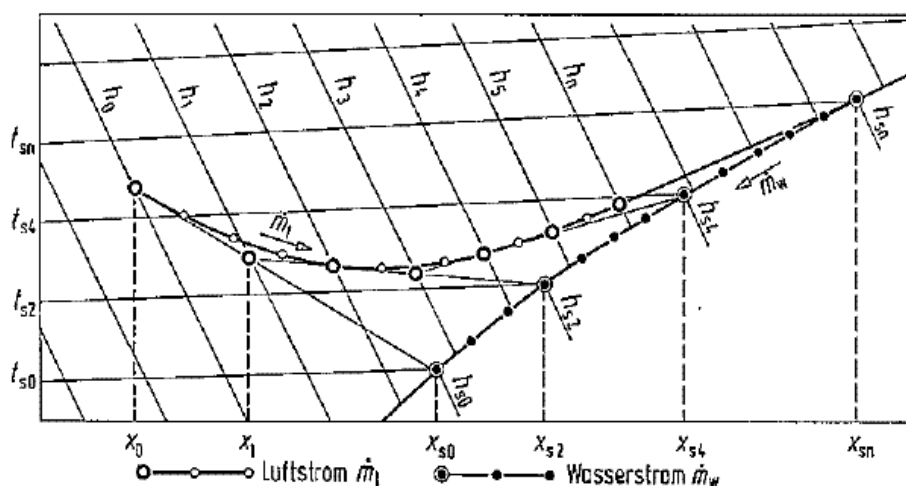


Abbildung 3-6 h-x- Diagramm nach Mollier [1]

In der Abbildung 3-6 ist der Kühlturmprozess in Teilschritten eingezeichnet.

Um ein eventuelles Scale-up zu ermöglichen, wird auf die in der Kühlturmtechnik verwendete Merkel-Zahl zurückgegriffen. Nach Integrierung dieser erhält man die Austauschleistung, sowie den Wärmestrom von einem Medium zum anderen. Nach den Versuchen soll diese verwendet werden, um ein Modell für weitere Berechnungen zu erhalten.

In der Gleichung (3-3) sind die Hintergrundinformationen zur Merkel-Zahl (siehe [1]) aufgelistet.

$$\begin{aligned}
 d\dot{Q}_{lat} &= \sigma \cdot (x_s - x) \cdot \Delta h v_s \cdot dA \\
 T_{L,s} &< T_L \\
 d\dot{Q}_{sens} &= \alpha \cdot (T_{L,s} - T_L) \\
 d\dot{Q} &= d\dot{Q}_{lat} + d\dot{Q}_{sens} \\
 d\dot{Q}_W &= c_w \cdot m_W \cdot dT_W \\
 T_{L,s} - T_L &= \frac{h_{L,s} - h_L - x_s \cdot \Delta h v_0 + x_L \cdot \Delta h v_0}{c p_L} \\
 d\dot{Q} &= \sigma \cdot dA \cdot \left(\frac{\alpha}{c p_L \cdot \sigma} \cdot h_{L,s} - h_L - x_s \cdot \Delta h v_0 + x_L \cdot \Delta h v_0 + (x_s - x) \cdot \Delta h v_s \right) \\
 Le = 1 &= \frac{\alpha}{c p_L \cdot \sigma} \\
 \Delta h v_s &= \Delta h v_0 \\
 d\dot{Q} = d\dot{Q}_W &= c_w \cdot m_W \cdot dT_W = \sigma \cdot dA \cdot (h_{L,s} - h_L) \\
 \int \frac{c_w \cdot dT_W}{h_{L,s} - h_L} &= \int \frac{\sigma \cdot dA}{m_W} = \text{Merkel_Zahl}
 \end{aligned} \tag{3-3}$$

3.3 SICHERHEITSTECHNIK

Nach [10] sollte eine Gefahren- und Risikoanalyse ein fixer Bestandteil in einem Projektablauf sein.

Somit ist eine Sicherheitsanalyse für das Kühlturmprojekt unerlässlich. In der Praxis gibt es viele Verfahren, die Anwendung finden. Erst die Erfahrung ermöglicht eine richtige Wahl bzw. Kombination der zahlreichen Verfahren. In dieser Arbeit soll das in der chemischen Industrie übliche PAAG/HAZOP-Verfahren (normalerweise in Teamform angewendet) in Kombination mit der FMEA-Analyse verwendet werden. Damit ist die Sicherheit gewährleistet.

An dieser Stelle soll eine kurze Beschreibung des Ablaufes der Sicherheitsanalyse gegeben werden.

„**PAAG/HAZOP**“ bedeutet **P**rognose von Störungen - **A**uffinden von Störungen - **A**bschätzen der Auswirkungen – **G**egenmaßnahmen / **H**azard and **O**perability Studies. Das Verfahren wird verwendet, um hypothetische Störungen aller Art aufzufinden.

Hierbei soll zuerst das Verfahren beschrieben und in weiterer Folge Sollfunktionen (was sollte der Prozess erledigen) erarbeitet werden. Diese Sollfunktionen werden mit vorgegebenen Leitworten verglichen (siehe Abbildung 3-7). Die entdeckten Störungen sollen auf ihre Realitätsmöglichkeit überprüft werden.

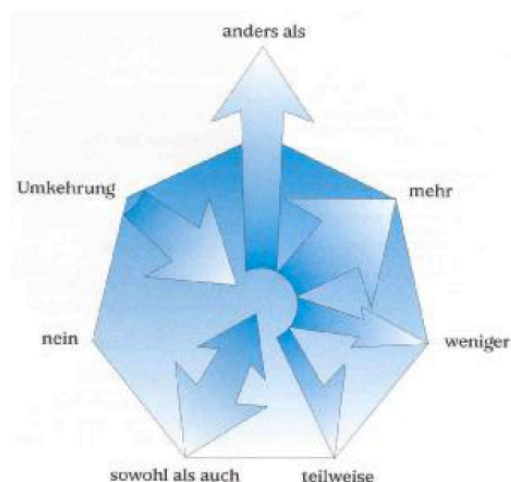


Abbildung 3-7 Leitworte des PAAG/HAZOP Verfahrens [10]

In dieser Arbeit werden sämtliche realistische Störungen mit der „FMEA“ (Failure Mode, Effects and Analysis) betrachtet, da die FMEA ideal zur Risikobetrachtung geeignet ist.

Die RPZ (Risikoprioritätszahl) setzt sich aus den Fehlerursachen, Fehlerfolgen und den Verhütungs- sowie Prüfungsmaßnahmen und der Entdeckbarkeit (vor Schadensfällen) zusammen (siehe Abbildung 3-8 und Gleichung (3-4)).

Fehlerursachen Auftreten	Fehlerfolgen Bedeutung	Verhütungs- und Prüfmaßnahmen Entdeckbarkeit (vor Schadenseintritt)
A	B	E
keine 1	keine Auswirkung 1	hoch 1
sehr gering 2-3	geringe Auswirkung 2-3	mäßig 2-5
gering 4-6	mäßig schwere Auswirkung 4-6	gering 6-8
mäßig 7-8	schwere Auswirkung 7-8	sehr gering 9
hoch 9-10	äußerst schwerwiegende Auswirkung 9-10	keine 10

Abbildung 3-8 Risikoprioritätszahl [10]

$$RPZ = A \cdot B \cdot E \tag{3-4}$$

Wenn in diesem Fall die Risikoprioritätszahl „größer gleich 8“ ist, sind entsprechende Maßnahmen zu setzen.

Die sicherheitstechnischen Betrachtungen inklusive der Risikoprioritätszahlen, welche größer gleich 8 sind und die Gegenmaßnahmen sind im Kapitel 5.1 beschrieben.

3.4 VERSUCHSPLANUNG UND AUSWERTUNG

„Empirisch Arbeiten heißt für einen Forscher, Erkenntnisse aus Beobachtungen (passiv) oder aus Experimenten (aktiv auf den Forschungsgegenstand einwirken und dann beobachten) zu gewinnen.“[4]

Nach [4] sind empirische Versuchsarbeiten nach folgendem Ablauf aufgebaut:

1. Formulierung des Problems
2. Angabe der Genauigkeitsanforderungen
3. Auswahl des statistischen Modells für die Planung und Auswertung
4. Optimale Planung des Versuches
5. Durchführung des Versuches
6. Statistische Auswertung der Beobachtungsergebnisse
7. Interpretation der Ergebnisse

Man muss zwischen sequentiellen und nicht sequentiellen Versuchsarbeiten unterscheiden. Beim Kühlturmversuch handelt es sich um einen nicht sequentiellen Versuch mit drei getrennten Phasen

- Planung der Versuche (1-4)
- Durchführung der Versuche (5)
- Analyse der Ergebnisse (6-7)

Bevor mit der grundsätzlichen Planung begonnen wird, sollte das „WWW“ – Prinzip angewendet werden. Es sind folgende Fragen zu beantworten:

- **W**as will ich wissen?
- **W**ie genau will ich es wissen?
- **W**ofür will ich es wissen?

Somit kann ein Versuch genau deklariert, optimal vorbereitet, und aussagekräftig geplant bzw. durchgeführt werden.

In dieser Arbeit soll das erarbeitete Berechnungsfile als Planungshilfe, Auswertungshilfe sowie als Diskussionsplattform mit diversen Anpassungen (Annahmen werden durch empirische Zusammenhänge ersetzt) nach den Versuchen bzw. letztendlich als Grundlage für ein Scale-up Modell dienen.

3.5 INBETRIEBNAHME

„Inbetriebnahme ist die Überführung einer Anlage von dem mit Abschluss der Montage erreichten Zustand in den vom Projekt her vorgesehenen Betriebszustand.“[14]

Der Inbetriebnahmeablauf kann nach [14] in folgende Aktivitäten aufgeteilt werden:

- Montagekontrollen und Inspektionen
- Schulung des Bedienungs- und Wartungspersonals
- Reinigen der Anlage
- Ausblasen der Anlage
- Spülen der Anlage
- Inbetriebnahme der Betriebsmittelsysteme
- Abnahmeprüfung
- Prüfung von Druckbehältern und Rohrleitungen
- Funktionsprüfungen
- Funktionsprüfungen der Maschinen
- Funktionsprüfungen der MSR-, E- und Analysetechnik
- Trockenheizen der Öfen
- Einfüllen und Vorbehandlung der Katalysatoren, Adsorbentien u.ä.
- Dichtheitsprüfung und Inertisierung
- Durchführung der Inbetriebnahme
- Hauptetappen der Inbetriebnahme
- Anfahren der Anlage
- Stabilisieren und Hochfahren der Anlage
- Einfahren der Anlage
- Abfahren, Reparieren, Wiederanfahren der Anlage
- Vorbereitung und Durchführung der Leistungsfahrt (Garantieversuch)

4 ENERGIEN AM VERSUCHSKÜHLTURM

Um ein erfolgreiches Berechnungsmodell erstellen zu können, wird am Beginn ein theoretisches Modell erstellt und anschließend mit den Versuchsergebnissen validiert. Wesentlich ist die Erstellung einer Energiebilanz am Kühlturm sowie die Bilanzgrenzen um den Kühlturm (siehe Abbildung 4-1).

Im Folgenden werden die Energien, die in die Bilanzgrenze des Kühlturms eintreten bzw. austreten, aufgezählt:

Eintritt:

- H_{1W} in Form von NMMO/Wassergemisch
- E_a in Form von Pumpenenergie der Umwälzpumpe
- H_{1L} in Form von Umgebungsluft

Austritt:

- H_{2W} in Form von NMMO/Wassergemisch
- H_{2L} in Form von beladener Umgebungsluft



Abbildung 4-1 Energiebilanz am Kühlturm (Bilanzgrenzen am Kühlturm)

In der Gleichung (4-1) ist die grundlegende Energiebilanz an den Bilanzgrenzen aufgelistet.

$$\begin{aligned}
 H1W + Ea + H1L &= H2W + H2L \\
 \dot{m}_{1W} \cdot c_W \cdot T_{W1} + \dot{m}_{1W} \cdot g \cdot z + \dot{m}_{trL} \cdot h_{(1+x)1} &= \dot{m}_{2W} \cdot c_W \cdot T_{W2} + \dot{m}_{trL} \cdot h_{(1+x)2} \\
 \dot{m}_{2W} &= \dot{m}_{1W} - \dot{m}_V \\
 \dot{m}_V &= \dot{m}_{trL} \cdot \Delta x \\
 \dot{m}_{2W} &= \dot{m}_{1W} - \dot{m}_{trL} \cdot \Delta x
 \end{aligned} \tag{4-1}$$

Da in der Kühlturmspezifikation die Luftgeschwindigkeit (erzeugt durch den Ventilator) im Kühlturm nicht angegeben war, ist zuerst der Massenstrom und daraus die Luftgeschwindigkeit des Kühlturms zu berechnen (siehe Gleichung (4-3)).

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{1W} \cdot (c_W \cdot T_{W1} + g \cdot z) + \dot{m}_{trL} \cdot h_{(1+x)1} &= (\dot{m}_{1W} - \dot{m}_V) \cdot c_W \cdot T_{W2} + \dot{m}_{trL} \cdot h_{(1+x)2} \\
 \dot{m}_{1W} \cdot (c_W \cdot T_{W1} + g \cdot z - c_W \cdot T_{W2}) &= \dot{m}_{trL} \cdot (h_{(1+x)2} - h_{(1+x)1} - \Delta x \cdot c_W \cdot T_{W2}) \\
 \dot{m}_{trL} &= \dot{m}_{1W} \cdot \frac{(c_W \cdot T_{W1} + g \cdot z - c_W \cdot T_{W2})}{\left((c_{pL} \cdot T_{L2} + x_2 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L2})) - (c_{pL} \cdot T_{L1} + x_1 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L1})) - (x_2 - x_1) \cdot c_W \cdot T_{W2} \right)} \\
 x_2 &= \frac{M_d}{M_L} \cdot \frac{\left(10^{\frac{8,19625 - 1730,46}{233,42 + T_{2L}}} \right) \cdot 10^{-3}}{p - \left(\left(10^{\frac{8,19625 - 1730,46}{233,42 + T_{2L}}} \right) \cdot 10^{-3} \right)}
 \end{aligned} \tag{4-2}$$

$$\dot{m}_{trL} = \dot{m}_{1W} \cdot \frac{(c_W \cdot T_{W1} + g \cdot z - c_W \cdot T_{W2})}{\left(\left(c_{pL} \cdot T_{L2} + \frac{M_d}{M_L} \cdot \frac{\left(10^{\frac{8,19625 - 1730,46}{233,42 + T_{2L}}} \right) \cdot 10^{-3}}{p - \left(\left(10^{\frac{8,19625 - 1730,46}{233,42 + T_{2L}}} \right) \cdot 10^{-3} \right)} \right) \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L2}) - \left(c_{pL} \cdot T_{L1} + x_1 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L1}) - \left(\frac{M_d}{M_L} \cdot \frac{\left(10^{\frac{8,19625 - 1730,46}{233,42 + T_{2L}}} \right) \cdot 10^{-3}}{p - \left(\left(10^{\frac{8,19625 - 1730,46}{233,42 + T_{2L}}} \right) \cdot 10^{-3} \right)} \right) - x_1 \right) \cdot c_W \cdot T_{W2} \right)}$$

$$v = \frac{\dot{m}_{trL}}{\rho_L \cdot F}$$

Mit der berechneten Luftgeschwindigkeit wird mittels Umformung der Bilanz der Luftzustand am Austritt des Kühlturms berechnet (wie in Gleichung (4-3) und (4-4) dargestellt ist).

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{trL} &= \dot{m}_{IW} \cdot \frac{(c_w \cdot T_{W1} + g \cdot z - c_w \cdot T_{W2})}{\left((c_{pL} \cdot T_{L2} + x_2 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L2})) - (c_{pL} \cdot T_{L1} + x_1 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L1})) - (x_2 - x_1) \cdot c_w \cdot T_{W2} \right)} \\
 c_{pL} \cdot T_{L2} + x_2 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L2}) - (x_2 - x_1) \cdot c_w \cdot T_{W2} &= \frac{\dot{m}_{IW}}{\dot{m}_{trL}} \cdot (c_w \cdot T_{W1} + g \cdot z - c_w \cdot T_{W2}) + (c_{pL} \cdot T_{L1} + x_1 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L1})) \\
 x_2 &= \frac{\left(\frac{\dot{m}_{IW}}{\dot{m}_{trL}} \cdot (c_w \cdot T_{W1} + g \cdot z - c_w \cdot T_{W2}) + (c_{pL} \cdot T_{L1} + x_1 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L1})) - c_{pL} \cdot T_{L2} - x_1 \cdot c_w \cdot T_{W2} \right)}{(\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L2} - c_w \cdot T_{W2})}
 \end{aligned} \tag{4-3}$$

$$p_d = \frac{p \cdot \frac{M_L}{M_d} \cdot x_2}{1 + \frac{M_L}{M_d} \cdot x_2} \tag{4-4}$$

$$\varphi = \frac{p_d}{p_d^s}$$

Mit dem Übergang vom Wasser in den Luftstrom kann somit die Aufkonzentrierung des NMMO errechnet werden.

In den Versuchen sollen die Annahmen der Bilanz bestätigt, sowie neue Zusammenhänge in die Bilanz integriert werden, um ein Scale-up zu ermöglichen.

Annahmen:

- φ_2 spezifische Luftfeuchte am Austritt des Kühlturmes
- Temperaturunterschied (Zwischen NMMO/Wassergemischeintrittstemperatur und Luftaustrittstemperatur (Iterationsverfahren mittels Anpassung der Temperaturen))

Es sollen die Temperaturzusammenhänge mittels Versuche ermittelt werden. Ebenso soll die Geschwindigkeit der Luft an Hand von Messungen eruiert werden.

5 VERSUCHSPLANUNG UND SICHERHEITSTECHNIK

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse dargestellt, sowie die Versuchsplanung erläutert werden, um eine nahtlose Überleitung zur Versuchsdurchführung zu geben.

5.1 SICHERHEITSTECHNIK

Die Sicherheitstechnik wird nach dem im Kapitel 3.3 erläuterten Ablauf durchgeführt.

5.1.1 Verfahrensbeschreibung

Es soll ein NMMO/Wassergemisch im Kühlturm aufkonzentriert werden. Die Pumpe „Druckerhöhung“ fördert das Gemisch aus der 10er Grube in den Turm. Die jeweilige Fördermenge wird über ein handbetriebenes Regelventil bzw. über eine Füllstandsmessung im Turm geregelt. Durch die Wasserverdunstung im Kühlturm wird die Konzentration an NMMO erhöht.

Das aufkonzentrierte NMMO/Wassergemisch wird zurück in die 10er Grube gefördert.

5.1.2 Sollfunktion vs. Leitworte

In der Abbildung 5-1 wird die Sollfunktion des Kühlturms mit den Leitworten verglichen. Die relevanten Störungen werden mit der FMEA- Analyse im Unterpunkt 5.1.3 behandelt.

Erkennen von Gefahrenquellen	Sollfunktion	Betreibe den Kühlturm mit dem NMMO/Wasser- Gemisch						
		Leitwort	<i>Nein</i>	<i>anders als</i>	<i>Umkehrung</i>	<i>mehr</i>	<i>weniger</i>	<i>teilweise</i>
	Hypothetische Störung	Kein NMMO/Wasser im Turm	Keine Luft angesaugt,	entgegengesetzte Fließrichtung	Maximale Förderung der Pumpen,	Minimale Förderung	Umwälzpumpe stockt, erste Pumpe stockt,	NMMO hochprozentig
Bewertung von Gefahrenquellen	Realisierbar?	Pumpen fördern nicht (Stromausfall, Blitz), Grube leer, Leck in der Leitung	Störung am Ventilator,	zurück in Grube, bzw. ins Becken	Zerstörung von Rohren- Schläuchen, Turm überfüllt	Zu hohe Erwärmung im Wärmetauscher, NMMO- Austrag über den Kühlturm	Pumpen fördern nicht	aus der Grube
	Realistische Störung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
	Relevant?	Siehe FMEA	Nein (Testlauf)	Nein (zurück)	Siehe FMEA	Siehe FMEA	Nein (Testlauf)	

Abbildung 5-1 PAAG/HAZOP Gefahrenanalyse

5.1.3 Risikoprioritätszahlen größer gleich 8 und Gegenmaßnahmen

Tabelle 5-1 Turm bzw. Leitung Leck

A	B	C	RPZ
2	7	1	14

In Fall einer Leckage bzw. Undichtheit (RPZ siehe Tabelle 5-1) am Kühlturm wurde eine Arbeitsanweisung für die Wartefahrer geschrieben. In dieser wurden ständige Rundgänge und Inspektionen der Leitungen bzw. des Kühlturms festgelegt. Im Falle einer Störung wurde eine sofortige Abschaltung des Kühlturmes bzw. eine Verständigung der verantwortlichen Personen des Kühlturmprojektes festgelegt.

Tabelle 5-2 minimale Förderung somit zu hohe Wärmeenergie am Wärmetauscher

A	B	C	RPZ
2	7	2	28

Nach Tabelle 5-2 ist am Wärmetauscher eine potentielle Gefahrenquelle gegeben. Aufgrund des Versuchsbetriebes war es nicht möglich, eine sicherheitstechnische Regelung zu installieren. Somit wurde im Falle einer Beheizung des NMMO/Wassergemisches eine ständige Kontrolle vor Ort festgelegt.

Tabelle 5-3 Aerosolaustrag

A	B	C	RPZ
7	7	7	343

In der Tabelle 5-3 ist das hohe Risiko im Zusammenhang mit dem Aeosolaustrag aufgelistet. Aufgrund der nicht vorhandenen Informationen bezüglich eines NMMO Aeosolaustritts am Kopf des Turms wurde eine wöchentliche Aerosolmessung festgelegt.

Tabelle 5-4 hochprozentiges NMMO

A	B	C	RPZ
2	7	1	14

Aufgrund des ausgereiften Prozessleitsystems ist das Risiko, hinsichtlich hochprozentigen NMMO in die Versuchsanlage, laut Tabelle 5-4 leicht erkennbar. Im Falle eines Störfalles soll die Versuchsanlage ebenfalls abgeschaltet werden.

Nachdem der Punkt Sicherheit abgeschlossen wurde, liegt der Fokus an der Versuchsplanung.

5.2 GRUNDLEGENDE PUNKTE DER VERSUCHSPLANUNG

Im ersten Schritt der Versuchsplanung wird die Frage „Was will ich wissen?“ gezielt beantwortet.

Im Laufe des Versuches sollen folgende Punkte ermittelt werden:

- Leistung des Kühlturms
- NMMO-Ausstoß am Kühlturmaustritt
- Verkeimung (Biozidbedarf)
- Parameter für Scale-up
- Wasserverdunstung (Aufkonzentrierung)

Um diese Punkte gezielt zu beantworten, werden folgende Möglichkeiten in den Kühlturmfahrweisen variiert:

- Temperatur NMMO/Wassergemisch variieren
- Massenstrom NMMO/Wassergemisch variieren
- Luft als nicht beeinflussbar gegeben (aktuelle Lufttemperatur und Feuchtigkeit)
- Tropfenabscheiderunterstützung (Tuch)

Mit den diversen Fahrweisen soll die im Vorfeld ermittelte Bilanz bestätigt bzw. ergänzt werden.

Ebenso soll eine klare Aussage über eine Integrierung des Kühlturms in den bestehenden Anlagenprozess getätigt und somit die erwarteten Energieeinsparungspotentiale bestätigt werden.

5.2.1 Versuchserwartungen

Anhand der Erkenntnisse aus der Theorie und des Berechnungsmodells soll mittels Versuchsreihen eine Bestätigung der Versuchserwartungen erfolgen.

Laut Theorie soll das Gefälle, somit der Konzentrationsgradient zwischen NMMO/Wasser und Luft möglichst groß sein, um die Konzentrationserhöhung zu maximieren.

Um dies zu erreichen, sollen die Parameter T , p_D sowie x der Luft am Austritt des Kühlturms hoch sein. Beeinflussbar ist dies durch die Variierung der Temperatur, in diesem Fall durch die Erwärmung des NMMO/Wassergemisches am Kühlturmeintritt. Ebenfalls sollten die Parameter T , p_D sowie x der Luft am Kühlturmeintritt niedrig sein. Das ist deutlich schwieriger zu variieren, da die Umgebungsluft als nicht beeinflussbarer Parameter gilt. Um im kurzen Versuchsintervall von rund einem Monat verschiedene Umgebungsluftfaktoren zu erhalten, wurden Nacht-, Früh- bzw. Abendversuche durchgeführt.

Somit ergeben sich folgende wichtige Aussagen für die Versuche:

- Abfahren vieler Betriebspunkte
- Variierung der Massenströme und Eingangstemperaturen
- Betrachtung der NMMO-Aerosolbelastung am Austritt des Kühlturms

5.2.2 Auswahl des statistischen Modells für die Planung und Auswertung

Für die Planung und Auswertung soll das Berechnungsfile (siehe Anhang5) verwendet werden, wobei im Anschluss der Versuche das Berechnungsmodell an neu gewonnene Parameter angepasst werden soll (siehe Anhang6).

Unter Berücksichtigung der oben genannten Punkte soll die optimale Versuchsplanung durchgeführt werden. Zum einen werden die Versuche terminlich eingeteilt (siehe Anhang8). Zum anderen wird die genaue Probennahme festgelegt. Letztendlich wird noch eine präzise Inbetriebnahme festgelegt.

5.3 VERSUCHSAUFBAU/MESSUNGEN

Der Versuchsaufbau (Fließbild Testlauf Siehe Anhang4) und die diversen Messungen sind in der Abbildung 5-2 aufgelistet und im Anschluss genauer beschrieben.

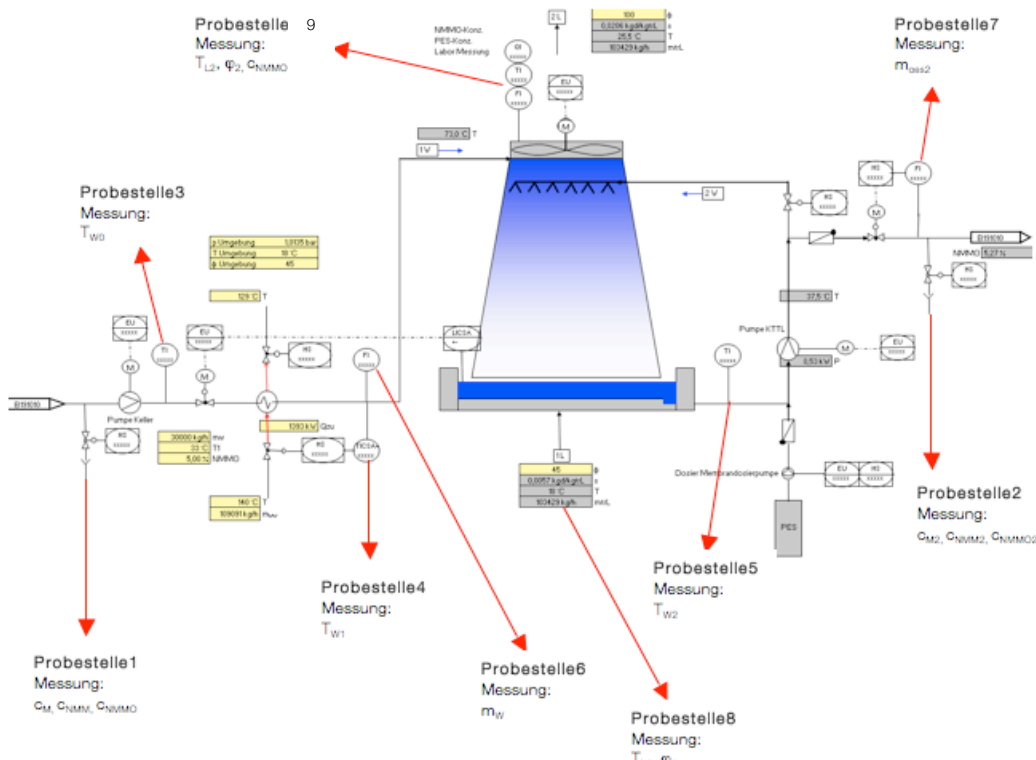


Abbildung 5-2 Versuchsaufbau mit den diversen Messungen

5.3.1 Probestelle 1

Bei der Probestelle 1 handelt es sich um den Zulauf des NMMO/Wassergemisches zum Kühlturm. An dieser Stelle sollen die Konzentrationen an NMMO, NMM, und M gemessen werden ($c_{\text{NMMO}1}$, $c_{\text{NMM}1}$, $c_{\text{M}1}$). Diese Proben werden im Labor ausgewertet.

5.3.2 Probestelle 2

Hierbei handelt es sich um den Ablauf des NMMO/Wassergemisches aus dem Kühlturm zur Grube B191010. Ebenso wie an der Probestelle 1 werden die Konzentrationen an $c_{\text{NMMO}2}$, $c_{\text{NMM}2}$, $c_{\text{M}2}$ im Labor ausgewertet.

5.3.3 Probestelle 3

An der Stelle drei soll die Zulauftemperatur des NMMO/Wassergemisches vor dem Wärmetauscher gemessen werden. Die Temperaturmessung der Temperatur „ $T_{\text{W}0}$ “ soll vor Ort erfolgen.

5.3.4 Probestelle 4

Die Probestelle vier ist zur Temperaturmessung nach dem Wärmetauscher angedacht. $T_{\text{W}1}$ wird ebenso vor Ort gemessen.

5.3.5 Probestelle 5

Hier wird die Kühlturmkreislaufumtemperatur des NMMO/Wassergemisches gemessen. Die Temperatur „ $T_{\text{W}2}$ “ wird direkt am Kühlturm gemessen.

5.3.6 Probestelle 6

Um den Durchfluss zu erhalten, wird vor Ort eine Durchflussmessung zur Ermittlung des Stromes an NMMO/Wassergemisch (m_{W}) zum Kühlturm montiert.

5.3.7 Probestelle 7

Um den Ablaufstrom an NMMO/Wassergemisch ($m_{\text{ges}2}$) in die Grube B191010 zu erhalten, wird an der Stelle sieben eine Durchflussmessung vor Ort montiert.

5.3.8 Probestelle 8

An der Probestelle acht wird der Luftzustand vor dem Turm eruiert. Vor Ort wird die Lufttemperatur T_{L1} sowie die Luftfeuchte φ_1 gemessen.

5.3.9 Probestelle 9

Um für die Bilanz die vollständigen Werte zu erhalten, muss an der Stelle 9 noch der Luftzustand nach dem Turm gemessen werden.

An dieser Stelle soll die Temperaturmessung T_{L2} , sowie die Luftfeuchtemessung φ_2 vor Ort durchgeführt werden.

Einmalig soll die Luftgeschwindigkeit im Kühlturm und somit der Luftdurchfluss im Kühlturm (Ventilator Drehzahl konstant) bestimmt werden.

Ebenso soll an dieser Stelle der Gasstrom für die Aerosolmessung entnommen werden, um die Aerosolkonzentrationen am Austritt des Turms zu erhalten.

5.4 INBETRIEBNAHME DES VERSUCHSKÜHLTURMS

Beim Kühlturmversuch handelt es sich um keine herkömmliche IBN einer Anlage bzw. eines Prozesses.

Da der Versuchskühlturm weder eine Laboranlage noch eine großindustrielle Anlage ist, wird eine kühlturmspezifische IBN durchgeführt.

5.4.1 IBN- Aktivitäten des Versuchskühlturms

Am Beginn der IBN sollen die üblichen Montagekontrollen und Inspektionen am Kühlturm durchgeführt werden. Dies wird mit der Unterstützung eines Montageunternehmens durchgeführt.

Im Anschluss erfolgen die Wasserspiele nach folgendem Ablauf:

- Kontrolle der Drehrichtungen, sowie Aktivierung der Pumpen
- Equipmentverbindungen mit dem PLS überprüfen
- Kühlturmwanne mit Wasser befüllen und auf Dichtheiten überprüfen
- Kühlturmumwälzpumpe einschalten und somit die Rohrleitungen am Kühlturm auf Dichtheiten überprüfen
- Abfluss in die Grube B191010 mit dem vorhandenen Wasser im Kühlturm testen
- Zufluss mit dem NMMO/Wassergemisch aus der Grube B191010 unter genauester Beobachtung testen
- Schulung des Bedienungs- und Wartungspersonals
- Reinigen der Anlage

Weitere Schritte der IBN des Kühlturms sind die Inbetriebnahme der Betriebsmittelsysteme, die Prüfungen der Rohrleitungen, sowie die Funktionsprüfungen, welche größtenteils bei den Wasserspielen kontrolliert wurden. Der letzte Schritt der IBN wird mit dem Anfahren der Anlage vollzogen.

"Der Probetrieb ist das erstmalige Betreiben einer Anlage mit Medium unter Betriebsbedingungen mit dem Ziel, die Fahrweise der Anlage so zu stabilisieren und zu optimieren, dass die vertraglich vereinbarten Leistungsparameter erreicht werden und die Nutzungsfähigkeit der Anlage im Dauerbetrieb gewährleistet ist.

Er beginnt zeitlich mit dem Anfahren und endet mit dem Übergang zum Garantiversuch. Der Probetrieb bestimmt entscheidend den Zeit- und Kostenaufwand für die Inbetriebnahme". [14]

Im Kühlturmfall endet die IBN beim Probetrieb oder eben im Versuchsbetrieb.

6 VERSUCHSDURCH- FÜHRUNG

Es sollen der Versuchsablauf sowie die gewonnenen Ergebnisse dargestellt werden. Ebenso soll eine kurze Darstellung einer Einbindung des Kühlturms in den Gesamtprozess gegeben werden. Diese wird unweigerlich mit einer Amortisationsrechnung belegt, um die Wirtschaftlichkeit einer Einbindung eines Kühlturms zu beschreiben. Die einzelnen Unterpunkte sollen hierbei an Hand von spezifischen Fragen genau erläutert bzw. beantwortet werden.

6.1 VERSUCHSBETRIEB

Aus der Planung ergab sich folgende Fragestellung: „Wie kann ich möglichst viele verschiedene Lufttemperaturen und Luftfeuchten in den Versuchsbetrieb einbinden?“

Die Idee lag darin, Früh-, Spät- bzw. Nachtversuche in einem Zeitraum von einem Monat durchzuführen (daraus ergeben sich viele verschiedene Temperaturen sowie Luftfeuchten).

In dieser Zeit sollen alle möglichen Betriebseinstellungen (Variierung von Durchflüssen und Temperaturen des Zulaufstromes) durchgeführt werden, um möglichst viele aussagekräftige Werte zu erhalten.

Basierend auf dieser Versuchsdurchführung sollen die restlichen Fragestellungen dieser Arbeit gründlich analysiert und bearbeitet werden.

Da sich während der Arbeit herausstellte, dass nur der halbe Tropfenabscheider am Kühlturm vorhanden war, wurde nachträglich ein Vlies am Kopf des Turmes angebracht. Diese Tatsache ergab den Vorteil noch mehr Werte generieren zu können, indem der Druckverlust durch das Vlies einen kleineren Luftzug durch den Kühlturm ergab.

In weiterer Folge ermöglichte dies eine Führung der Versuchsfülle zwischen mit und ohne Vlies (Durchfluss 1,5m/s bzw. 5,1m/s).

6.2 AUFKONZENTRIERUNG DES KÜHLTURMS

Hier lautet die Fragestellung: „Kann ich mit dem Kühlturm NMMO aufkonzentrieren bzw. wenn ja, wie viel?“

In Hinblick auf die Leistungsfähigkeit eines Kühlturms sollte in den Versuchen die genaue Aufkonzentrierung des Kühlturms bei verschiedensten Fahrweisen und Wetterzuständen (siehe Anhang7) dokumentiert werden (siehe Anhang2).

Die Ergebnisse der Abbildung 6-1 sowie der Abbildung 6-2 zeigen eindeutig eine Aufkonzentrierung. Die Durchführung dieser Versuche erfolgten in Batchfahrweise. Man unterscheidet die Aufkonzentrierung mit und ohne Vlies.

Der viel höhere Anteil ohne Vlies (0,65% Aufkonzentrierung pro Stunde) liegt in der mechanischen Austragung der Tropfen begründet, wobei das niedrig konzentrierte NMMO weniger ausgeworfen wird, als das zu 95% vorhandene Wasser (maximale Aufkonzentrierung). Mit Vlies liegt man bei ca. 0,18% Aufkonzentrierung pro Stunde (minimale Aufkonzentrierung).

Aufgrund des großen Druckverlustes eines Filtervlieses ist davon auszugehen, dass bei einer richtigen Auslegung eines Tropfenabscheiders ein plausibler Wert für die Steigung der Geradengleichung inmitten der beiden Steigungen liegt (ca. 0,4% pro Stunde).

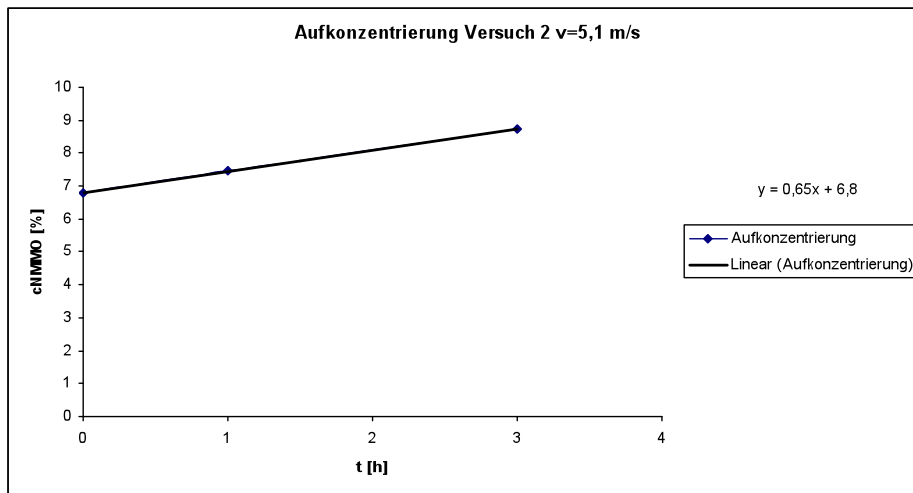


Abbildung 6-1 Aufkonzentrierung bei einer Luftgeschwindigkeit von 5,1m/s

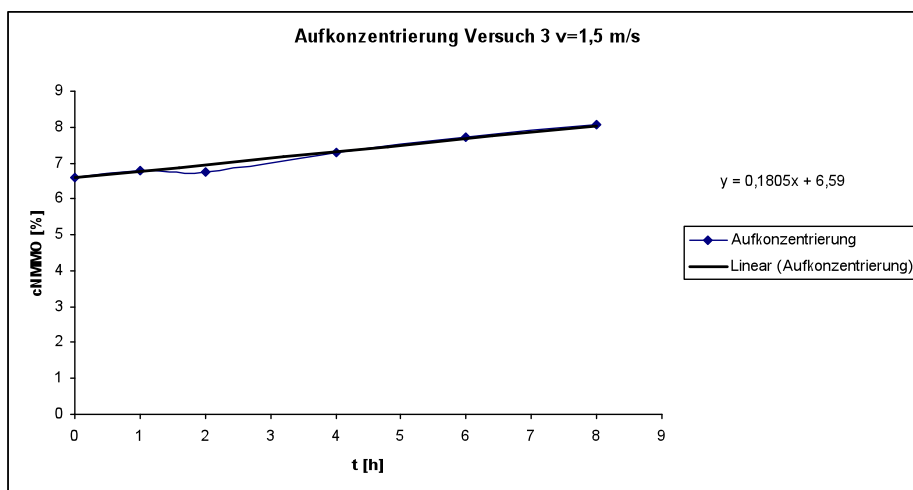


Abbildung 6-2 Aufkonzentrierung bei einer Luftgeschwindigkeit von 1,5m/s

Diese Werte wurden bei allen anderen kontinuierlichen Versuchen bestätigt (siehe Anhang8).

Die Aufkonzentrierung bei den kontinuierlichen Versuchen ist je nach Fahrweise stark von den Durchflussströmen abhängig. Je kleiner der Durchfluss, desto mehr wird aufkonzentriert. Die kontinuierlichen Versuchen ergaben eine Aufkonzentrierung von 0,1-0,65% (Zulaufstrom von 1m³/h -18m³/h).

Die physikalischen Grenzen eines Kühlturms sind in Hinblick auf die Verdunstung ersichtlich. Bei Kühltürmen ergeben sich, im Bezug auf den Eingangsstrom, Verdunstungen von 0,7-2% des Wassers. Die Verdunstungsrate variiert mit den

Lufttemperaturen und den Luftfeuchten sowie der Eingangsstromtemperatur (siehe Anhang7 und Anhang9).

Grundsätzlich ist die Aufkonzentrierung bei geringer Lufttemperatur bzw. Luftfeuchte und hoher Eingangsstromtemperatur am höchsten. Beim Kühlturmversuch ist der NMMO-Zulaufstrom beeinflussbar.

Ebenso wurden die Spaltprodukte des NMMO NMM und M gemessen, um eine mögliche Zersetzung des NMMO im Kühlturm zu analysieren. Hier ergaben sich während der ganzen Versuchsreihe kontinuierliche Anteile an NMM und M. Somit lässt sich auf keine Reaktion der Komponenten NMM und M (in geringen Anteilen vorhanden) schließen.

Nach Bestätigung der Aufkonzentrierung erfolgt eine Beschreibung der Kühlturmmissionen.

6.3 AEROSOLMESSANLAGE

Fragestellung: „Gibt es eine Emittierung von Aerosolen an die Umgebung am Kopf des Kühlturms?“

Die Aerosolmessungen (siehe Anhang1) wurden wöchentlich einmal durchgeführt, wobei auch hier zwischen Versuch mit und ohne Vlies unterschieden werden muss. Beim Versuch ohne Vlies werden beachtliche Mengen (um die 1300ppm) in die Umgebung geschleudert. Dies liegt nicht an der Flüchtigkeit von NMMO sondern am mechanischen bzw. am ungehinderten Austritt der Tröpfchen (siehe Abbildung 6-3).



Abbildung 6-3 Tröpfchenaustrag ohne Filtervlies

Mit Vlies werden nur geringe Mengen an NMMO emittiert (siehe Tabelle 6-1). Somit bestätigt sich die geringe Flüchtigkeit des NMMO. Es muss erwähnt werden, dass im Kühlturmkreislauf nur Höchsttemperaturen an die 30°C erreicht wurden. Bei höheren Temperaturen könnte sich eine größere Flüchtigkeit an NMMO ergeben. Bei der Verwendung eines Kühlturms ergeben sich aufgrund der Restenergienutzung bzw. die Restwärmeenergienutzung keine wesentlich höheren Temperaturen als um 30°C.

Tabelle 6-1 Aeorosoimessung

	Versuchskühlturm
Versuch 2 NMMO konz.	3,3 mg/Nm ³
Versuch 3 NMMO konz.	9,2 mg/Nm ³

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Emissionen in die Luft als minimal betrachtet werden können (genaue Grenzwerte müssen behördlich erst festgelegt werden).

6.4 BIOLOGIE AM KÜHLTURM

Fragestellung: „Wie stark ist das biologische Wachstum im Kühlturm mit einem NMMO/Wassergemisch?“

Da das biologische Wachstum (u.a. Keime) des Kühlturms über Aerosole emittiert werden kann, soll eine Untersuchung stattfinden. Im Falle eines Wachstums soll über eine Unterbindung des Wachstums nachgedacht werden.

Hierzu wurde eine rein biologische Versuchsreihe in nahezu vier Wochen Dauerlauf des Turms durchgeführt (siehe Anhang8).

Die biologische Versuchsreihe wurde bei einem Durchfluss von 1,7m³/h unter ständiger Beobachtung und ständigen Messungen ohne eine Schockdosierung durchgeführt.

Aus diesen Messungen und Beobachtungen ergab sich ein biologisches Wachstum im Kühlturm. Das Wachstum wird verstärkt, indem der Kühlturmufluss (10er Grube) stark mit Keimen bzw. „Pseudomonas Aeruginosa“ versetzt war.

Da sämtliche Spülwässer in die Grube P191010 fließen und einer Temperatur von 32°C ideale biologische Wachstumsverhältnisse gegeben sind, wurde eine große Anzahl an Keimen aus dieser Grube (siehe Anhang8) in den Kühlturm befördert. Dieses Wachstum wurde nicht extrem weiter gefördert. Bei der biologischen Versuchsreihe ergab sich nach vier Wochen Dauerlauf eine leichte Schleimbildung im Becken des Turms.

Bei einem langfristigen Betrieb wird auf eine Schockdosierung eines Biozids nicht zu verzichten sein.

Nach einem Gespräch mit dem Unternehmen G.IN.SER GmbH & Co.KG [17] ist hierbei eine wöchentliche Schockdosierung notwendig. Ein Anhaltswert für die Dosierung liegt nach [17] bei ca. 1000 ppm eines Biozids pro Woche, gerechnet auf den Beckeninhalt eines Kühlturms.

Nachdem die biologische Betrachtung beendet ist, wird über eine Einbindung des Kühlturms in den Gesamtprozess nachgedacht. Hierfür ist ein Scale-up des Berechnungsmodells notwendig.

6.5 SCALE-UP DES KÜHLTURMS

Grundsätzlich soll der Kühlturm auf einen NMMO/Wasserstrom von $140\text{m}^3/\text{h}$ ausgelegt werden (Fließbild Kühlturm Scale-up siehe Anhang3).

Im Scale-up soll mit den Versuchsergebnissen bei einer Geschwindigkeit von $5,1\text{ m/s}$ gerechnet werden (Annahme: Temperaturprofile und Luftfeuchten equivalent zu richtig ausgelegtem Tropfenabscheider). Zur Vollständigkeit werden sämtliche Diagramme mit $1,5\text{ m/s}$ aufgelistet (siehe Anhang10).

Hierfür werden die Versuchsdaten mittels der Merkel Hauptgleichung, welche die physikalischen Zusammenhänge im Versuchskühlturm gut beschreibt, ausgewertet.

Die getroffenen Annahmen für das erste Berechnungsmodell sollen durch empirische Zusammenhänge (aus den Versuchen) ersetzt werden.

Die Merkel Hauptgleichung (siehe Gleichung (6-1)) beschreibt den Zusammenhang der Temperaturen (Temperatur von Luftaustritt bzw. NMMO/Wassergemischaustritt), die im ersten Modell geschätzt wurden. Aufgrund der geringen Temperaturunterschiede ist eine Umwandlung der Differentialquotienten in einen Differenzenquotienten möglich.

Ebenso wird hierfür eine Geradengleichung für den Zusammenhang zwischen dT_w und dh (siehe Gleichung (6-2)) in die Merkelhauptgleichung eingesetzt. Somit ergibt die Merkelhauptgleichung die unbekanntenen Temperaturen T_{W2} und T_{L2} , womit nur mehr der Zusammenhang für die Luftfeuchte φ_2 über einen empirischen Zusammenhang zu eruieren ist. Die Zusammenhänge wurden für eine Geschwindigkeit von $5,1\text{ m/s}$ ermittelt, wobei diese Geschwindigkeit jener eines herkömmlichen Kühlturms entspricht (siehe Abbildung 6-8 vergleich $1,5\text{m/s}$ siehe Abbildung 6-9).

$$\int \frac{c_w \cdot dT_w}{h_{L2} - h_{L1}} = \int \frac{\sigma \cdot dA}{m_w} \quad (6-1)$$

$$\frac{c_w \cdot \Delta T_w}{\Delta h} = \frac{\sigma \cdot A}{m_w}$$

$$\frac{\sigma \cdot A}{m_{H2O1}} = \frac{c_w \cdot (T_{w1} - T_{w2})}{8,706 \cdot (T_{w1} - T_{w2})}$$

$$\frac{\sigma \cdot A}{m_{H2O1} \cdot c_w} \cdot 8,706 \cdot T_{w1} - \frac{\sigma \cdot A}{m_{H2O1} \cdot c_w} \cdot 8,706 \cdot T_{w2} = T_{w1} - T_{w2} \quad (6-2)$$

$$T_{w2} = \frac{\frac{\sigma \cdot A}{m_{H2O1} \cdot c_w} \cdot 8,706 \cdot T_{w1} - T_{w1}}{1 - \frac{\sigma \cdot A}{m_{H2O1} \cdot c_w}}$$

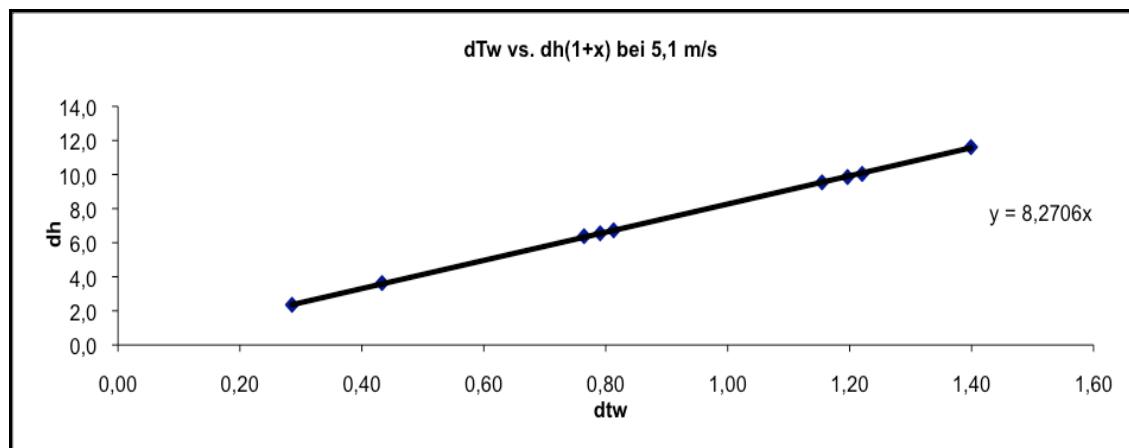


Abbildung 6-4 Luftenthalpie über die Wassertemperaturen bei 5,1 m/s

In der Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 sieht man den linearen Zusammenhang zwischen den Temperaturunterschieden des NMMO/Wassergemisches, sowie den Luftenthalpien im Kühlturm.

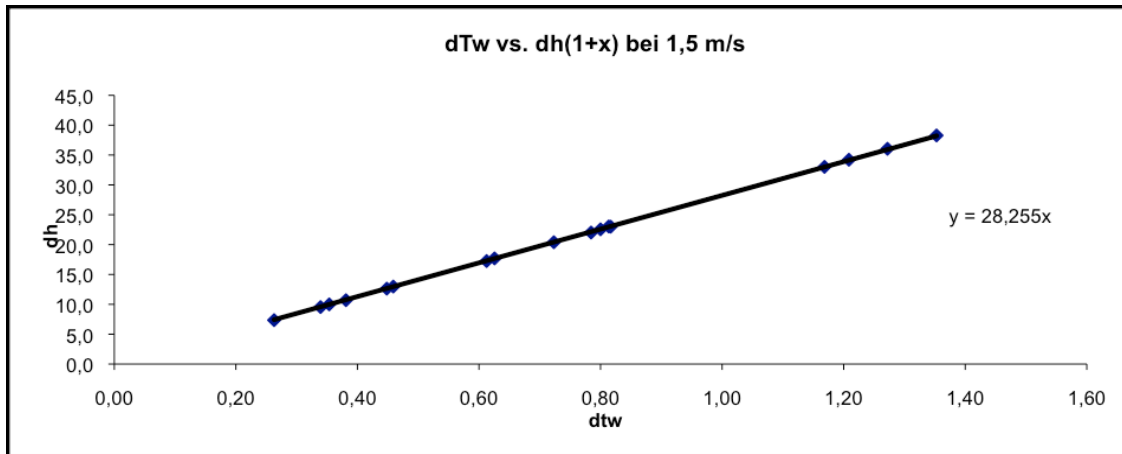


Abbildung 6-5 Luftenthalpie über die Wassertemperaturen bei 1,5 m/s

In der Abbildung 6-6 und der Abbildung 6-7 sind die Zusammenhänge zwischen den Luftfeuchten bei 1,5m/s bzw. 5,1m/s über die diversen Messpunkte aufgelistet.

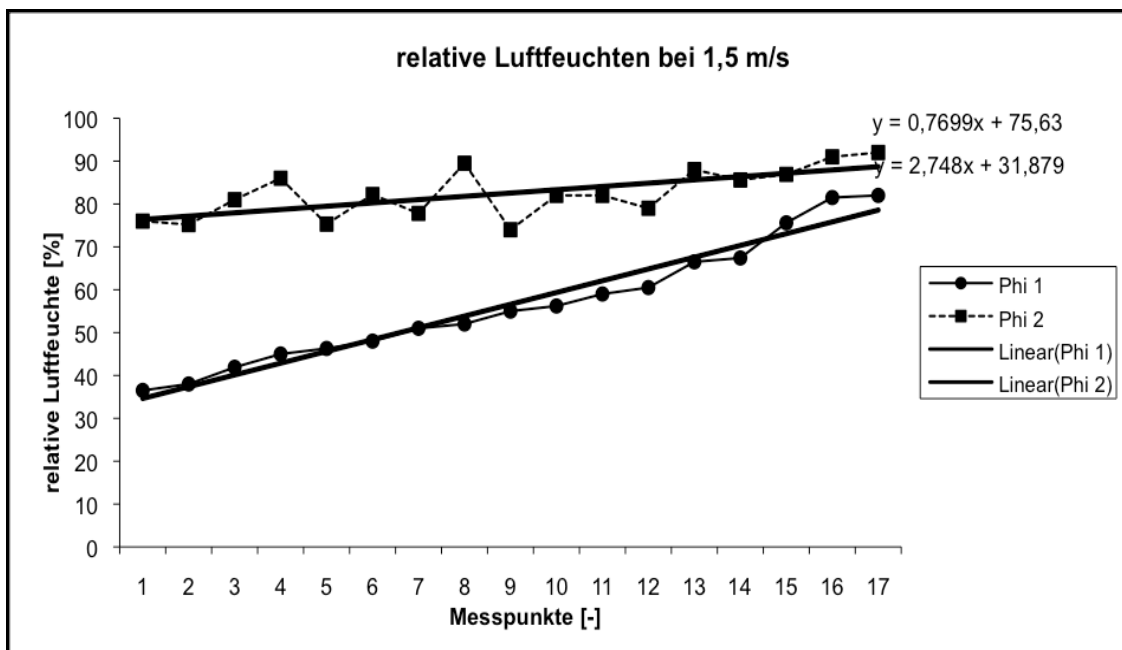


Abbildung 6-6 relative Luftfeuchten bei 1,5 m/s

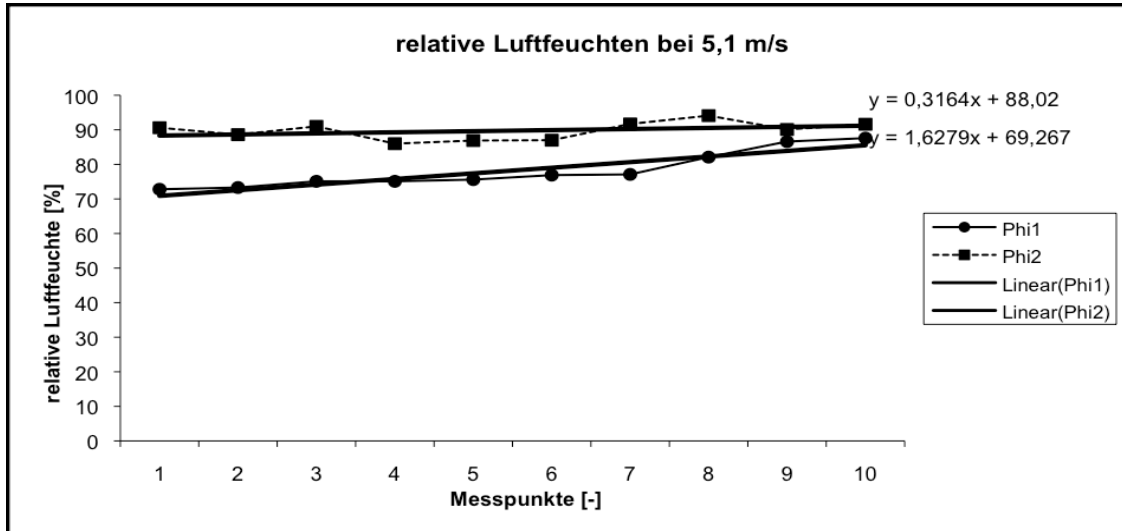


Abbildung 6-7 relative Luftfeuchten bei 5,1 m/s

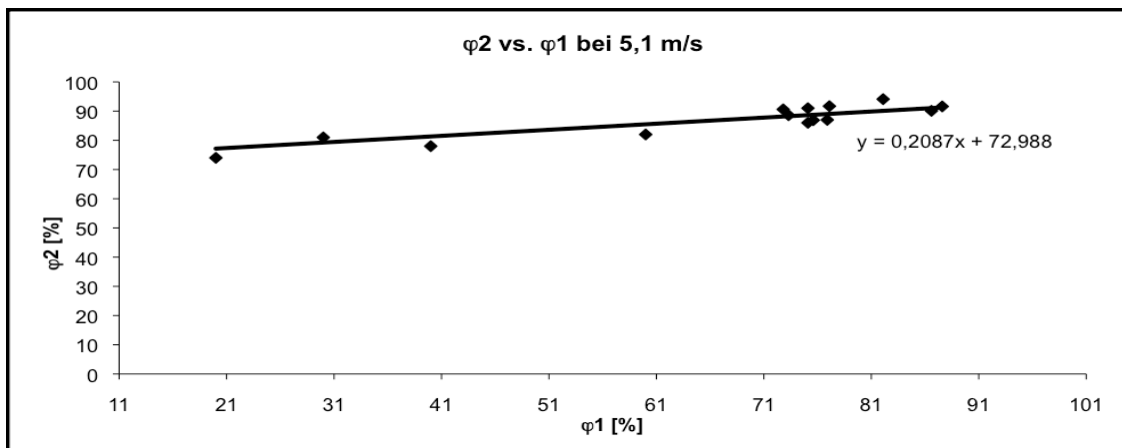


Abbildung 6-8 relative Luftfeuchten φ₁ zu φ₂ bei 5,1 m/s

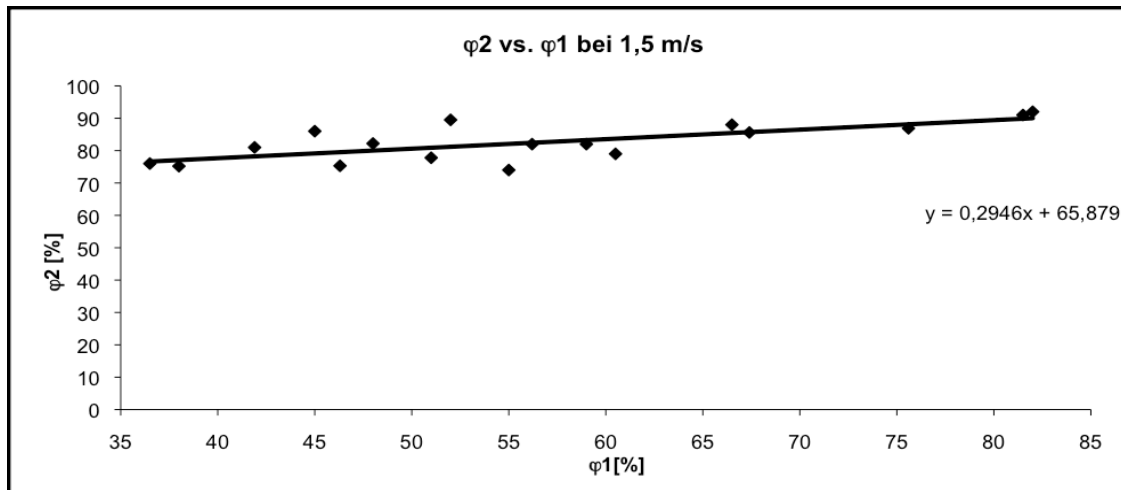


Abbildung 6-9 relative Luftfeuchten φ_1 zu φ_2 bei 1,5 m/s

6.5.1 Kühlleistung über den Jahreszyklus

Wie erwähnt, ist die Leistung des Kühlturms über ein Jahr (Wetterdaten siehe Anhang7) betrachtet von den Lufttemperaturen abhängig. Wie erwartet, funktioniert der Kühlturm im Sommer aufgrund der hohen Lufttemperaturen (im Normalfall korreliert die Temperatur mit der Luftfeuchte) weniger gut, als im Winter. Hierbei muss der Einfluss der Luftfeuchte berücksichtigt werden. Je höher diese ist, desto kleiner wird die Leistung des Kühlturms. In den späten Herbsttagen ist die Luftfeuchtigkeit höher, was eine niedrigere Leistung des Kühlturms bewirkt. An den schönen Sommertagen ist die Luftfeuchte aufgrund der starken Konvektion relativ niedrig.

In Abbildung 6-10, Abbildung 6-11 sowie Abbildung 6-12 ist die Kühlleistung, die Verdunstung, sowie die Kosteneinsparung über den Jahreszyklus aufgelistet.

Somit werden die jahreszeitlichen erwarteten Wettereinflüsse bestätigt.

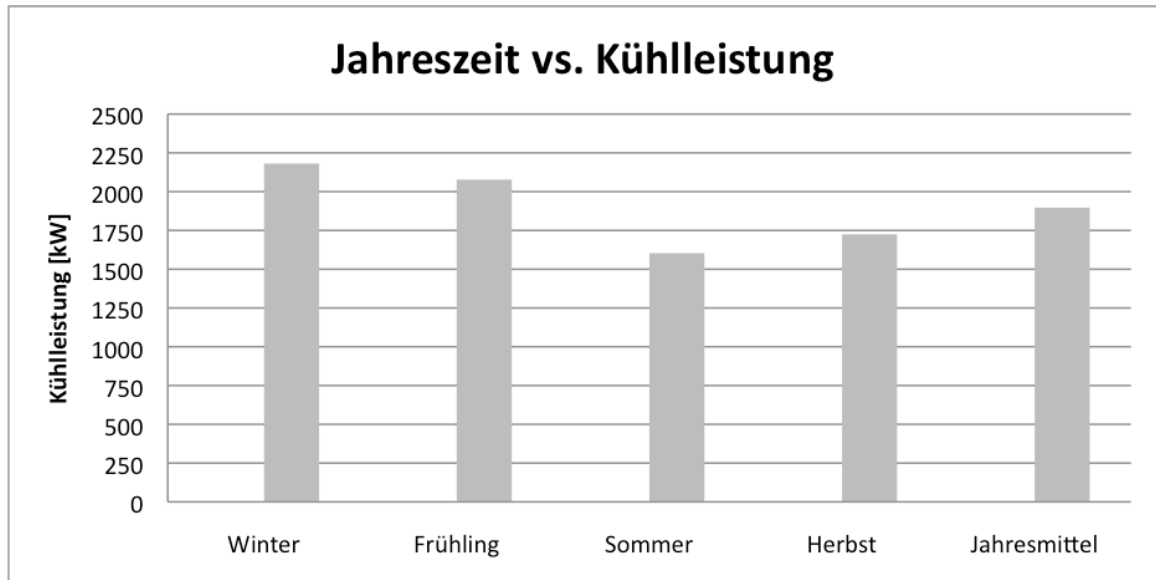


Abbildung 6-10 Kühlleistung über den Jahreszyklus

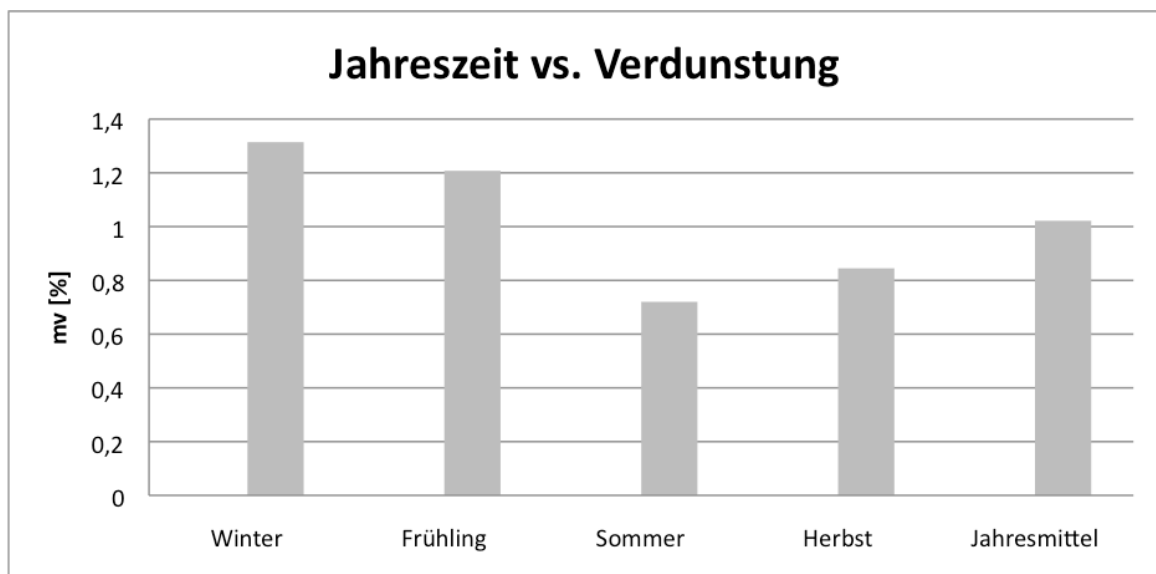


Abbildung 6-11 Verdunstung über den Jahreszyklus

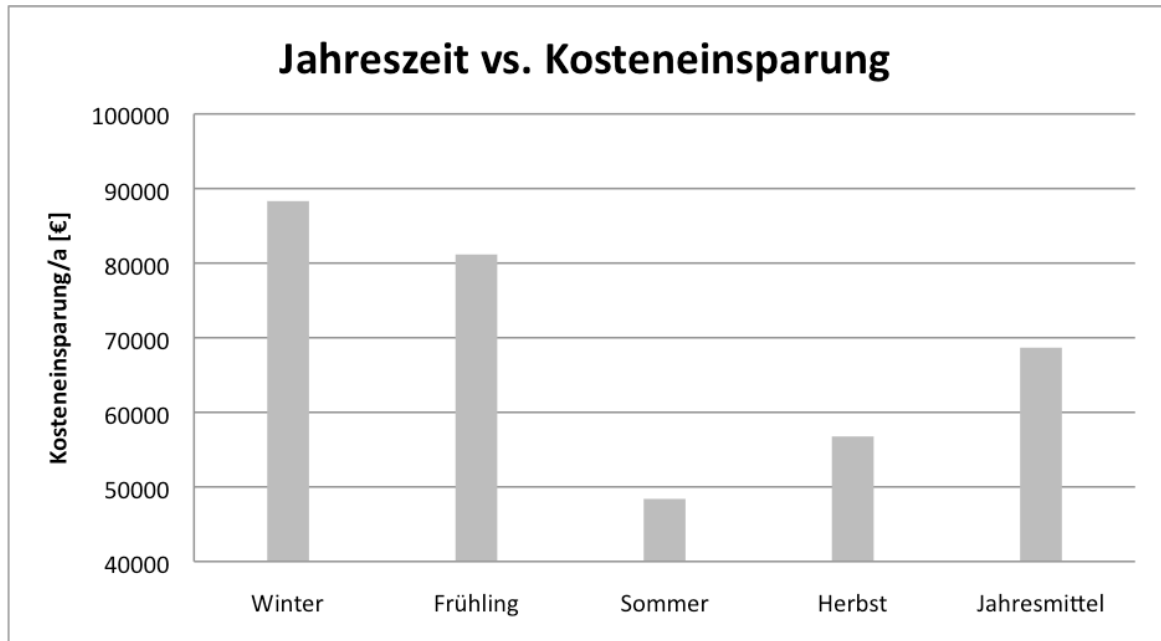


Abbildung 6-12 Kosteneinsparung über den Jahreszyklus

6.6 AMORTISATION DES KÜHLTURMS

Aufgrund der hohen Anschaffungskosten (siehe Abbildung 6-13 und Tabelle 6-2) amortisiert sich der Kühlturm in drei Jahren (Vereinbarung mit Lenzing Fibers GmbH.) schwer. Im Falle steigender Energiepreise könnte die Idee des Kühlturmkonzeptes wirtschaftliche Bedeutung erlangen. Die kurzfristige Wirtschaftlichkeit ist aufgrund der aktuellen Energiepreise fraglich.

Es sollte Grundsätzlich der Gesamtgewinn über die Lebensdauer den Ausschlag über das Projekt geben, sofern genügend Liquidität gegeben ist (dynamische Investitionsrechnung).

Tabelle 6-2 Amortisationsdauer

Kühlturmkosten	
Investitionskosten [16]	314400 €
Laufende Kosten [16]	3 €/h
Einnahmen [16]	6 €/h

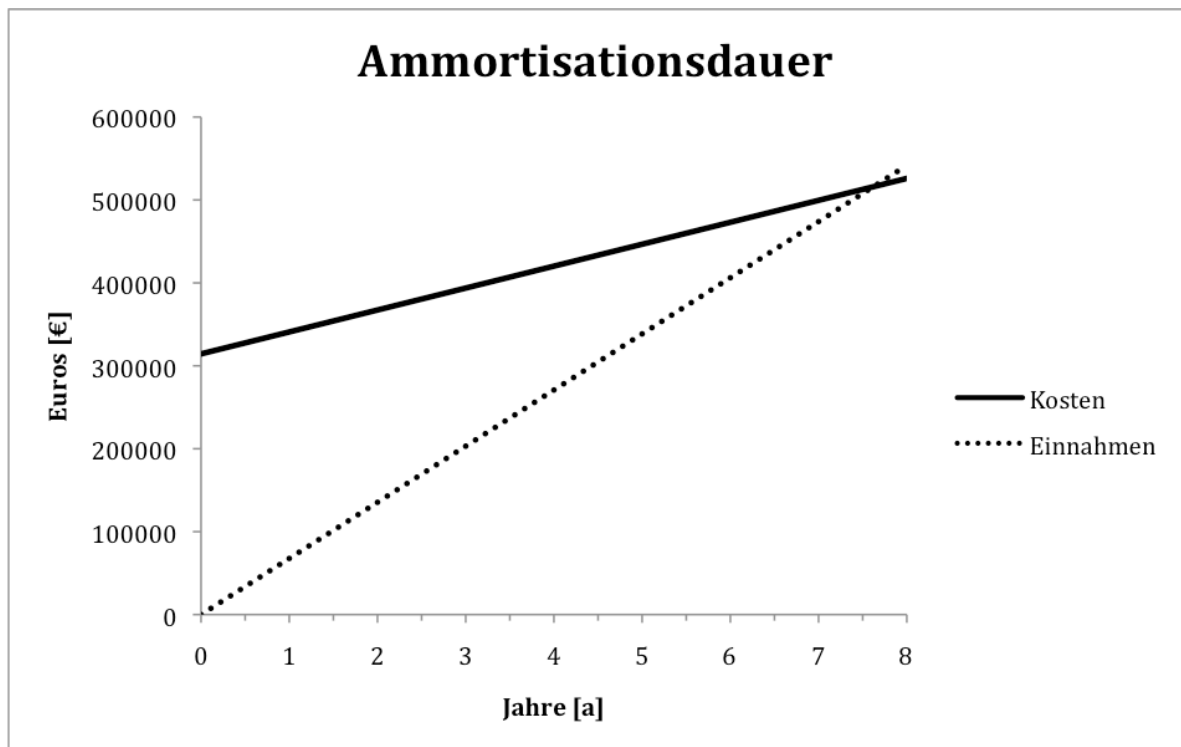


Abbildung 6-13 Amortisationsdauer

6.7 EINBINDUNG IN DEN GESAMTPROZESS

Als letzter Punkt dieses Kapitels soll eine Einbindung des Kühlturms in den Tencel® Produktionsprozess besprochen werden. Eine Einbindungsmöglichkeit ist bei der EDA (siehe Abbildung 6-14) gegeben, wobei Abwärme der EDA zum Heizen des Mediums bzw. der Zulauf zur EDA entnommen werden soll (siehe Abbildung 6-15).

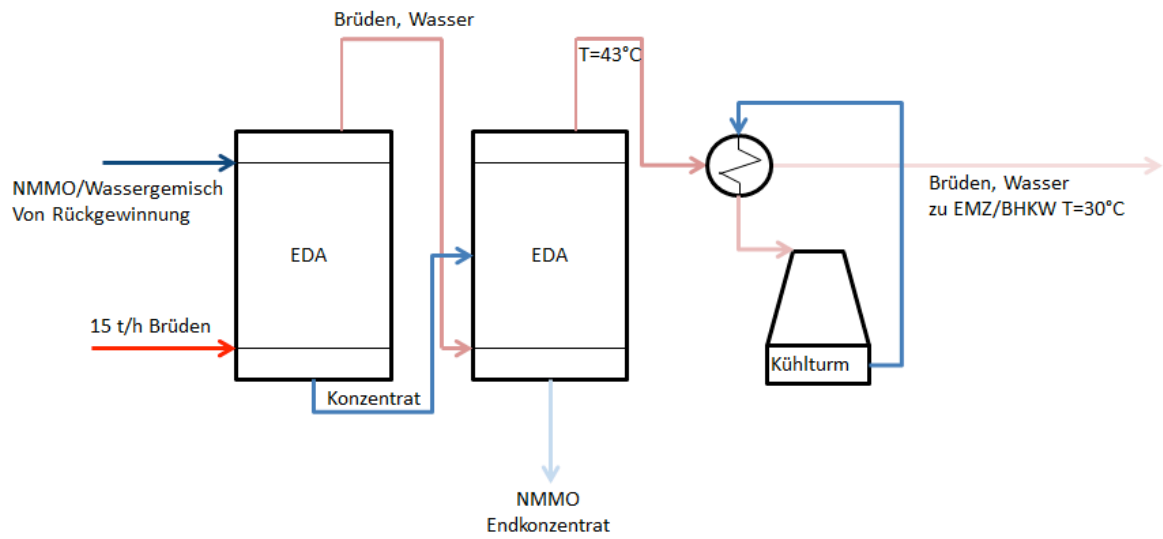


Abbildung 6-14 Eindampfanlage schematisch (Ist Stand)

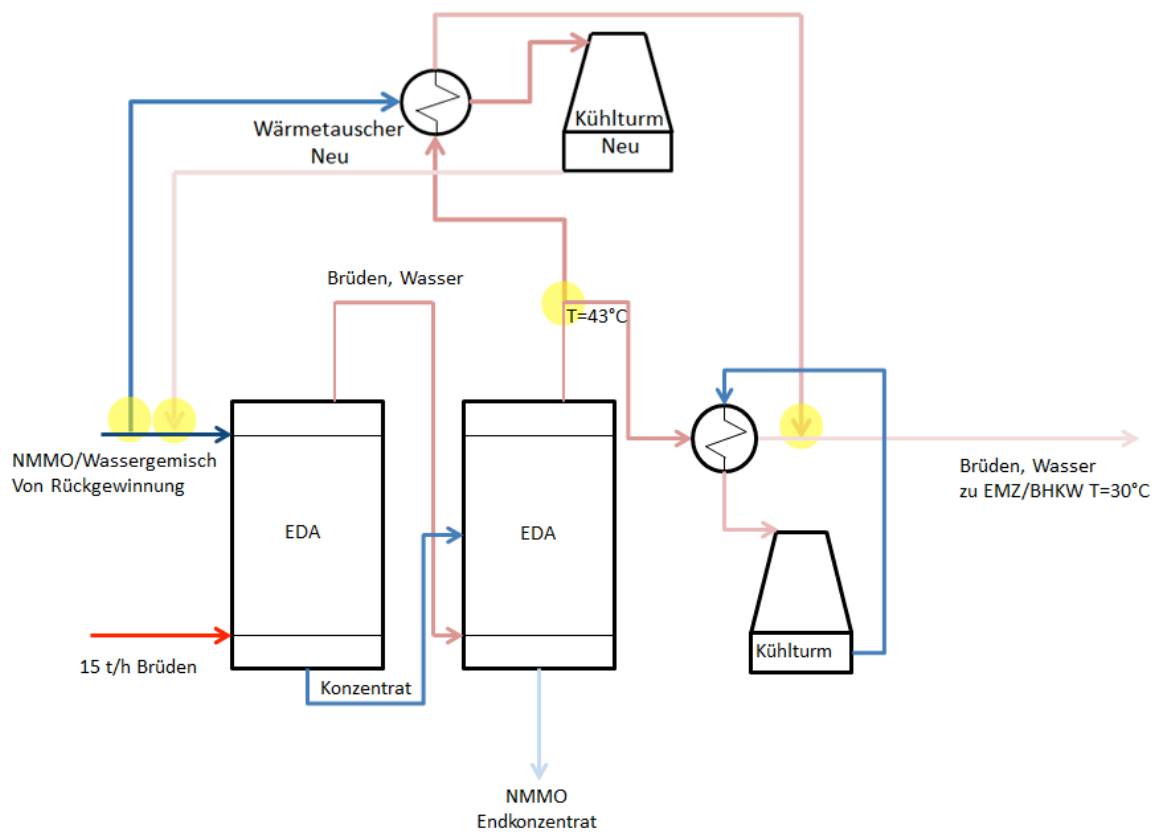


Abbildung 6-15 Kühlturmintegration schematisch (in den Ist Stand)

Es würde unbrauchbare Energie in Form von Abwärme genutzt werden, wobei die EDA entlastet wird.

Gezielt soll der Zulaufstrom zur EDA aufkonzentriert werden, um den benötigten Energieverbrauch dieser zu reduzieren. Die benötigte Heizenergie würde aus dem herkömmlichen Kühlkreislauf bereitgestellt werden. Aufgrund der zuvor erwähnten Investitionskosten ist das Konzept mit den jetzigen Energiepreisen in kurzer Zeit schwer zu amortisieren.

Bei einem Neubau oder einer idealen Integrierung in die Produktionslinie (auch Neubau einer EDA Anlage, dann müsste ein herkömmlicher Kühlturm sowieso installiert werden) wird sich ein Einsatz eines Kühlturms zur Aufkonzentrierung schneller abgelden.

7 SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

7.1 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund der globalen Zusammenhänge in der Fasererzeugung spielen die diversen Unterschiede bei den Energiepreisen weltweit eine große Rolle. Ein Fasererzeuger in den Vereinigten Staaten hat wesentlich geringere Energiepreise als z.B. in Mitteleuropa. Vor allem bei einem energieintensiven Prozess wie dem Tencel® Prozess ist es nötig, den Energiebedarf in einem ständigen Prozess zu minimieren, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Das Unternehmen Lenzing ist ständig bestrebt die Energiekosten zu verringern. Eine mögliche Variante ist, die Energiemenge der Eindampfanlage zur Rückgewinnung von NMMO durch den natürlichen Verdunstungseffekt eines Kühlturms zu verkleinern.

Ziel dieser Arbeit war es, mittels Versuchsreihen bzw. mathematischen Modellen die Leistungsfähigkeit eines Kühlturms in Hinblick auf die NMMO Eindickung zu untersuchen.

Hierbei wurde ein anfängliches Modell mittels Energiebilanzen erstellt, um die Versuchsreihen genau planen zu können. Die Versuchsreihen wurden im Dreischichtbetrieb durchgeführt, womit sich in kurzer Zeit viele unterschiedliche Luftfeuchten bzw. Temperaturen ergaben. Damit konnte die Aussagekräftigkeit einer einmonatigen Versuchsreihe maximiert werden.

Hierbei stellten sich die Annahmen des ersten Berechnungsmodells als präzise heraus.

Um dieses Modell nicht nur explizit für diesen Versuchskühlturm verwenden zu können, wurde das Modell mit den gewonnenen Daten aus den Versuchsreihen ergänzt, um somit ein Scale-up bzw. eine Integrierung in den Prozess zu prognostizieren.

Weiters wurden die Emissionen und das biologische Wachstum im Kühlturm analysiert.

Aufgrund des Mediums in Form von NMMO/Wasser und der luftseitigen Emissionen von NMMO wurde eine Aerosolmessanlage geplant und infolge Aerosolmessversuche durchgeführt. Hierbei wurde die Nicht-Flüchtigkeit des NMMO in einem Temperaturbereich von 18°C bis zu 35°C bestätigt.

Biozide müssen wöchentlich eingesetzt werden, um das biologische Wachstum zu unterbinden. Der wöchentliche Biozidbedarf ist mit einer Schockdosierung (mit ca. 1000ppm pro Beckeninhalt) ausreichend abgedeckt.

Eine Möglichkeit den Kühlturm in die Tencel®- Fasererzeugungsanlage zu integrieren ist darin gegeben, den Kühlturm vor der Eindampfanlage zu installieren, um diese infolge der Voraufkonzentrierung von NMMO zu entlasten. Die nicht genutzte Abwärme der Eindampfanlage soll genützt werden, um den Verdunstungseffekt zu verstärken.

Aus der Amortisationsrechnung geht hervor, dass die Aufkonzentrierung bzw. der Anteil an verdunstetem Wasser zu niedrig ist, um die Investitionskosten in drei Jahren zu amortisieren.

Bei steigenden Energiepreisen oder bei einer idealen Prozessintegration kann die Aufkonzentrierung mit einem Kühlturm in finanzieller Hinsicht Rentabilität erlangen.

Sämtliche Berechnungen wurden in „Microsoft Excel“ durchgeführt, wobei großer Wert auf Weiterverwendbarkeit bzw. Übersichtlichkeit gelegt wurde.

7.2 AUSBLICK

Die gewonnenen Daten aus den Versuchsreihen und den Berechnungsmodellen geben eine gute Grundlage, um die Wirtschaftlichkeit sowie die Emissionen bzw. das Verhalten eines NMMO/Wassergemisches in einem Kühlturm zu beschreiben.

Zu hinterfragen ist die Wirtschaftlichkeit eines Großprojektes. Hier sollte bei einer Prozesseinbindung eine intensive wirtschaftliche Betrachtung erfolgen. Nach dieser

Betrachtung sollten die erhaltenen Erkenntnisse genügen, um über eine Integrierung zu entscheiden.

Bei einem Neubau einer EDA ist eine Integrierung empfehlenswert, weil sowieso neue Kühltürme gebaut werden müssten. Somit wäre der Kühlturm in zweierlei Hinsicht ein Gewinn. Zum einen wäre der Kühleffekt mit einem NMMO/Wassergemisch anstatt reinem Wasser gegeben, zum anderen würde eine leichte Vorkonzentrierung erfolgen, um die EDA zu entlasten.

8 EXPERIMENTELLES

8.1 MEDIEN IN DER ANLAGE

NMMO (N-Methylmorpholin-N-Oxid)

Summenformel:	$C_5H_{11}NO_2$
Molare Masse:	117 kg/kmol
Dichte:	1130 kg/m ³ bei 20°C in Lösung
Siedepunkt bei 1013,25 mbar :	118,5°C

M (Morpholin) (Sicherheitsdatenblatt siehe Anhang)

Summenformel:	C_4H_9NO
Molare Masse:	87 kg/kmol
Dichte:	1000 kg/m ³ bei 20°C
Siedepunkt bei 1013,25 mbar :	129°C

NMM (N-Methyl-Morpholin)

Summenformel:	$C_5H_{11}NO$
Molare Masse:	101 kg/kmol
Dichte:	920 kg/m ³
Siedepunkt bei 1013,25 mbar :	115°C

Wasser

Summenformel:	H_2O
Molare Masse:	18 kg/kmol
Dichte:	1000 kg/m ³ bei 20°C
Siedepunkt bei 1013,25 mbar	100°C

Luft

Molare Masse:	29 kg/kmol
Dichte:	1,204 kg/m ³

8.2 ANALYSEGERÄTE

Durchflussmessapparatur Flüssigkeit:

- Tragbares Ultraschall-Durchflussmessgerät Fluxus ADM 6725 Firmware V5.xx

Feuchtemessapparatur:

- HMI41 Feuchte- und Temperatur-Messgeräte und Sonden (HMP41,42,44,44L,45,46)

Durchflussmessapparatur Gas:

- testo 416, Flügelrad-Anemometer mit fest angeschlossenem 16 mm Teleskop-Flügelrad (max. 890 mm), inkl. Batterie
- testo 425, thermisches Anemometer mit fest angeschlossener Strömungssonde (Ø Sondenkopf 7,5 mm), inkl. Temperaturmessung, Teleskop (max. 820 mm) und Batterie

Temperaturmessapparatur

- Fluke 50 Serie II

8.3 AEOROSOLMESSUNG

Um die benötigten Werte zu erhalten, muss ein Luftgemisch am Kopf des Kühlturms entnommen und analysiert werden.

8.3.1 Messung des NMMO-Gehalts am Austritt des Kühlturms

Die Aufnahme der Aeerosole im Gasstrom erfolgt in Gaswaschflaschen (siehe Abbildung 8-1 und Abbildung 8-2), die mit Watte oder VE-Wasser gefüllt sind. Die Anzahl der Gaswaschflaschen muss nach analytischer Auswertung variiert werden, wobei in der letzten Flasche kein NMMO sowie anderwertige Spuren enthalten sein sollten. Die Gaswaschflaschen sind seriell auszuführen. In der letzten Gaswaschflasche sollen keinen Spuren an NMMO, NMM und M enthalten sein (somit kann nichts über die Gaswaschflaschen gelangen).

In die letzte Gaswaschflasche wird ein Trockenmittel gefüllt, um die nachgeschalteten Messanlagen richtig zu betreiben.

Der Gasstrom, hervorgerufen durch eine Vakuumpumpe, soll über ein Regelventil die gleiche Geschwindigkeit wie beim Luftzug im Kühlturm erhalten (isokinetisch). Der isokinetische Gasabzug soll mittels Anemometer (hier: Schwebekörper) kontrolliert werden.

Um die genaue Konzentration auf den Volumenstrom zu ermitteln, sollten ca. 1 bis 2 m³ Gasvolumen pro Probe über die Apparatur gezogen werden. Dies wird mit einem Gasbalgenzähler kontrolliert.

Im Anschluss wird die Watte bzw. das VE-Wasser aus den Gaswaschflaschen entnommen und im Labor ausgewertet.

Hierbei wird ein unternehmensübliches Auswertungsverfahren benützt (Feststellung von NMMO sowie anderen Spuren auf der Faser bzw. auf der Watte). Die auf der Faser vorhandenen Stoffe wurden extrahiert und anschließend im HPLC ausgewertet. Beim VE-Wasser ist das Extrahieren nicht nötig.

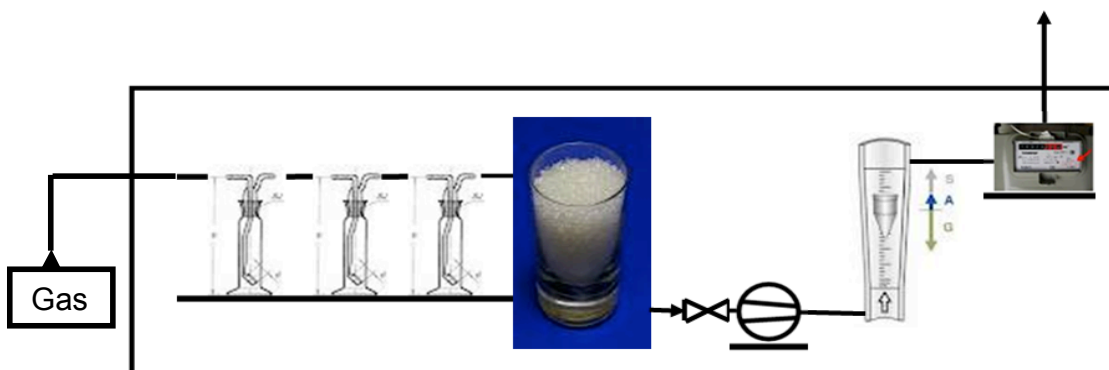


Abbildung 8-1 Aerosolmessanlage (schematisch)

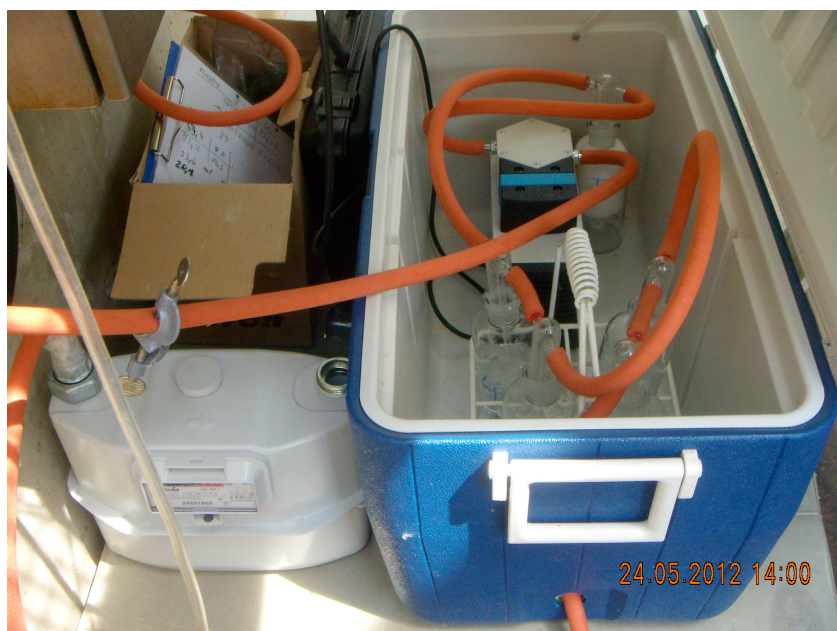


Abbildung 8-2 Aerosolmessanlage

8.4 BERECHNUNGSFILE

Das Berechnungsfile wurde im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel umgesetzt. In dieser Arbeit wurden verschiedene Berechnungsdateien angewandt. Sämtliche Dateien sind im Anhang aufgelistet. Die „xls“ Dateien der einzelnen Dokumente sind ebenso im Anhang12 als CD-Rom beigelegt. An dieser Stelle soll das

Hauptfile besprochen werden, das grundsätzlich im Einklang mit dieser Arbeit zu sehen ist. Es wurde auf eine klare Struktur sowie auf weitere Verwendbarkeit Wert gelegt. Hierbei sind die Berechnungsfiles nach folgendem Schema aufgebaut: „Am Beginn eines Registerblattes ist ein Eingabefenster vorgesehen (siehe Abbildung 8-3)“.

Eingabedaten		
Umgebungszustand		
T	[°C]	18
p	[bar]	1,0135
p _{st}	[bar]	0,021
φ	[%]	45
Kühlturm		
V _W	[m³/h]	140
c _{w,10}	[%]	5
Q _{zu}	[kW]	1359
T _{w10}	[°C]	30
T _{w1}	[°C]	38
d	[m]	2,4
v _L	[m/s]	5,1
V _L	[Nmtr³/h]	83059
z	[m]	3
A	[m²]	2000
α	[kg/s/m²]	0,002
αA	[kg/s]	3,00
Wärmetauscher		
Q _{zu}	[kW]	1359
m _{zu}	[kg/s]	25
T _{zu}	[°C]	43
T _{ab}	[°C]	30

Eingabewerte

Abbildung 8-3 Eingabefenster Berechnungsfile

Als zweite und dritte Registerkarte folgen Berechnungsfenster (siehe Abbildung 8-4) und das Ausgabefenster (siehe Abbildung 8-5), wobei das Ausgabefenster möglichst übersichtlich mit einem Fließbild versehen ist.

EXPERIMENTELLES

Kühlturm		
Vorgaben		
T	[°C]	18 Umgebungstemperatur
p	[bar]	1,0135 Umgebungsdruck
x _i	[kgd/kgtrf]	0,0057 Feuchte der Umgebungsluft
p _{sl} ^h	[bar]	0,0206 Sättigungsdruck der Umgebungsluft
T _{L1}	[°C]	18 Umgebungslufttemperatur
m _w	[kg/s]	39 Wasser/NMDO Strom zum Kühlturm
g	[m/s ²]	9,81 Gravitationskonstante
z	[m]	3 Pumphyöhe (Kühlumbecken bis Sprüh Ebene)
φ _i	[%]	45 relative Feuchte der Umgebungsluft
p _{sl}	[bar]	0,926225 Dampfdruck der Umgebungsluft
η _p	[-]	0,6 Pumpenwirkungsgrad
m	[kg/h]	107383 Luftzug durch den Kühlturm
αA	[kg/s]	3,00 Faktor nach Merkelgleichung
T _{in}	[°C]	38 Temperatur Wasser/NMDO Strom zum Kühlturm
Stoffdaten		
MW _w	[kg/kmol]	18,015 Molmasse des Wassers
MW _L	[kg/kmol]	28,960 Molmasse der Luft
c _{pw}	[kJ/kgK]	4,18 spezifische Wärmekapazität des Wassers
c _{pd}	[kJ/kgK]	1,81 spezifische Wärmekapazität des Dampfes
c _{pl}	[kJ/kgK]	1,00 spezifische Wärmekapazität der Luft
Δh _w	[kJ/kg]	2500 Verdampfungsenthalpie von Wasser
Berechnung Kühlturm		
φ ₂	[%]	82 relative Feuchte der Luft am Austritt des Kühlturms
T _{in2}	[°C]	33 Temperaturunterschied Wasser/NMDO Gemisch
T _{L2}	[°C]	27,3 Lufttemperatur am Austritt des Kühlturms
x ₂	[kgd/kgtrf]	0,0189 Feuchte der Luft am Kühluustritt
Δx	[kgd/kgtrf]	0,0131 Feuchteunterschied der Luft von Ein- Austritt
h _{1+in1}	[kJ/kg]	32,53 Enthalpie der Luft am Eintritt des Kühlturms
h _{1+in2}	[kJ/kg]	75,41 Enthalpie der Luft am Austritt des Kühlturms
m _a	[kg/h]	107383 Massenstrom der trockenen Luft
m _w	[kg/h]	1410 Massenstrom des Feuchteunterschieds der Luft
m _v	[m ³ /h]	1,410 Volumenstrom des Feuchteunterschieds der Luft
Berechnung Kühlturm Konzentration		
m _{wa} M01	[kg/h]	7000 Massenstrom NMDO in den Kühlturm
m _{wa} Q01	[kg/h]	133000 Massenstrom Wasser in den Kühlturm
m _{wa} Q02	[kg/h]	131590 Massenstrom Wasser aus den Kühlturm
m _{wa} M02	[kg/h]	7000 Massenstrom NMDO aus den Kühlturm
m _{wa} E2	[kg/h]	138590 Massenstrom Gesamt aus den Kühlturm
Q _{wa} E02	[m ³]	5,05 Konzentration von NMDO am Austritt des Turms
Berechnung Kühlturm		
Q _c	[kW]	1883 Kühlung des Kühlturms
m _w	[%]	1,01 Massenstrom des Feuchteunterschieds der Luft
m _v	[kg/s]	0,39 Massenstrom des Feuchteunterschieds der Luft
h _{in}	[h]	8000 Jahresstunden
EDA Kosten/m ³	[€/m ³]	6 Euro pro Kubikmeter Verdampfung
Kosteneinsparung/a	[€]	67701 Euro pro Jahr Einsparung

Abbildung 8-4 Berechnungsfenster Berechnungsfile

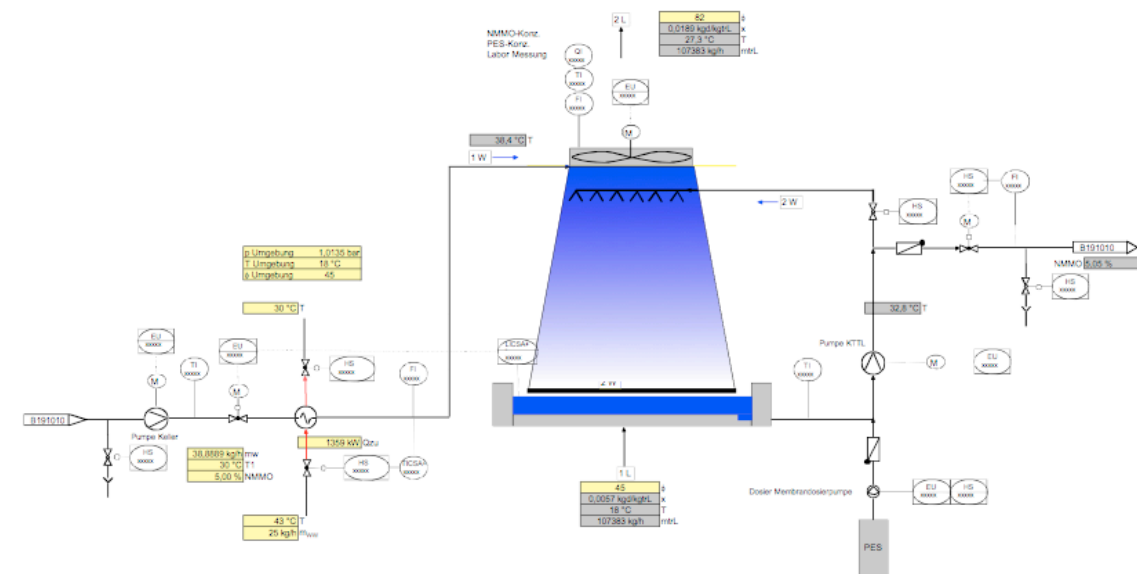


Abbildung 8-5 Ausgabefenster Berechnungsfile

LITERATUR

- [1] Berliner, P. Kühltürme- Grundlagen der Berechnung und der Konstruktion. Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1975).
- [2] Ignatowitz, E. Chemietechnik. 7. Auflage. Verlag Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten (2003).
- [3] VDI-Wärmeatlas - Verein Deutscher Ingenieure. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC). Zehnte, bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (2006).
- [4] Rasch, D; Verdoren, L,R; Gowers, J,I. Planung und Auswertung von Versuchen und Erhebungen. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien (2007).
- [5] Lankmayr, E. Grundlagen der Angewandten Analytik- Vorlesungsskriptum. Technische Universität Graz (2007).
- [6] Eichinger, R. Faserphysik Vorlesungsskriptum. Technische Universität Graz (2007).
- [7] Pflügl, M., & Rentz, A. *Vorlesungsskriptum Stoffübertragung*. Graz: Technische Universität Graz (2008)..
- [8] Brenn, G., & Meile, W. *Vorlesungsskriptum Strömungslehre und Wärmeübertragung I*. Graz: Technische Universität Graz (2008)..
- [9] Siebenhofer, M. Thermische Verfahrenstechnik I Vorlesungsskriptum-Trocknung. Technische Universität Graz (2009).
- [10] Fröschl, F. Sicherheit und Umweltschutz in der Anlagentechnik. Vorlesungsskriptum. Technische Universität Graz (2009).
- [11] Meile, W. Laborübung Strömungsmechanik- Laborskriptum. Technische Universität Graz (2010).
- [12] Siebenhofer, M. *Luftreinhaltung und Abluftreinigung. Vorlesungsskriptum*. (9. revidierte Auflage). Graz: Technische Universität Graz (2010).
- [13] Glatz, T; Salchinger, G; Scheibelhofer, M. Energetische Betrachtungen an der REA+ Versuchsanlage Niederaußern. Bachelorarbeit. Technische Universität Graz (2011).

LITERATUR

- [14] Koncar, M; Schwarz, R. Anlagen und Prozesstechnik. Vorlesungsskriptum. Technische Universität Graz (2010)

Internet

- [15] N.N. Klimadaten von Österreich. Fürstenfeld-
http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm
- eingesehen am 14.03.2012.

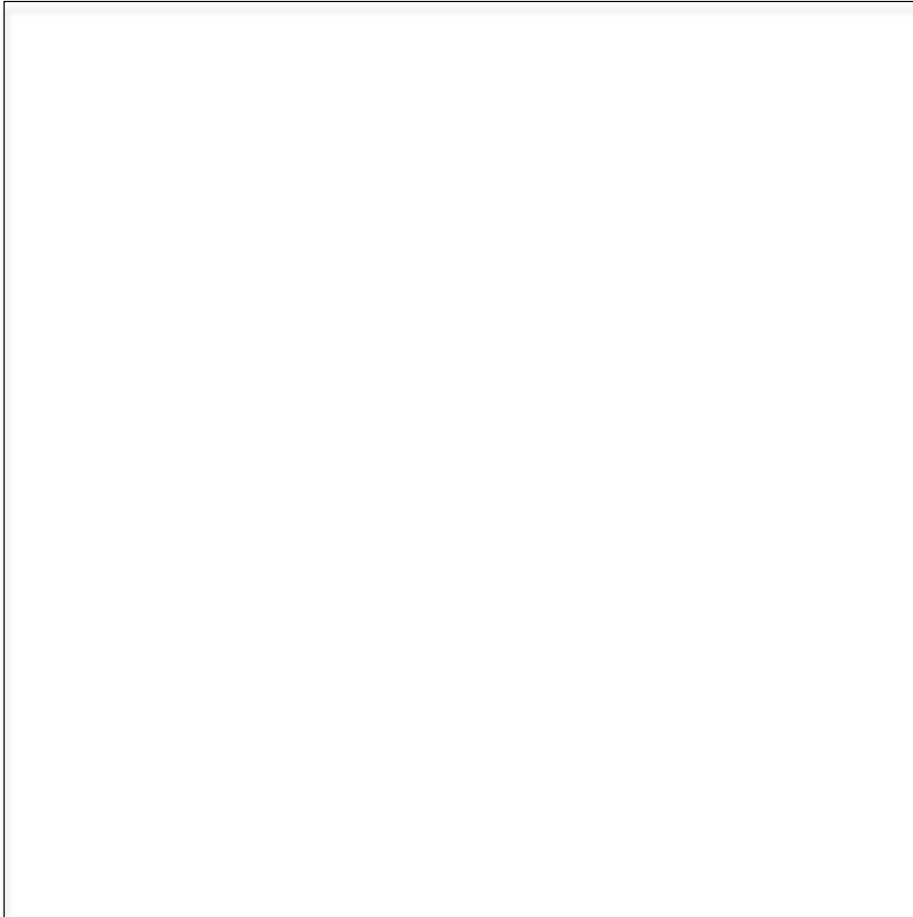
Sonstiges

- [16] Lenzing Fibers GmbH. Heiligenkreuz an der Lafnitz (B). Diverse, nicht veröffentlichte Informationen. Kontaktperson: Herr DI Alois Bauer (2012).
- [17] G.I.N.S.E.R GmbH. & Co.KG. Bad Heilbrunn (Deutschland). Diverse, nicht veröffentlichte Informationen. Kontaktperson: Herr DI Desiderius Sozanski (2012)

ANHANG

Anhang0	Diverse Dateien auf CD-Rom
Anhang1	Aerosolmessanlage
Anhang2	Aufkonzentrierung
Anhang3	Berechnungsfile mit Annahmen inkl. Fließbild Scale-up
Anhang4	Berechnungsfile mit Annahmen inkl. Fließbild Testlauf
Anhang5	Berechnungsfile mit Annahmen für Versuchsplanung
Anhang6	Berechnungsfile ohne Annahmen
Anhang7	Mittelwerte Temperaturen und Luftfeuchten im Jahresschnitt
Anhang8	Versuchsprotokoll
Anhang9	Kühlleistung, Verdunstung und Kosteneinsparung über den Jahreszyklus
Anhang10	Auswertungsfile der Versuche
Anhang11	Projektmanagement

Anhang0 Diverse Dateien auf CD-Rom



Kühlturm		
Vorgaben Aeerosolmessversuch 09.05.2012 Versuch 1 mit 5,1m/s		
GW1	37,68 [g]	Gaswaschflasche 1
GW2	15,89 [g]	Gaswaschflasche 2
GW3	24,37 [g]	Gaswaschflasche 3
GW4	21,97 [g]	Gaswaschflasche 4
GW1	13346 [mg/kgatro]	Gaswaschflasche 1
GW2	148 [mg/kgatro]	Gaswaschflasche 2
GW3	57 [mg/kgatro]	Gaswaschflasche 3
GW4	29 [mg/kgatro]	Gaswaschflasche 4
GS	0,98 [Nm ³]	Gasstrom
ml	90000 [Nm ³ /h]	Luftstrom
mv	2500 [kg/h]	Verdunstung

Berechnung Aeerosolmessanlage		
NMMO	1356,8 [mg]	Gesamtgewicht NMMO in den Gaswaschflaschen
NMMO	1384,5 [mg/Nm ³]	NMMO Konzentration pro Nm ³
NMMO	125 [kg/h]	NMMO
NMMO	2,1 [%]	NMMO bei einer Eingangskonzentration von rund 6% in den Kühlturm

Kühlturm		
Vorgaben Aeerosolmessversuch 15.05.2012 Versuch 2 mit 1,5 m/s		
GW1	421,2 [g]	Gaswaschflasche 1
GW1	8 [mg/kg]	Gaswaschflasche 1
GS	1,022 [Nm ³]	Gasstrom
ml	30000 [Nm ³ /h]	Luftstrom
mv	2500 [kg/h]	Verdunstung

Berechnung Aeerosolmessenanlage		
NMMO	3,4 [mg]	Gesamtgewicht NMMO in den Gaswaschflaschen
NMMO	3,3 [mg/Nm ³]	NMMO Konzentration pro Nm ³
NMMO	0,1 [kg/h]	NMMO
NMMO	0,004 [%]	NMMO bei einer Eingangskonzentration von rund 6% in den Kühlturm

Kühlturm		
Vorgaben Aeerosolmessversuch 24.05.2012 Versuch 3 mit 1,5 m/s		
GW1	55,2 [g]	Gaswaschflasche 1
GW2	346,74 [g]	Gaswaschflasche 2
GW3	308,94 [g]	Gaswaschflasche 3
GW4	288,5 [g]	Gaswaschflasche 4
GW1	18,4 [mg/kgatro]	Gaswaschflasche 1
GW2	0 [mg/kgatro]	Gaswaschflasche 2
GW3	0 [mg/kgatro]	Gaswaschflasche 3
GW4	0 [mg/kgatro]	Gaswaschflasche 4
GS	2 [Nm ³]	Gasstrom
ml	30000 [Nm ³ /h]	Luftstrom
mv	2500 [kg/h]	Verdunstung

Berechnung Aeerosolmessanlage		
NMMO	18,4 [mg]	Gesamtgewicht NMMO in den Gaswaschflaschen
NMMO	9,2 [mg/Nm ³]	NMMO Konzentration pro Nm ³
NMMO	0,28 [kg/h]	NMMO
NMMO	0,005 [%]	NMMO bei einer Eingangskonzentration von rund 6% in den Kühlturm

Kühlturm Aufkonzentrierungsversuche VK

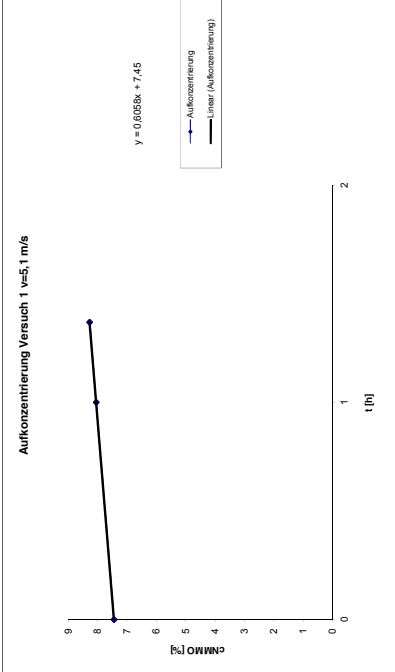
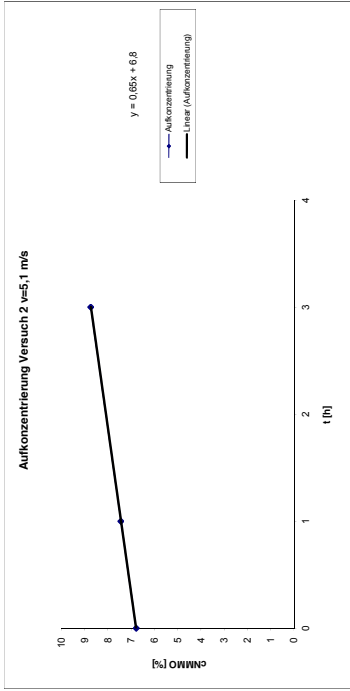
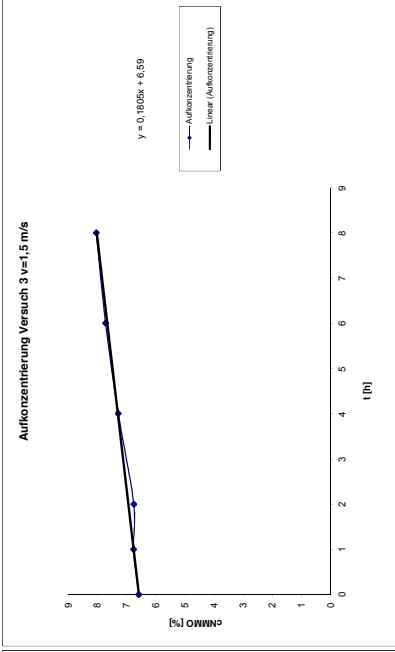
Versuch VK1 Luft bishchen besser, Luftgeschwindigkeit 5,1 m/s	
t [h]	c [%]
0	7,45
1	8,0568
2	8,28
3	9,2074
4	9,8732

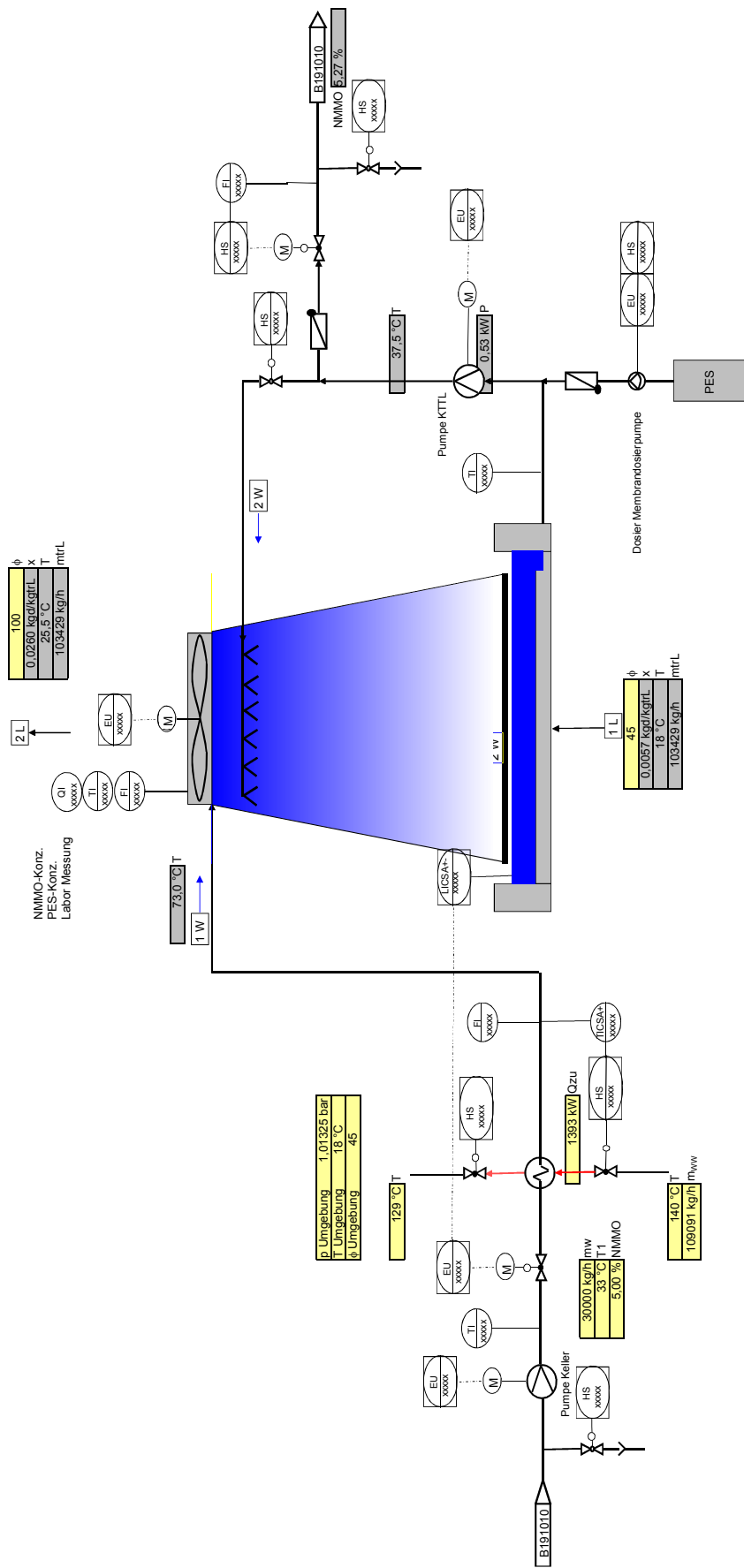
Versuch VK2 Luft bishchen besser, Luftgeschwindigkeit 5,1 m/s	
t [h]	c [%]
0	6,8
1	7,45
3	8,75

Versuch VK3 Luftgeschwindigkeit 1,5 m/s	
t [h]	c [%]
0	6,49
1	6,705
2	6,76
4	7,28
6	7,73
8	8,05

Unterschied ohne Weiter	
5,1 m/s	1,5 m/s
0,28 [L]	-1/3
0,18 [L]	Equivalent zur Geschwindigkeit

ohne Vlies	
mit Vlies	mit Dornblüt
0,628° x-Ausgangskonz	0,400° x-Ausgangskonz
0,181° x-Ausgangskonz	0,400° x-Ausgangskonz



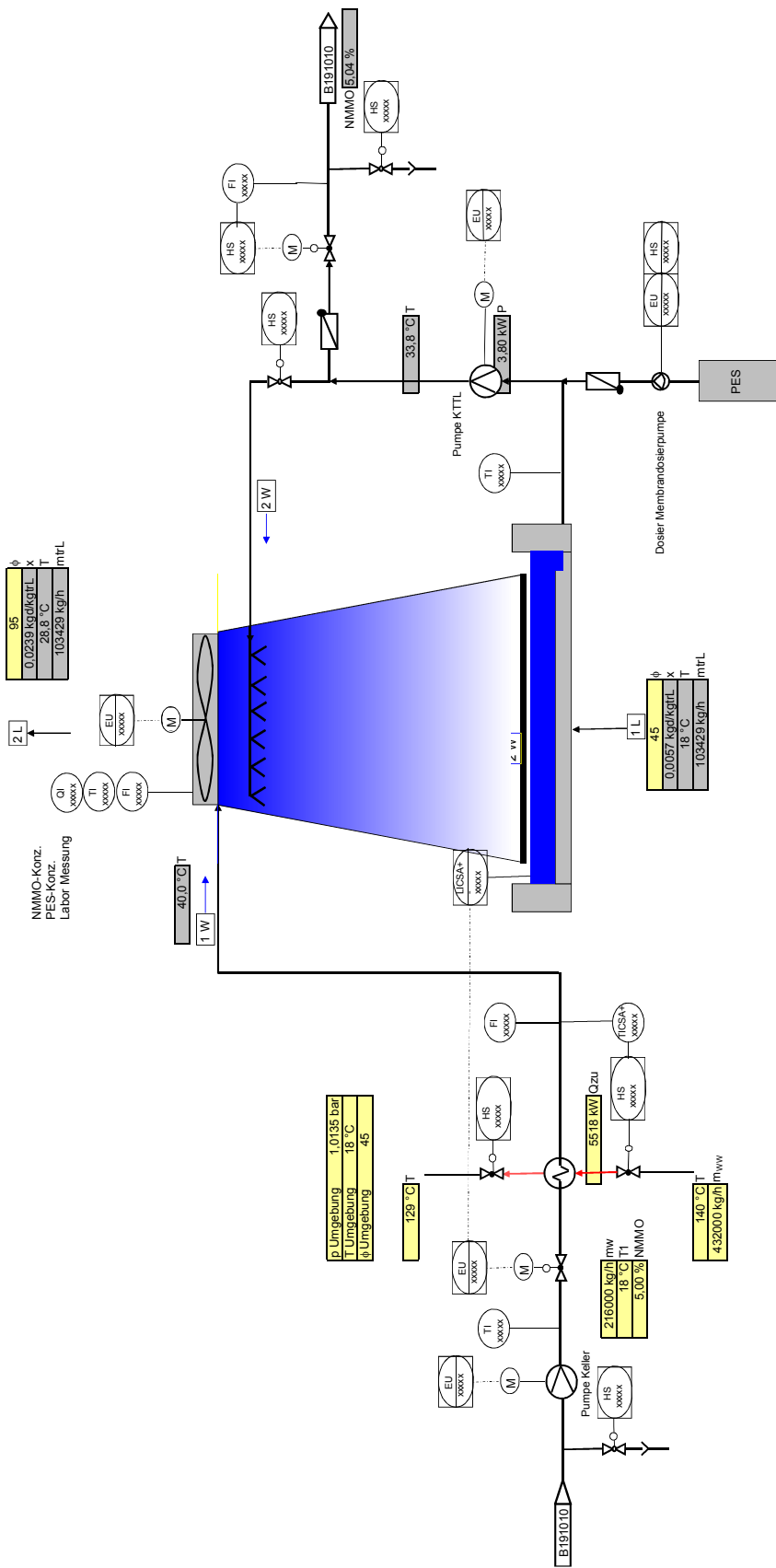


Eingabedaten		
Umgebungszustand		
T	[°C]	18
p	[bar]	1,0135
p _d ^s	[bar]	0,021
φ	[%]	45
Kühlturm		
V _w	[m³/h]	216
Q _{zu}	[kW]	5518
V _{vmax}	[m³/h]	2,5
T _{w0}	[°C]	18
V _L	[Nmtr³/h]	80000
ΔT	[°C]	5
φ ₂	[%]	95
Z	[m]	3
Grube P191010		
V	[m³]	390
C _{NMMO}	[m³%]	5
C _{NMM}	[ppm]	200
C _T	[mg/l]	50
Wärmetauscher		
T _{WE}	[°C]	140
T _{WA}	[°C]	129
m _{WW}	[kg/h]	432000
ΔT _{WNMMO}	[°C]	22
Q _{zu}	[kW]	5518
T _{w1}	[°C]	40

Kühlturm			
Vorgaben			
T	[°C]	18	Umgebungstemperatur
p	[bar]	1,0135	Umgebungsdruck
x ₁	[kgd/kgtrl]	0,0057	Feuchte der Umgebungsluft
T _{w2}	[°C]	34	Wasser im Kreislauf des Turmes
Δ T	[°C]	5	Wasser Kreislauf und Luft am Kühleraustritt
T _{L2}	[°C]	29	Lufttemperatur am Kühleraustritt
p _{d1} ^s	[bar]	0,0206	Sättigungsdampfdruck der Umgebungsluft
T _{L1}	[°C]	18	Umgebungslufttemperatur
m _w	[kg/h]	216000	Wasser/NMMO Strom zum Kühlturm
g	[m/s ²]	9,81	Gravitationskonstante
Z	[m]	3	Pumphöhe (Kühlturmbekken bis Sprühebene)
φ ₁	[%]	45	relative Feuchte der Umgebungsluft
p _{d1}	[bar]	0,926225	Dampfdruck der Umgebungsluft
φ ₂	[%]	95,00	relative Feuchte der Luft am Kühleraustritt
φ ₂	[%]	94,95	relative Feuchte der Luft am Kühleraustritt
η _P	[-]	0,6	Pumpenwirkungsgrad
m _L	[kg/h]	103429	Luftzug durch den Kühlturm
Stoffdaten			
MW _w	[kg/kmol]	18,015	Molmasse des Wassers
MW _L	[kg/kmol]	28,960	Molmasse der Luft
c _{pW}	[kJ/kgK]	4,18	spezifische Wärmekapazität des Wassers
c _{pD}	[kJ/kgK]	1,81	spezifische Wärmekapazität des Dampfes
c _{pL}	[kJ/kgK]	1,00	spezifische Wärmekapazität der Luft
Δh _{vW}	[kJ/kg]	2500	Verdampfungsenthalpie von Wasser
Berechnung WT			
P	[kW]	3,8	Pumpenleistung KTTL
Δ T	[°C]	22,000	Wärmetauscher Temperaturdifferenz Wärmemedium
T _{w1}	[°C]	40,00	Temperatur Wasser/NMMO in Kühlturm
Berechnung Kühlturm			
x ₂	[kgd/kgtrl]	0,0239	Feuchte der Luft am Kühleraustritt
p _{d2}	[bar]	0,0374	Dampfdruck der Luft am Austritt
p _{d2} ^s	[bar]	0,0394	Sättigungsdampfdruck der Luft am Austritt d. Turms
φ ₂	[%]	95	relative Feuchte der Luft am Austritt des Kühlturms
x ₂	[kgd/kgtrl]	0,0239	"Kontrollwert" Feuchte der Luft am Kühleraustritt
Δx	[kgd/kgtrl]	0,0181	Feuchteunterschied der Luft von Ein- Austritt
h _{(1+x)1}	[kJ/kg]	32,53	Enthalpie der Luft am Eintritt des Kühlturms
h _{(1+x)2}	[kJ/kg]	89,66	Enthalpie der Luft am Austritt des Kühlturms
m _{trl}	[kg/h]	103429	Massenstrom der trockenen Luft
V _{trl}	[Bm ³ /h]	80000	Volumenstrom der trockenen Luft
m _v	[kg/h]	1875	Massenstrom des Feuchteunterschieds der Luft
m _{trl}	[kg/s]	28,73	Massenstrom der trockenen Luft
V _{trl}	[Bm ³ /s]	22,22	Volumenstrom der trockenen Luft
m _v	[m ³ /h]	1,875	Volumenstrom des Feuchteunterschieds der Luft
Berechnung Kühlturm Konzentration			
m _{NMMO1}	[kg/h]	10800	Massenstrom NMMO in den Kühlturm
m _{H2O1}	[kg/h]	205200	Massenstrom Wasser in den Kühlturm
m _{H2O2}	[kg/h]	203325	Massenstrom Wasser aus den Kühlturm
m _{NMMO2}	[kg/h]	10800	Massenstrom NMMO aus den Kühlturm
m _{ges2}	[kg/h]	214125	Massenstrom Gesamt aus den Kühlturm
c _{NMMO2}	[m%]	5,04	Konzentration von NMMO am Austritt des Turms

Grubenzusammensetzung P191010

Berechnung Zusammensetzung		
Gesamt	[kg]	390000
Wasser	[kg]	370480
NMMO	[kg]	19500
Trockensubstanz	[kg]	19,50
NMM	[kg]	0,08
Gesamt	[-]	1,00
Wasser	[-]	0,950
NMMO	[-]	0,050
Trockensubstanz	[-]	0,0001
NMM	[-]	0,0000002
Wasser	[m%]	95
NMMO	[m%]	5





$$H1W + E_a + H1L = H2W + H2L$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{1W} \cdot c_w \cdot T_{W1} + \dot{m}_{1W} \cdot g \cdot z + \dot{m}_{int.} \cdot h_{(1+3)} &= \dot{m}_{2W} \cdot c_w \cdot T_{W2} + \dot{m}_{int.} \cdot h_{(1+3)} \\ \dot{m}_{2W} &= \dot{m}_{1W} - \dot{m}_V \\ \dot{m}_V &= \dot{m}_{int.} \cdot \Delta X \\ \dot{m}_{2W} &= \dot{m}_{1W} - \dot{m}_{int.} \cdot \Delta X \end{aligned}$$

$$\dot{m}_{int.} = \dot{m}_{1W} \cdot \frac{(c_w \cdot T_{W1} + g \cdot z - c_w \cdot T_{W2})}{\left((c_{pl.} \cdot T_{L2} + x_2 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L2})) - (c_{pl.} \cdot T_{L1} + x_1 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L1})) - (x_2 - x_1) \cdot c_w \cdot T_{W2} \right)}$$

$$c_{pl.} \cdot T_{L2} + x_2 \cdot \Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L2} - (x_2 - x_1) \cdot c_w \cdot T_{W2} = \frac{\dot{m}_{1W}}{\dot{m}_{int.}} \cdot (c_w \cdot T_{W1} + g \cdot z - c_w \cdot T_{W2}) + (c_{pl.} \cdot T_{L1} + x_1 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L1}))$$

$$\left[\frac{\dot{m}_{1W}}{\dot{m}_{int.}} \cdot (c_w \cdot T_{W1} + g \cdot z - c_w \cdot T_{W2}) + (c_{pl.} \cdot T_{L1} + x_1 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L1})) - c_{pl.} \cdot T_{L2} - x_1 \cdot c_w \cdot T_{W2} \right] \cdot \frac{M_L}{M_d} \cdot x_2$$

$$p_d = \frac{p \cdot \frac{M_L}{M_d} \cdot x_2}{1 + \frac{M_L}{M_d} \cdot x_2} = \dot{m}_{WV} \cdot (c_p \cdot T_{W1} + g \cdot z) + \dot{m}_{int.} \cdot h_{(1+3)} - c_w \cdot T_{W2} + \dot{m}_{int.} \cdot h_{(1+3)}$$

$$\dot{m}_{WV} \cdot (c_p \cdot T_{W1} + g \cdot z - c_w \cdot T_{W2}) = \dot{m}_{int.} \cdot (h_{(1+3)} - h_{(1+3)}) - \Delta X \cdot c_w \cdot T_{W2}$$

$$\varphi = \frac{p_d}{p} = \frac{\dot{m}_{1W} \cdot \left(\left(c_{pl.} \cdot T_{L2} + x_2 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L2}) - (c_{pl.} \cdot T_{L1} + x_1 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L1})) - (x_2 - x_1) \cdot c_w \cdot T_{W2} \right) \cdot \frac{M_d}{M_L} \cdot \frac{10^{-3}}{\left(10 \cdot \frac{8,19625 \cdot 170,06}{233,42772} \right) - 10^{-3}} - \frac{M_d}{M_L} \cdot \frac{10^{-3}}{\left(10 \cdot \frac{8,19625 \cdot 170,06}{233,42772} \right) - 10^{-3}} \right) - (x_2 - x_1) \cdot c_w \cdot T_{W2}}{\dot{m}_{1W} \cdot \left((c_p \cdot T_{W1} + g \cdot z - c_w \cdot T_{W2}) - (c_p \cdot T_{L1} + x_1 \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_{L1})) - (x_2 - x_1) \cdot c_w \cdot T_{W2} \right) - (x_2 - x_1) \cdot c_w \cdot T_{W2}}$$

$$\varphi = \frac{p_d}{p}$$

$$\lg p_d^s = A - \frac{B}{C - T}$$

$$p_d^s \cdot h p d a 1$$

$$T \text{ in } ^\circ \text{C}$$

$$A = 8,19625$$

$$B = 1730,46$$

$$C = 233,42$$

$$x = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_L} = \frac{k g_{int.}}{k g_{int.}} = \frac{M_d}{M_L} \cdot \frac{p - p_d}{p - p_d}$$

$$h_{(1+3)} = c_{pl.} \cdot T_L + x \cdot (\Delta h_v + c_{pd} \cdot T_L)$$

$$c_w = 4,18 \frac{kJ}{kgK}$$

$$c_{pd} = 1,81 \frac{kJ}{kgK}$$

Versuchsprotokoll Versuchskühlturm

Versuch	Uhrzeit	Water allgemein	Probestelle 1		Probestelle 2		Probestelle 3		Probestelle 4		Probestelle 5		Probestelle 6		Probestelle 7		Probestelle 8		Probestelle 9		Anmerkung
			$c_{w,exp1}$ [m%]	$c_{w,exp2}$ [m%]	T_{wb} [°C]	T_{wt} [°C]	T_{vz} [°C]	n_{vz} [m³/h]	n_{vz} [m³/h]	n_{vz2} [kg/h]	ϕ_1 [%]	T_{L1} [°C]	ϕ_2 [%]	T_{L2} [°C]	v [m/s]	$c_{w,exp9}$ [mg/l]					
VF1	x	x	5	5,84	x	30	14,47	2	1712,66	45	18	95	12,5	4,5	x						
VF2	x	x	5	5,30	x	30	15,41	6	5656,08	45	18	95	13,4	4,5	x						
VF3	x	x	5	5,21	x	30	16,22	10	9604,6	45	18	95	14,2	4,5	x						
VF4	x	x	5	5,16	x	30	16,92	14	13557,4	45	18	95	14,9	4,5	x						
VF5	x	x	5	5,14	x	30	17,55	18	17514	45	18	95	15,6	4,5	x						
VF6	x	x	5	5,12	x	30	18,11	22	21473,8	45	18	95	16,1	4,5	x						
VF7	x	x	5	5,11	x	30	18,62	26	25436,4	45	18	95	16,6	4,5	x						
VF8	x	x	5	5,10	x	30	19,08	30	29401,5	45	18	95	17,1	4,5	x						
VF9	x	x	5	5,09	x	30	19,50	34	33368,8	45	18	95	17,5	4,5	x						
VF10	x	x	5	5,09	x	30	19,88	38	37338,1	45	18	95	17,9	4,5	x						
VF11	x	x	5	5,91	x	40	14,80	2	1693,44	45	18	95	12,8	4,5	x						
VF12	x	x	5	5,36	x	40	16,29	6	5600,03	45	18	95	14,3	4,5	x						
VF13	x	x	5	5,26	x	40	17,56	10	9513,66	45	18	95	15,6	4,5	x						
VF14	x	x	5	5,21	x	40	18,66	14	13433,3	45	18	95	16,7	4,5	x						
VF15	x	x	5	5,18	x	40	19,63	18	17358,3	45	18	95	17,6	4,5	x						
VF16	x	x	5	5,17	x	40	20,49	22	21287,8	45	18	95	18,5	4,5	x						
VF17	x	x	5	5,15	x	40	21,27	26	25221,5	45	18	95	19,3	4,5	x						
VF18	x	x	5	5,14	x	40	21,97	30	29168,8	45	18	95	20,0	4,5	x						
VF19	x	x	5	5,14	x	40	22,61	34	33099,5	45	18	95	20,6	4,5	x						
VF20	x	x	5	5,13	x	40	23,20	38	37043,1	45	18	95	21,2	4,5	x						

Versuchsprotokoll Versuchskühlturm

Versuch	Uhrzeit	Water allgemein	Probestelle 1		Probestelle 2		Probestelle 3		Probestelle 4		Probestelle 5		Probestelle 6		Probestelle 7		Probestelle 8		Probestelle 9		Probestelle 9		Probestelle 9				
			C _{wa1} C _{wa2} C _{wa3} [mg/l]	5	C _{wa2} C _{wa3} C _{wa4} [mg/l]	5,84	T _{wa} [°C]	X	T _{wa} [°C]	X	T _{wa} [°C]	30	T _{wa} [°C]	14,47	n _{wa} [m³/h]	2	m _{wa2} [kg/h]	1712,66	φ ₁ [%]	45	T _{L1} [°C]	18	φ ₂ [%]	95	T _{L2} [°C]	12,5	v [m/s]
VA1	X	X	5	5,84	X	30	X	14,47	30	14,47	2	1712,66	45	18	95	12,5	4,5	X									
VA2	X	X	5	5,30	X	30	X	15,41	30	15,41	6	5656,08	45	18	95	13,4	4,5	X									
VA3	X	X	5	5,21	X	30	X	16,22	30	16,22	10	9604,6	45	18	95	14,2	4,5	X									
VA4	X	X	5	5,16	X	30	X	16,92	30	16,92	14	13557,4	45	18	95	14,9	4,5	X									
VA5	X	X	5	5,14	X	30	X	17,55	30	17,55	18	17514	45	18	95	15,6	4,5	X									
VA6	X	X	5	5,12	X	30	X	18,11	30	18,11	22	21473,8	45	18	95	16,1	4,5	X									
VA7	X	X	5	5,11	X	30	X	18,62	30	18,62	26	25436,4	45	18	95	16,6	4,5	X									
VA8	X	X	5	5,10	X	30	X	19,08	30	19,08	30	29401,5	45	18	95	17,1	4,5	X									
VA9	X	X	5	5,09	X	30	X	19,50	30	19,50	34	33368,8	45	18	95	17,5	4,5	X									
VA10	X	X	5	5,09	X	30	X	19,88	30	19,88	38	37338,1	45	18	95	17,9	4,5	X									
VA11	X	X	5	5,91	X	40	X	14,80	40	14,80	2	1693,44	45	18	95	12,8	4,5	X									
VA12	X	X	5	5,36	X	40	X	16,29	40	16,29	6	5600,03	45	18	95	14,3	4,5	X									
VA13	X	X	5	5,26	X	40	X	17,56	40	17,56	10	9513,66	45	18	95	15,6	4,5	X									
VA14	X	X	5	5,21	X	40	X	18,66	40	18,66	14	13433,3	45	18	95	16,7	4,5	X									
VA15	X	X	5	5,18	X	40	X	19,63	40	19,63	18	17356,3	45	18	95	17,6	4,5	X									
VA16	X	X	5	5,17	X	40	X	20,49	40	20,49	22	21287,8	45	18	95	18,5	4,5	X									
VA17	X	X	5	5,15	X	40	X	21,27	40	21,27	26	25221,5	45	18	95	19,3	4,5	X									
VA18	X	X	5	5,14	X	40	X	21,97	40	21,97	30	29168,8	45	18	95	20,0	4,5	X									
VA19	X	X	5	5,14	X	40	X	22,61	40	22,61	34	33099,5	45	18	95	20,6	4,5	X									
VA20	X	X	5	5,13	X	40	X	23,20	40	23,20	38	37043,1	45	18	95	21,2	4,5	X									

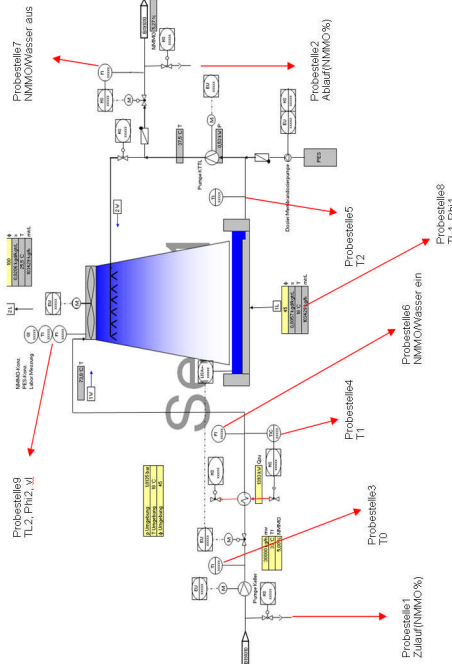
Versuchsprotokoll Versuchskühlturm

Versuch	Uhrzeit	Wetter allgemein	Probierstelle 1		Probierstelle 2		Probierstelle 3		Probierstelle 4		Probierstelle 5		Probierstelle 6		Probierstelle 7		Probierstelle 8		Probierstelle 9		Probierstelle 9	
			C_{wa1} C_{wt} [mg/l]	C_{wa2} C_{wa3} C_{wa4} [mg/l]	T_{w0} [°C]	T_{w1} [°C]	T_{w2} [°C]	m_{w1} [m³/h]	m_{w2} [kg/h]	ϕ_1 [%]	T_{L1} [°C]	ϕ_2 [%]	T_{L2} [°C]	v [m/s]	C_{wa9} [mg/l]	Anmerkung						
VN1	X	X	5	5,84	X	30	14,47	2	1712,66	45	18	95	12,5	4,5	X							
VN2	X	X	5	5,30	X	30	15,41	6	5656,08	45	18	95	13,4	4,5	X							
VN3	X	X	5	5,21	X	30	16,22	10	9604,6	45	18	95	14,2	4,5	X							
VN4	X	X	5	5,16	X	30	16,92	14	13557,4	45	18	95	14,9	4,5	X							
VN5	X	X	5	5,14	X	30	17,55	18	17514	45	18	95	15,6	4,5	X							
VN6	X	X	5	5,12	X	30	18,11	22	21473,8	45	18	95	16,1	4,5	X							
VN7	X	X	5	5,11	X	30	18,62	26	25436,4	45	18	95	16,6	4,5	X							
VN8	X	X	5	5,10	X	30	19,08	30	29401,5	45	18	95	17,1	4,5	X							
VN9	X	X	5	5,09	X	30	19,50	34	33368,8	45	18	95	17,5	4,5	X							
VN10	X	X	5	5,09	X	30	19,88	38	37338,1	45	18	95	17,9	4,5	X							
VN11	X	X	5	5,91	X	40	14,80	2	1693,44	45	18	95	12,8	4,5								
VN12	X	X	5	5,36	X	40	16,29	6	5600,03	45	18	95	14,3	4,5	X							
VN13	X	X	5	5,26	X	40	17,56	10	9513,66	45	18	95	15,6	4,5	X							
VN14	X	X	5	5,21	X	40	18,66	14	13433,3	45	18	95	16,7	4,5	X							
VN15	X	X	5	5,18	X	40	19,63	18	17356,3	45	18	95	17,6	4,5	X							
VN16	X	X	5	5,17	X	40	20,49	22	21287,8	45	18	95	18,5	4,5	X							
VN17	X	X	5	5,15	X	40	21,27	26	25221,5	45	18	95	19,3	4,5	X							
VN18	X	X	5	5,14	X	40	21,97	30	29168,8	45	18	95	20,0	4,5	X							
VN19	X	X	5	5,14	X	40	22,61	34	33099,5	45	18	95	20,6	4,5	X							
VN20	X	X	5	5,13	X	40	23,20	38	37043,1	45	18	95	21,2	4,5	X							

Versuchsprotokoll Versuchskühlturm

Fruh	05:00	13:00	5 Tage	20 Versuche	Vf1-Vf20
Abend	13:00	21:00	5 Tage	20 Versuche	Va1-Va20
Nacht	21:00	05:00	5 Nächte	20 Versuche	Vn1-Vn20
Konzentr.	08:00	16:00	5 Tage	10 Versuche	Vk1-Vk10
Dauer bis sich die konstante Fahrweise einstellt:				2 h	
Aufkonzentrierung:			verschieden	h	

Mögliche Versuchsreihen		T		T		T		T		T	
Durchfluss	m³/h	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
2	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
4	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
6	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
8	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
10	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
12	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
14	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
16	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
18	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
20	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
22	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
24	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
26	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
28	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44
30	20	24	28	32	36	40	44	44	44	44	44



Versuchsprotokoll Versuchskühlturm

VF		VA		VN		VK		
Tag	Versuchsdauer h	V _{va} m³/h	T _{vt} °C	Tag	Versuchsdauer h	T _{vt} °C	Tag	Versuchsdauer h
1	16.04.2012	2	30	23.04.2012	2	30	14.05.2012	1
2	16.04.2012	6	30	23.04.2012	2	6	14.05.2012	2
3	16.04.2012	10	30	23.04.2012	2	10	14.05.2012	3
4	16.04.2012	14	30	23.04.2012	2	14	14.05.2012	4
5	17.04.2012	18	30	24.04.2012	2	18	15.05.2012	5
6	17.04.2012	22	30	24.04.2012	2	22		
7	17.04.2012	26	30	24.04.2012	2	26		
8	17.04.2012	30	30	24.04.2012	2	30		
9	18.04.2012	34	30	25.04.2012	2	34		
10	18.04.2012	38	30	25.04.2012	2	38		
11	18.04.2012	2	40	25.04.2012	2	2		
12	18.04.2012	6	40	25.04.2012	2	6		
13	18.04.2012	10	40	26.04.2012	2	10		
14	19.04.2012	14	40	26.04.2012	2	14		
15	19.04.2012	18	40	26.04.2012	2	18		
16	19.04.2012	22	40	26.04.2012	2	22		
17	20.04.2012	26	40	27.04.2012	2	26		
18	20.04.2012	30	40	27.04.2012	2	30		
19	20.04.2012	34	40	27.04.2012	2	34		
20	20.04.2012	38	40	27.04.2012	2	38		

Physical Properties**Gases**

	MW kg/kmol	cp-Werte kJ/kg/K	cp-Wert v kJ/kg/K	Dichte kg/m ³	Δhv kJ/kg
N ₂	28,01348	1,040			
O ₂	31,9988	0,916			
H ₂ O	18,01528	4,18	1,81	1000	2500
CO ₂	44,0098	0,840			
CO	28,0104	1,040			
SO ₂	64,0648	0,840			
SO ₃	80,0642	0,840			
H ₂	2,01588				
CH ₄	16,04276				
C ₂ H ₂	26,03788				
C ₂ H ₄	28,05376				
C ₂ H ₆	30,06964				
C ₃ H ₆	42,08064				
C ₃ H ₈	44,0965				
C ₄ H ₈	56,1075				
n-C ₄ H ₁₀	58,1234				
iso-C ₄ H ₁₀	58,1234				
H ₂ S	34,0819				
C	12,0110				
H	1,0079				
N	14,0067				
S	32,0660				
O	15,9994				
MoS ₂	160,0600				
MoO ₃	143,9380				
Ni ₃ S ₂	240,2200				
NiO	74,6990				
V ₂ S ₃	198,0630				
V ₂ O ₅	181,8800				
Mo	95,9400				
Ni	58,7000				
V	50,9415				
Al	26,9815				
Al ₂ O ₃	101,9613				
C ₂₅ H ₅₂	352,6880				
Na ₂ S ₂ O ₅	190,0100				
MgSO ₄	120,37				
H ₂ SO ₄	98,0800				
CuSO ₄	159,61				
ZnSO ₄	161,45				
NiSO ₄	154,78				
H ₂ O ₂	34,01468				
Cr ₂ O ₇	215,988				
Cr	51,9961				
SO ₄	96,0636				
Ca(OH) ₂	74,09268				
CaSO ₄	136,1416				
Luft	28,96	1		1,29285714	
NMMO				1130	
NMM				1000	

Antoine Parameter[hPa, °C]

A	B	C
8,19625	1730,46	233,42

Anhang5_Energie_Kuehlturm_mitAnnahmen_Versuchsplanung.xls
Stoffwerte

Eingabedaten		
Umgebungszustand		
T	[°C]	18
p	[bar]	1,0135
p_d^s	[bar]	0,021
φ	[%]	45
Kühlturm		
V_W	[m ³ /h]	140
C_{NMMO}	[%]	5
Q_{zu}	[kW]	1359
T_{W0}	[°C]	30
T_{W1}	[°C]	38
d	[m]	2,4
v_L	[m/s]	5,1
V_L	[Nmtr ² /h]	83059
Z	[m]	3
A	[m ²]	2000
σ	[kg/s/m ²]	0,002
σA	[kg/s]	3,00
Wärmetauscher		
Q_{zu}	[kW]	1359
\dot{m}_{zu}	[kg/s]	25
T_{zu}	[°C]	43
T_{ab}	[°C]	30

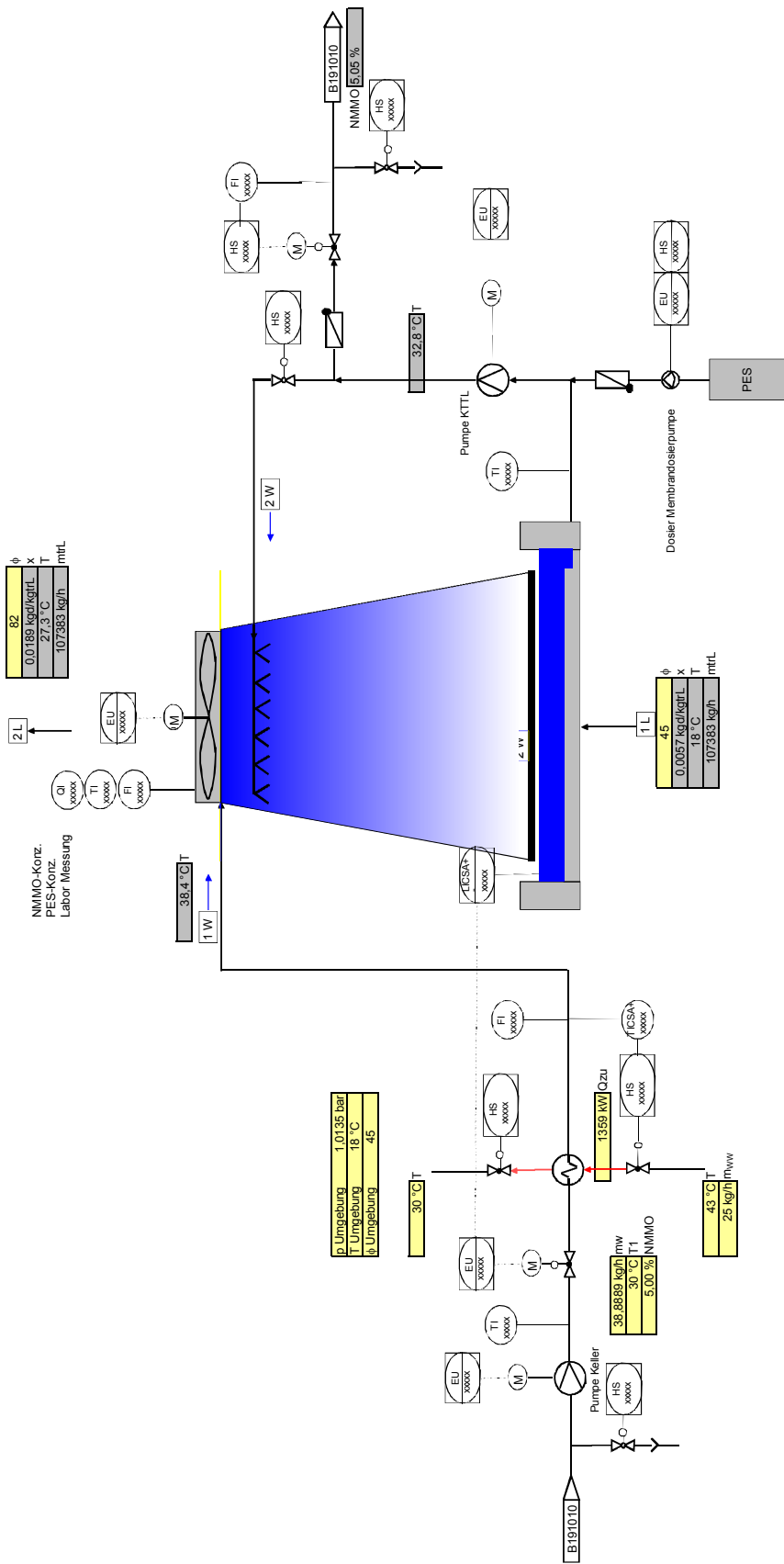
Eingabewerte

Kühlturm			
Vorgaben			
T	[°C]	18	Umgebungstemperatur
p	[bar]	1,0135	Umgebungsdruck
x ₁	[kg/kgtr]	0,0057	Feuchte der Umgebungsluft
p _{d1} ^s	[bar]	0,0206	Sättigungsdampfdruck der Umgebungsluft
T _{L1}	[°C]	18	Umgebungslufttemperatur
m _w	[kg/s]	39	Wasser/NMMO Strom zum Kühlturm
g	[m/s ²]	9,81	Gravitationskonstante
Z	[m]	3	Pumphöhe (Kühlturmbekken bis Sprühebene)
φ ₁	[%]	45	relative Feuchte der Umgebungsluft
p _{d1}	[bar]	0,926225	Dampfdruck der Umgebungsluft
η _p	[-]	0,6	Pumpenwirkungsgrad
m	[kg/h]	107383	Luftzug durch den Kühlturm
σA	[kg/s]	3,00	Faktor nach Merkelgleichung
T _{w1}	[°C]	38	Temperatur Wasser/NMMO Strom zum Kühlturm
Stoffdaten			
MW _w	[kg/kmol]	18,015	Molmasse des Wassers
MW _L	[kg/kmol]	28,960	Molmasse der Luft
c _{pW}	[kJ/kgK]	4,18	spezifische Wärmekapazität des Wassers
c _{pD}	[kJ/kgK]	1,81	spezifische Wärmekapazität des Dampfes
c _{pL}	[kJ/kgK]	1,00	spezifische Wärmekapazität der Luft
Δh _{vW}	[kJ/kg]	2500	Verdampfungsenthalpie von Wasser

Berechnung Kühlturm			
φ ₂	[%]	82	relative Feuchte der Luft am Austritt des Kühlturms
T _{w2}	[°C]	33	Temperaturunterschied Wasser/NMMO Gemisch
T _{L2}	[°C]	27,3	Lufttemperatur am Austritt des Kühlturms
x ₂	[kg/kgtr]	0,0189	Feuchte der Luft am Kühluhraustritt
Δx	[kg/kgtr]	0,0131	Feuchteunterschied der Luft von Ein- Austritt
h _{(1+x)1}	[kJ/kg]	32,53	Enthalpie der Luft am Eintritt des Kühlturms
h _{(1+x)2}	[kJ/kg]	75,41	Enthalpie der Luft am Austritt des Kühlturms
m _{tr1}	[kg/h]	107383	Massestrom der trockenen Luft
m _v	[kg/h]	1410	Massestrom des Feuchteunterschieds der Luft
m _v	[m ³ /h]	1,410	volumenstrom des Feuchteunterschieds der Luft

Berechnung Kühlturm Konzentration			
m _{NMMO1}	[kg/h]	7000	Massenstrom NMMO in den Kühlturm
m _{H2O1}	[kg/h]	133000	Massenstrom Wasser in den Kühlturm
m _{H2O2}	[kg/h]	131590	Massenstrom Wasser aus den Kühlturm
m _{NMMO2}	[kg/h]	7000	Massenstrom NMMO aus den Kühlturm
m _{ges2}	[kg/h]	138590	Massenstrom Gesamt aus den Kühlturm
c _{NMMO2}	[m%]	5,05	Konzentration von NMMO am Austritt des Turms

Berechnung Kühlturm			
Q _k	[kW]	1883	Kühlleistung des Kühlturms
m _v	[%]	1,01	Massestrom des Feuchteunterschieds der Luft
m _v	[kg/s]	0,39	Massestrom des Feuchteunterschieds der Luft
h/a	[h]	8000	Jahresstunden
EDA Kosten/m ³	[€/m ³]	6	Euros pro Kubikmeter Verdampfung
Kosteneinsparung/a	[€]	67701	Euros pro Jahr Einsparung





$$\frac{\sigma \cdot A}{m_{H2O1}} = \frac{c_W \cdot (T_{W1} - T_{W2})}{8,706 \cdot (T_{W1} - T_{W2})}$$

$$\frac{\sigma \cdot A}{m_{H2O1} \cdot c_W} \cdot 8,706 \cdot T_{W1} = \frac{\sigma \cdot A}{m_{H2O1} \cdot c_W} \cdot 8,706 \cdot T_{W2} = T_{W1} - T_{W2}$$

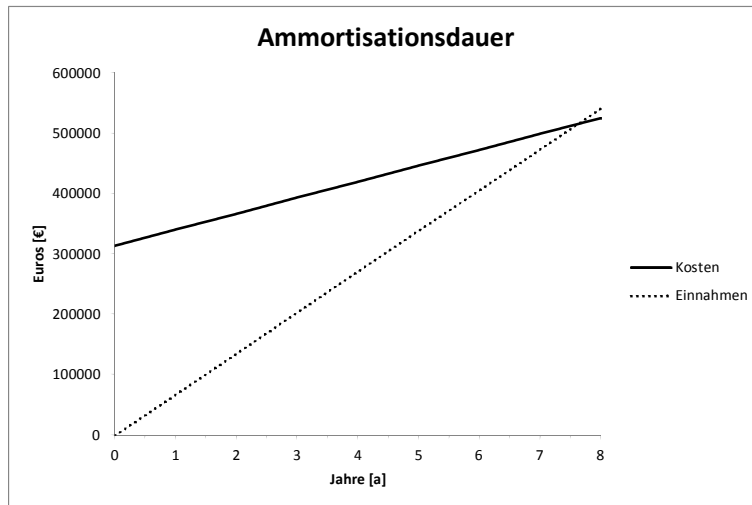
$$T_{W2} = \frac{\sigma \cdot A}{m_{H2O1} \cdot c_W} \cdot 8,706 \cdot T_{W1} - T_{W1}$$

$$T_{W2} = \frac{\sigma \cdot A}{1 - m_{H2O1} \cdot c_W}$$

Kühlturm

Kosten			
Faktor nach Lang	[-]	4,74	Gesamtkostenberechnung
Kühlturm	[€]	60000	Preis laut Spezifikation
Pumpen 2x	[€]	20000	Umwälz und Förderung nach KSB
Ventile und Armaturen	[€]	10000	Angabe LFG
Fixkosten	[€]	314400	
Variable Kosten			
Leistungen Pumpen	[kW]	30	Aus Spezifikation KSB
Leistungen Ventilator	[kW]	25,1	Aus Kühlturmspezifikation
Kosten je kWh	[€]	0,06	Angabe LFG
variable Kosten/h	[€/h]	3	
Einnahmen			
m_v	[m ³ /h]	1,410	Volumenstrom des Feuchteunterschieds der Luft
EDA Kosten/m ³	[€/m ³]	6	Euros pro Kubikmeter Verdampfung
Kosteneinsparung/a	[€]	8	Euros pro Jahr Einsparung

h	0	8000	16000	24000	32000	40000	48000	56000	64000
Jahr	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Kosten	314400	340848	367296	393744	420192	446640	473088	499536	525984
Einnahmen	0	67701	135402	203103	270804	338505	406206	473907	541608



Physical Properties**Gases**

	MW kg/kmol	cp-Werte kJ/kg/K	cp-Wert v kJ/kg/K	Dichte kg/m ³	Δhv kJ/kg
N ₂	28,01348	1,040			
O ₂	31,9988	0,916			
H ₂ O	18,01528	4,18	1,81	1000	2500
CO ₂	44,0098	0,840			
CO	28,0104	1,040			
SO ₂	64,0648	0,840			
SO ₃	80,0642	0,840			
H ₂	2,01588				
CH ₄	16,04276				
C ₂ H ₂	26,03788				
C ₂ H ₄	28,05376				
C ₂ H ₆	30,06964				
C ₃ H ₆	42,08064				
C ₃ H ₈	44,0965				
C ₄ H ₈	56,1075				
n-C ₄ H ₁₀	58,1234				
iso-C ₄ H ₁₀	58,1234				
H ₂ S	34,0819				
C	12,0110				
H	1,0079				
N	14,0067				
S	32,0660				
O	15,9994				
MoS ₂	160,0600				
MoO ₃	143,9380				
Ni ₃ S ₂	240,2200				
NiO	74,6990				
V ₂ S ₃	198,0630				
V ₂ O ₅	181,8800				
Mo	95,9400				
Ni	58,7000				
V	50,9415				
Al	26,9815				
Al ₂ O ₃	101,9613				
C ₂₅ H ₅₂	352,6880				
Na ₂ S ₂ O ₅	190,0100				
MgSO ₄	120,37				
H ₂ SO ₄	98,0800				
CuSO ₄	159,61				
ZnSO ₄	161,45				
NiSO ₄	154,78				
H ₂ O ₂	34,01468				
Cr ₂ O ₇	215,988				
Cr	51,9961				
SO ₄	96,0636				
Ca(OH) ₂	74,09268				
CaSO ₄	136,1416				
Luft	28,96	1		1,29285714	
NMMO				1130	
NMM				1000	

Antoine Parameter[hPa, °C]

A	B	C
8,19625	1730,46	233,42

Mittelwerte der Temperaturen und relativen Feuchte im Jahresschnitt

	Datum von	bis	T [°C]	rel. Luftfeuchte [%]
Winter				
Jänner	13.01.2012	18.01.2012	0,72	48,49
Februar	13.02.2012	18.02.2012	2,15	50,56
Frühling				
April	13.04.2011	18.04.2011	9,23	40,95
Mai	13.05.2011	18.05.2011	15,3	59,58
Sommer				
Juli	13.07.2011	18.07.2011	22,0	63,09
August	13.08.2011	18.08.2011	20,7	66,62
Herbst				
September	13.09.2011	18.09.2011	18,46	68,32
Oktober	13.10.2011	18.10.2011	6,17	58,96

Tagname	
rel. Feuchte	Q1100002.Q
Temperatur	E192000:TI_B11_PNT

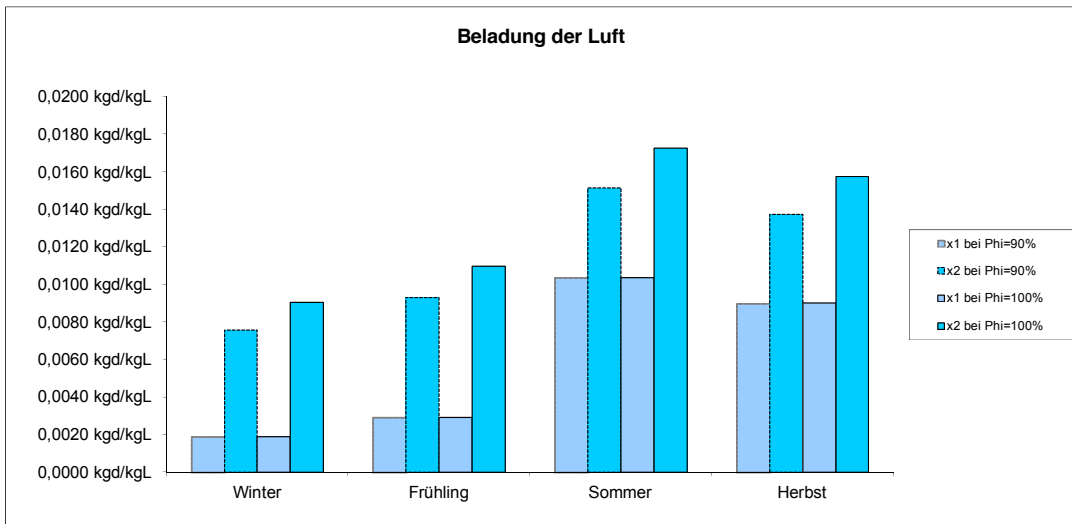
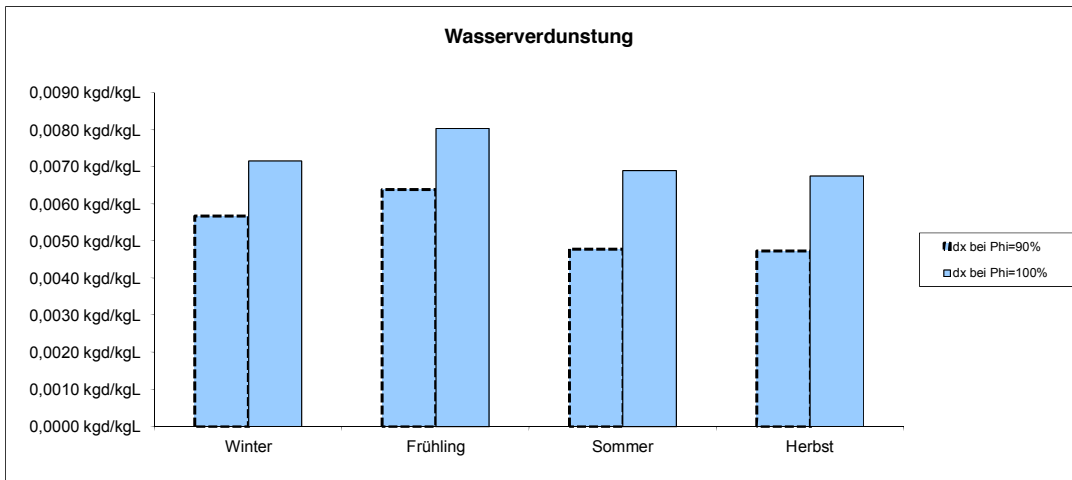
m_{tr}	103429 kg/h
m_w	30000 kg/h
T_{w0}	33 °C
T_{w1}	40 °C
c_{NMMO1}	5 %

Annahmen	
ΔT_{Turm}	8,0 °C
φ_2	90 %

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
x1	0,0019 kgd/kgL	0,0029 kgd/kgL	0,0104 kgd/kgL	0,0090 kgd/kgL
x2	0,0076 kgd/kgL	0,0093 kgd/kgL	0,0152 kgd/kgL	0,0137 kgd/kgL
dx	0,0057 kgd/kgL	0,0064 kgd/kgL	0,0048 kgd/kgL	0,0047 kgd/kgL
φ_1	48 %	41 %	63 %	68 %
φ_2	90 %	90 %	90 %	90 %
T_{L1}	0,7 °C	9,2 °C	22,0 °C	18,5 °C
T_{L2}	11,6 °C	14,7 °C	22,3 °C	20,7 °C
c_{NMMO2}	5,100 %	5,113 %	5,084 %	5,083 %

Annahmen	
ΔT_{Turm}	3,0 °C
φ_2	100 %

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
x1	0,0019 kgd/kgL	0,0029 kgd/kgL	0,0104 kgd/kgL	0,0090 kgd/kgL
x2	0,0091 kgd/kgL	0,0110 kgd/kgL	0,0173 kgd/kgL	0,0158 kgd/kgL
dx	0,0072 kgd/kgL	0,0080 kgd/kgL	0,0069 kgd/kgL	0,0068 kgd/kgL
φ_1	48 %	41 %	63 %	68 %
φ_2	100 %	100 %	100 %	100 %
T_{L1}	0,7 °C	9,2 °C	22,0 °C	18,5 °C
T_{L2}	12,6 °C	15,5 °C	22,6 °C	21,2 °C
c_{NMMO2}	5,127 %	5,143 %	5,122 %	5,119 %



Versuchsprotokoll Versuchskühlturm							
			Probestelle 1	Probestelle 2	Probestelle 3	Probestelle 4	Probestelle 5
			$C_{NMMO} [°N]$ $C_{NMMU} [mg/kg]$ $C_{U} [mg/kg]$	$C_{NMMO} [°N]$ $C_{NMMU} [mg/kg]$ $C_{U} [mg/kg]$	T_{W0}	T_{W1}	T_{W2}
Versuch	Uhrzeit, Datum	Wetter allgemein			[°C]	[°C]	[°C]
VF1	10:28 04.05.2012	starker Regen	$C_{NMMO}=5,59$ $C_{NMMU}=66$ $C_U=54$	$C_{NMMO}=6,07$ $C_{NMMU}=66$ $C_U=48$	34,9	34,9	18,6
VF2	10:28 04.05.2012	Regen	x	$C_{NMMO}=5,87$ $C_{NMMU}=48$ $C_U=51$	34,9	34,9	19,2
VF3	06:31 09.05.2012	Sonnenaufgang wolkenlos	$C_{NMMO}=7,45$ $C_{NMMU}=39$ $C_U=16$	$C_{NMMO}=7,51$ $C_{NMMU}=45$ $C_U=16$	30,4	30,4	21,8
VF4	07:11 09.05.2012	wolkenlos erste Sonnenstrahlen am Turm	x	$C_{NMMO}=7,5$ $C_{NMMU}=45$ $C_U=15$	30,4	30,4	22
VF5	08:26 09.05.2012	Sonne	x	$C_{NMMO}=6,99$ $C_{NMMU}=43$ $C_U=17$	30,4	44,4	25,9
VF6	10:21 09.05.2012	Sonne	$C_{NMMO}=$ $C_{NMMU}=$ $C_U=$	$C_{NMMO}=$ $C_{NMMU}=$ $C_U=$	30,4	30,4	20,9
VF7	06:03 10.05.2012	leichte Wolken, Sonnenaufgang	$C_{NMMO}=8,01$ $C_{NMMU}=33$ $C_U=12$	$C_{NMMO}=8,15$ $C_{NMMU}=35$ $C_U=11$	32,8	42,8	23,9
VF8	08:21 10.05.2012	bewölkt	$C_{NMMO}=$ $C_{NMMU}=$ $C_U=$	$C_{NMMO}=7,43$ $C_{NMMU}=33$ $C_U=10$	32,8	48,7	24,7
VF9	Start: 05:00 06:33 11.05.2012	Sonnenaufgang wolkenlos	$C_{NMMO}=7,43$ $C_{NMMU}=108$ $C_U=8$	$C_{NMMO}=7,59$ $C_{NMMU}=111$ $C_U=8$	32,3	32,3	19,5
VF10	08:51 11.05.2012	blauer Himmel	x	$C_{NMMO}=6,97$ $C_{NMMU}=79$ $C_U=7$	32,3	42,3	25,4
VF11	09:40 11.05.2012	blauer Himmel	x	$C_{NMMO}=7,16$ $C_{NMMU}=113$ $C_U=8$	32,3	52,3	22,7
VF12	11:26 11.05.2012	blauer Himmel	$C_{NMMO}=8,27$ $C_{NMMU}=43$ $C_U=10$	$C_{NMMO}=8,13$ $C_{NMMU}=56$ $C_U=10$	31,7	31,7	19,6
Versuchsprotokoll Versuchskühlturm							
			Probestelle 1	Probestelle 2	Probestelle 3	Probestelle 4	Probestelle 5
			$C_{NMMO} [°N]$ $C_{NMMU} [mg/kg]$ $C_{U} [mg/kg]$	$C_{NMMO} [°N]$ $C_{NMMU} [mg/kg]$ $C_{U} [mg/kg]$	T_{W0}	T_{W1}	T_{W2}
Versuch	Uhrzeit, Datum	Wetter allgemein			[°C]	[°C]	[°C]
VA1	17:42 14.05.2012	wolkig, leichter Regen	$C_{NMMO}=6,16$ $C_{NMMU}=3$ $C_U=6$	$C_{NMMO}=6,31$ $C_{NMMU}=3$ $C_U=7$	30,9	30,9	21,9
VA2	19:00 14.05.2012	wolkig, leichter Regen	x	$C_{NMMO}=6,28$ $C_{NMMU}=4$ $C_U=7$	30,9	40,9	26,2
VA3	20:00 14.05.2012	wolkig, SU leichter Regen	x	$C_{NMMO}=6,23$ $C_{NMMU}=5$ $C_U=8$	30,9	50?	25,5
VA4	16:15 15.05.2012	Sonne, leichte Wolken	$C_{NMMO}=6,05$ $C_{NMMU}=0$ $C_U=10$	$C_{NMMO}=6,12$ $C_{NMMU}=0$ $C_U=9$	30,5	30,5	25
VA5	20:00 15.05.2012	Sonnenuntergang	x	$C_{NMMO}=5,44$ $C_{NMMU}=5$ $C_U=13$	30,5	40,5	25,5
VA6	21:30 15.05.2012	dunkel	x	$C_{NMMO}=4,41$ $C_{NMMU}=0$ $C_U=11$	30,5	40,5	24,2
VA7	16:00 16.05.2012	starker Wind, stark bewölkt,	$C_{NMMO}=7,64$ $C_{NMMU}=0$ $C_U=7$	$C_{NMMO}=7,62$ $C_{NMMU}=18$ $C_U=8$	31,8	31,8	24,2
VA8	18:00 16.05.2012	starker Wind, stark bewölkt,	x	$C_{NMMO}=6,41$ $C_{NMMU}=8$ $C_U=6$	31,8	38,8	28,9
VA9	19:00 16.05.2012	starker Wind, stark bewölkt, leichter Nieselregen	x	$C_{NMMO}=6,70$ $C_{NMMU}=9$ $C_U=7$	31,8	38,8	29,6
VA10	17:53 03.05.2012	blauer Himmel Sonnenuntergang	$C_{NMMO}=6,68$ $C_{NMMU}=187$ $C_U=51$	$C_{NMMO}=6,77$ $C_{NMMU}=149$ $C_U=52$	34,2	34,2	26

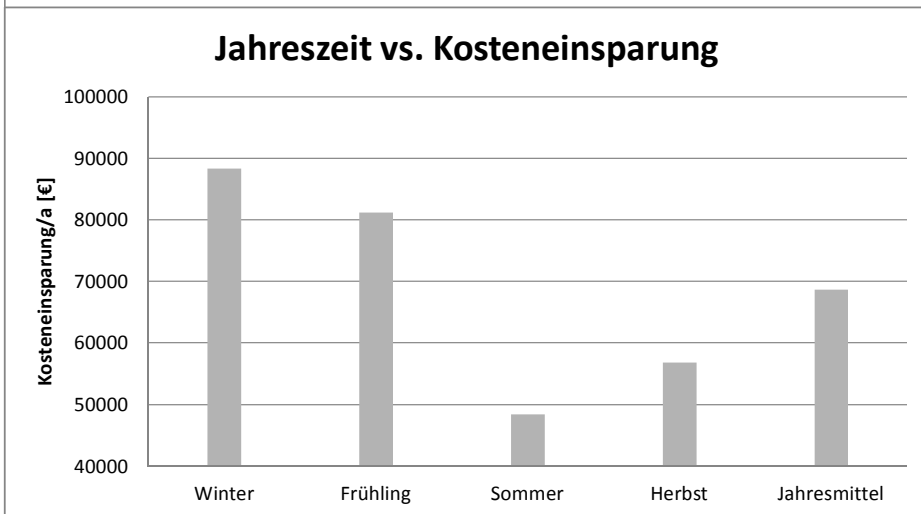
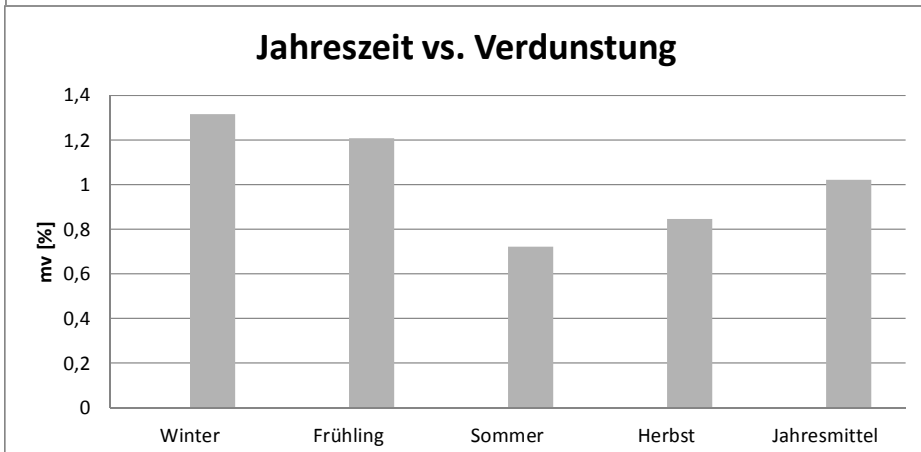
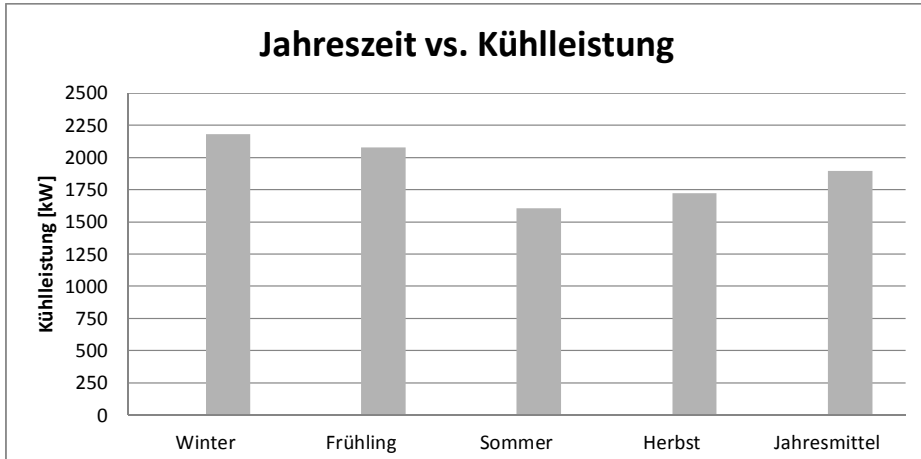
Versuchsprotokoll Versuchskühlturm							
			Probestelle 1	Probestelle 2	Probestelle 3	Probestelle 4	Probestelle 5
			$C_{NH_4O} [N]$ $C_{NH_4M} [mg/kg]$ $C_{NH_4U} [mg/kg]$	$C_{NH_4O} [N]$ $C_{NH_4M} [mg/kg]$ $C_{NH_4U} [mg/kg]$	T_{W0}	T_{W1}	T_{W2}
Versuch	Uhrzeit, Datum	Wetter allgemein			[°C]	[°C]	[°C]
VN1	00:30 21.05.2012	windstill leichte Wolken Sterne	$C_{NH_4O}=6,89$ $C_{NH_4M}=41$ $C_{NH_4U}=9$	$C_{NH_4O}=7,08$ $C_{NH_4M}=39$ $C_{NH_4U}=8$	32,5	32,5	23,2
VN2	01:35 21.05.2012	leichter Wind leichte Wolken Sterne	x	$C_{NH_4O}=7,04$ $C_{NH_4M}=40$ $C_{NH_4U}=9$	32,5	42,5	27
VN3	04:00 21.05.2012	schon hell leichter Wind leichte Wolken	$C_{NH_4O}=7,18$ $C_{NH_4M}=48$ $C_{NH_4U}=10$	$C_{NH_4O}=7,47$ $C_{NH_4M}=36$ $C_{NH_4U}=11$	33	42	23
VN4	04:30 21.05.2012	schon heller leichter Wind leichte Wolken	x	$C_{NH_4O}=7,46$ $C_{NH_4M}=26$ $C_{NH_4U}=11$	33	42	22,8
VN5	05:30 21.05.2012	Sonnenaufgang leichter Wind leichte Wolken	x	$C_{NH_4O}=7,35$ $C_{NH_4M}=34$ $C_{NH_4U}=10$	33	33	19,6
VN6	00:00 21.05.2012	windstill leichte Wolken Sterne	x	$C_{NH_4O}=6,39$ $C_{NH_4M}=0$ $C_{NH_4U}=7$	x	x	x
VN7	20:00 16.05.2012	stark bewölkt, windig	$C_{NH_4O}=6,39$ $C_{NH_4M}=0$ $C_{NH_4U}=7$	$C_{NH_4O}=6,53$ $C_{NH_4M}=15$ $C_{NH_4U}=7$	31,5	39,5	28,2
VN8	20:45 16.05.2012	stark bewölkt, windig, fast finster	x	$C_{NH_4O}=6,28$ $C_{NH_4M}=33$ $C_{NH_4U}=8$	31,5	39,5	29,5
VN9	21:20 16.05.2012	stark bewölkt, windig, finster	x	$C_{NH_4O}=6,24$ $C_{NH_4M}=8$ $C_{NH_4U}=6$	31,5	31,5	23,8
Versuchsprotokoll Versuchskühlturm							
			Probestelle 1	Probestelle 2	Probestelle 3	Probestelle 4	Probestelle 5
			$C_{NH_4O} [N]$ $C_{NH_4M} [mg/kg]$ $C_{NH_4U} [mg/kg]$	$C_{NH_4O} [N]$ $C_{NH_4M} [mg/kg]$ $C_{NH_4U} [mg/kg]$	T_{W0}	T_{W1}	T_{W2}
Versuch	Uhrzeit, Datum	Wetter allgemein			[°C]	[°C]	[°C]
VK1	11:45-13:07 09.05.2012	Sonne wolkenlos	$C_{NH_4O}=7,45$ $C_{NH_4M}=39$ $C_{NH_4U}=16$	$C_{NH_4O}=8,28$ $C_{NH_4M}=50$ $C_{NH_4U}=21$	x	x	20,2
VK2	10:15-13:15 10.05.2012	Sonne blauer Himmel windig	$C_{NH_4O}=8$ $C_{NH_4M}=$ $C_{NH_4U}=$	$C_{NH_4O}=8,75$ $C_{NH_4M}=27$ $C_{NH_4U}=12$	x	x	17
VK3	08:52-10:52 23.05.2012	Sonne, warm	$C_{NH_4O}=6,59$ $C_{NH_4M}=9$ $C_{NH_4U}=6$	$C_{NH_4O}=6,76$ $C_{NH_4M}=7$ $C_{NH_4U}=7$	x	x	33,8
VK4	10:52-13:20 23.05.2012	Sonne schwül	x	$C_{NH_4O}=7,29$ $C_{NH_4M}=4$ $C_{NH_4U}=7$	x	x	23
VK5	13:20-14:52 23.05.2012	Wind, Sonne schwül	x	$C_{NH_4O}=7,73$ $C_{NH_4M}=2$ $C_{NH_4U}=7$	x	x	22,8
VK6	14:52-15:52:00 23.05.2012	kurz vor Gewitter, windig	x	$C_{NH_4O}=8,05$ $C_{NH_4M}=0$ $C_{NH_4U}=8$	x	x	21,7
Versuchsprotokoll Versuchskühlturm							
			Flasche 1	Flasche 2	Flasche 3	Flasche 4	Filter
			$C_{NH_4O} [mg/kg \text{ atoz}]$ $C_{NH_4M} [mg/kg \text{ atoz}]$ $C_{NH_4U} [mg/kg \text{ atoz}]$	$C_{NH_4O} [mg/kg \text{ atoz}]$ $C_{NH_4M} [mg/kg \text{ atoz}]$ $C_{NH_4U} [mg/kg \text{ atoz}]$	$C_{NH_4O} [mg/kg \text{ atoz}]$ $C_{NH_4M} [mg/kg \text{ atoz}]$ $C_{NH_4U} [mg/kg \text{ atoz}]$	$C_{NH_4O} [mg/kg \text{ atoz}]$ $C_{NH_4M} [mg/kg \text{ atoz}]$ $C_{NH_4U} [mg/kg \text{ atoz}]$	Gewicht tara
Versuch	Uhrzeit, Datum	Wetter allgemein			[mg/l]	[mg/l]	[mg]
1	09.05.2012 11:20-13:07	Sonne, wolkenlos	$C_{NH_4O}=13,346$ $C_{NH_4M}=29$ $C_{NH_4U}=60$	$C_{NH_4O}=57$ $C_{NH_4M}=0$ $C_{NH_4U}=33$	$C_{NH_4O}=148$ $C_{NH_4M}=0$ $C_{NH_4U}=56$	$C_{NH_4O}=29$ $C_{NH_4M}=0$ $C_{NH_4U}=42$	x
2	15.05.2012 16:03-18:02	Sonne, leichte Wolken	$C_{NH_4O}=8$ $C_{NH_4M}=0$ $C_{NH_4U}=0$	x	x	x	x
3	09:39-15:59 24.05.2012	Sonne, schwül, gewitrig	$C_{NH_4O}=18,4$ $C_{NH_4M}=6,4$ $C_{NH_4U}=0$	$C_{NH_4O}=0$ $C_{NH_4M}=6,7$ $C_{NH_4U}=0$	$C_{NH_4O}=0$ $C_{NH_4M}=0$ $C_{NH_4U}=0$	$C_{NH_4O}=0$ $C_{NH_4M}=0$ $C_{NH_4U}=0$	x
Versuchsprotokoll Versuchskühlturm							
				Probestelle 5	Probestelle 6	Probestelle 9	
			$C_{NH_4O} [N]$ $C_{NH_4M} [mg/kg]$ $C_{NH_4U} [mg/kg]$	T_{W1}	T_{W2}	m_{W1}	v
Versuch	Uhrzeit, Datum	Wetter allgemein		[°C]	[°C]	[m³/h]	[m/s]
VB0	09:00 24.05.2012	bewölkt	$C_{NH_4O}=6,4$ $C_{NH_4M}=119$ $C_{NH_4U}=23$	32,8	22,6	1,34	1,5
VB1	09:20 29.05.2012	leicht wolkig	$C_{NH_4O}=8,67$ $C_{NH_4M}=114$ $C_{NH_4U}=20$	32,8	22,6	1,34	1,5
VB2	08:50 04.06.2012	blauer Himmel, 25°C	C_{NH_4O} =von 6,67 auf 7,17 C_{NH_4M} =von 89 auf 91 C_{NH_4U} =von 27 auf 27	32,8	22,6	1,34	1,5
VB3	09:20 12.06.2012	Regen	C_{NH_4O} =von 6,51 auf 6,99 C_{NH_4M} =von 90 auf 93 C_{NH_4U} =von 23 auf 23	32,8	22,6	1,34	1,5
VB4	09:20 16.06.2012	Regen	C_{NH_4O} =von 6,9 auf 7,34 C_{NH_4M} =von 82 auf 83 C_{NH_4U} =von 23 auf 23	32,8	22,6	1,34	1,5

Versuchsprotokoll Versuchskühlturm								
Probestelle 6	Probestelle 7	Probestelle 8	Probestelle 8	Probestelle 9	Probestelle 9	Probestelle 9	Versuch	Anmerkung
m_w	m_{ges2}	φ_1	T_{L1}	φ_2	T_{L2}	v		
[m ³ /h]	[m ³ /h]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[m/s]		
3,58	x	86,6	14,7	90,1	14,3	5,1	VF1	
2,6	x	87,6	14,3	91,6	14,8	5,1	VF2	
9,31	x	82,1	10,3	94,1	13,4	5,1	VF3	
20	x	77,1	12,1	91,7	13,5	5,1	VF4	
15	x	73,3	15,2	88,6	16	5,1	VF5	
x	x	34,9	20,8	84,4	17	5,1	VF6	
7,89	x	75,1	13,1	55,3	14,7	5,1	VF7	
18	x	72,8	15,7	90,6	18	5,1	VF8	
3,74	x	75,1	11,5	91	14,2	5,1	VF9	
3,68-13	x	76,9	17,8	87	17,9	5,1	VF10	
3,68-13	x	57,6	23,5	83	19,5	5,1	VF11	
0,5	x	38	25,7	82	18,4	5,1	VF12	
Versuchsprotokoll Versuchskühlturm								
Probestelle 6	Probestelle 7	Probestelle 8	Probestelle 8	Probestelle 9	Probestelle 9	Probestelle 9	Versuch	Anmerkung
m_w	m_{ges2}	φ_1	T_{L1}	φ_2	T_{L2}	v		
[m ³ /h]	[m ³ /h]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[m/s]		
3,5	x	46,3	13,7	75,3	16	1,5	VA1	frisch befüllt, ab hier mit Filtervlies
3,5	x	51	13,2	77,8	18,8	1,5	VA2	
3,5	x	56,2	12,7	82	19,3	1,5	VA3	
8,6	x	36,5	19,1	76	22,2	1,5	VA4	Start 15Uhr nicht befüllt
8,6	x	55	17	74	19,7	1,5	VA5	frisch befüllt, Systemschwankungen
8,6	x	59	14	82	18,4	1,5	VA6	leichter Nebel
15,8	x	38	14,9	75,2	19,8	1,5	VA7	
15,8	x	41,9	13,8	81	22,6	1,5	VA8	
15,8	x	45	13,6	86	22,6	1,5	VA9	
14,9	x	43,4	25,1	90	19,8	5,1	VA10	

Versuchsprotokoll Versuchskühlturm								
Probestelle 6	Probestelle 7	Probestelle 8	Probestelle 8	Probestelle 9	Probestelle 9	Probestelle 9	Versuch	Anmerkung
m_w	m_{ges2}	φ_1	T_{L1}	φ_2	T_{L2}	v		
[m³/h]	[m³/h]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[m/s]		
4,95	x	60,5	17,4	79	18,9	1,5	VN1	
4,95	x	67,4	16,1	85,6	20,4	1,5	VN2	
2,34	x	75,6	14,4	86,9	16,9	1,5	VN3	
2,34	x	87,8	13,1	94,3	16,5	1,5	VN4	
2,34	x	83,5	12,8	91	15	1,5	VN5	
x	x	56,6	18,2	79	19,2	1,5	VN6	
15,8	x	48	13	82,2	22,1	1,5	VN7	
15,8	x	52	11,9	89,5	22,4	1,5	VN8	Nebel sichtbar
15,8	x	66,5	11	88	17,9	1,5	VN9	Nebel sichtbar
Versuchsprotokoll Versuchskühlturm								
Probestelle 6	Probestelle 7	Probestelle 8	Probestelle 8	Probestelle 9	Probestelle 9	Probestelle 9	Versuch	Anmerkung
m_w	m_{ges2}	φ_1	T_{L1}	φ_2	T_{L2}	v		
[m³/h]	[m³/h]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[m/s]		
x	x	37,6	22,9	79,4	18,8	5,1	VK1	
x	x	29,8	26,6	80	17,9	5,1	VK2	
x	x	67,8	20,9	81	24,2	1,5	VK3	
x	x	53,1	23,9	88	20,6	1,5	VK4	
x	x	40	26,4	78	23,1	1,5	VK5	
x	x	40	26	77	23,1	1,5	VK6	
Versuchsprotokoll Versuchskühlturm								
Gewicht nach Messung	Abscheidung	Glührückstand	Anteil organisch	Anteil anorganisch	Durchfluss	Gaszähler	Gewicht Flasche 1 VE Wasser	Gewicht Flasche 2 VE Wasser
[mg]	[g/Nm³]	[g/Nm³]	[g/Nm³]	[g/Nm³]	[Nm³/h]	[Nm³]	[g]	[g]
x	0,018351094	0,001524976	0,016826118	0,001524976	1,25	2,22875	x	x
x	x	x	x	x	0,61	1,022	421,2	x
x	0,0035	0,0008001	0,0026999	0,0008001	0,6	2	x	346,74
Versuchsprotokoll Versuchskühlturm								
Gesamtkeimzahl	Hefe	Pilze	Legionellen (nicht möglich zu messen weil stark mit Pseudomonas)	Pseudomonas aeruginosa/100ml	Koloniezahl/KBE /ml bei 30°C		Versuch	Anmerkung
10 ⁷	0	0	x	300	~400000		VB0	Grubenprobe
10 ⁶	0	0	x	200	~500000		VB1	keine Anpackungen, schöner Schaum, vorne schwarze Substanz (Rückspüllung)
10 ⁶	0	0	x	550	~300000		VB2	leichte Schwammerla bei Kübel
10 ⁵	0	0	0	0	0		VB3	chte Schwammerla bei Kübel
10 ⁵	0	0	x	480	~200000		VB4	etwas Schleim am Boden des Turms

Upscaling Kühlturm 4 Jahreszeiten

Jahreszeit	ϕ_1 [%]	T_{L1} [°C]	Q_K [kW]	m_v [%]	m_v [kg/s]	Kosteneinsparung/a [€]
Winter	48	0,7	2181	1,31	0,51	88316
Frühling	41	9,2	2078	1,21	0,47	81162
Sommer	63	22	1604	0,72	0,28	48394
Herbst	68	18,5	1725	0,84	0,33	56769
Jahresmittel	55	12,6	1897	1,02	0,40	68660



$$\int_{h_{L,S}}^{h_L} c_{pw} \cdot dw = \int \frac{\sigma \cdot dA}{m_w}$$

$$m_{L20} \cdot c_w \cdot T_{w1} + m_L \cdot (h_{(L,S)} - h_{(L,S)}) = T_{w2}$$

$$\frac{m_{L20} \cdot c_w \cdot T_{w1} + m_L \cdot (h_{(L,S)} - h_{(L,S)})}{(h_{L20} - c_w \cdot \Delta x - m_L \cdot c_w)} = T_{w2}$$

$$\sigma \cdot A = m_w \cdot c_w \cdot (T_{w2} - T_{w1})$$

$$h_{L,S} - h_L$$

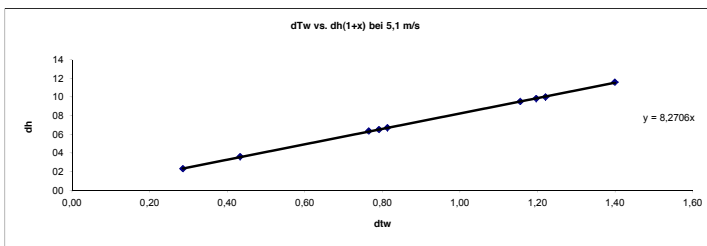
Fund	Blanz	exakt													
		dt	A m²/m³	Vpackung [m³]	A	σA [kg/s]	F [kg/s/m²]	Merkel	dx	Nenner	Zähler	hw2	dt	σA [kg/s]	F [kg/s/m²]
23.07 kg/s	1.19 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	23.07 kg/s	0.0028 kg/dkg	0.52	0.0028 kg/dkg	4048	185	21.85 °C	1.15 °C	22.46 kg/s	0.014 kg/s/m²	0.51
23.07 kg/s	0.29 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	23.07 kg/s	0.0007 kg/dkg	0.92	0.0007 kg/dkg	3509	185	16.91 °C	0.29 °C	22.51 kg/s	0.014 kg/s/m²	0.51
23.07 kg/s	1.25 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	23.07 kg/s	0.0023 kg/dkg	0.92	0.0023 kg/dkg	3387	185	18.28 °C	1.22 °C	22.56 kg/s	0.014 kg/s/m²	0.51
23.07 kg/s	0.81 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	23.07 kg/s	0.0020 kg/dkg	0.92	0.0020 kg/dkg	4285	185	23.11 °C	0.79 °C	22.41 kg/s	0.014 kg/s/m²	0.50
23.07 kg/s	1.22 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	23.07 kg/s	0.0027 kg/dkg	0.92	0.0027 kg/dkg	3819	185	20.60 °C	1.20 °C	22.54 kg/s	0.014 kg/s/m²	0.51
23.07 kg/s	0.45 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	23.07 kg/s	0.0014 kg/dkg	0.92	0.0014 kg/dkg	4630	185	24.97 °C	0.43 °C	22.15 kg/s	0.013 kg/s/m²	0.50
23.07 kg/s	0.79 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	23.07 kg/s	0.0022 kg/dkg	0.92	0.0022 kg/dkg	4660	185	25.14 °C	0.76 °C	22.24 kg/s	0.013 kg/s/m²	0.50
23.07 kg/s	1.44 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	23.07 kg/s	0.0037 kg/dkg	0.92	0.0037 kg/dkg	4316	185	23.30 °C	1.40 °C	22.36 kg/s	0.014 kg/s/m²	0.50
23.07 kg/s	0.84 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	23.07 kg/s	0.0021 kg/dkg	0.92	0.0021 kg/dkg	3928	185	21.19 °C	0.81 °C	22.43 kg/s	0.014 kg/s/m²	0.51
6.79 kg/s	0.95 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0028 kg/dkg	0.15	0.0028 kg/dkg	4204	185	22.68 °C	0.34 °C	6.60 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	0.39 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0007 kg/dkg	0.15	0.0007 kg/dkg	4159	185	22.42 °C	0.36 °C	6.62 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	0.27 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0023 kg/dkg	0.15	0.0023 kg/dkg	3858	185	19.34 °C	0.26 °C	6.63 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	0.45 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0016 kg/dkg	0.15	0.0016 kg/dkg	4273	185	24.49 °C	0.42 °C	6.63 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	0.34 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0034 kg/dkg	0.15	0.0034 kg/dkg	4574	185	21.68 °C	0.32 °C	6.60 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	0.37 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0025 kg/dkg	0.15	0.0025 kg/dkg	4236	185	22.85 °C	0.35 °C	6.67 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	0.65 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0028 kg/dkg	0.15	0.0028 kg/dkg	4893	185	26.37 °C	0.63 °C	6.66 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	0.84 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0040 kg/dkg	0.15	0.0040 kg/dkg	4643	185	24.19 °C	0.81 °C	6.55 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	0.17 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0051 kg/dkg	0.15	0.0051 kg/dkg	4645	185	25.04 °C	0.46 °C	6.56 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	0.63 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0069 kg/dkg	0.15	0.0069 kg/dkg	4374	185	23.59 °C	0.61 °C	6.59 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	1.25 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0100 kg/dkg	0.15	0.0100 kg/dkg	4338	185	23.40 °C	1.21 °C	6.58 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	1.32 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0106 kg/dkg	0.15	0.0106 kg/dkg	5131	185	27.69 °C	1.27 °C	6.55 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	1.21 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0084 kg/dkg	0.15	0.0084 kg/dkg	5249	185	26.33 °C	1.27 °C	6.57 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	1.40 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0109 kg/dkg	0.15	0.0109 kg/dkg	5010	185	27.03 °C	1.17 °C	6.57 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	0.81 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0059 kg/dkg	0.15	0.0059 kg/dkg	5215	185	26.15 °C	1.35 °C	6.56 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
23.07 kg/s	0.92 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	23.07 kg/s	0.0023 kg/dkg	0.52	0.0023 kg/dkg	4268	185	23.02 °C	0.78 °C	6.61 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15
6.79 kg/s	0.75 °C	150 m³/m³	11 m³	1654 m²	6.79 kg/s	0.0061 kg/dkg	0.15	0.0061 kg/dkg	4065	185	21.93 °C	0.90 °C	22.41 kg/s	0.014 kg/s/m²	0.50
									4534	185	24.45 °C	0.73 °C	6.58 kg/s	0.004 kg/s/m²	0.15

Kühlturm Zusammenhänge

$$\int_{h_{t,2} - h_{t,1}} c_w \cdot dT_w = \int \frac{\sigma \cdot dA}{m_w} \quad \text{Merkel- Hauptgleichung}$$

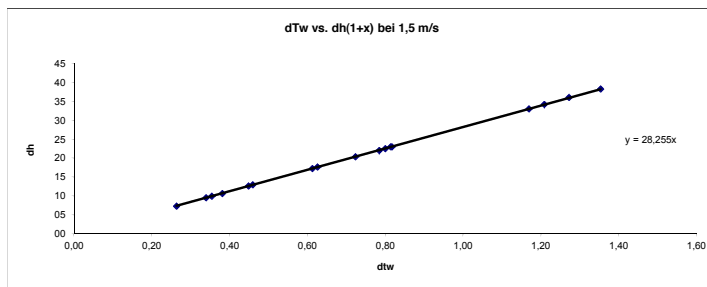
Geschwindigkeit 5,1 m/s

dT _w	h _{(1+x)1}	h _{(1+x)2}	dh _(1+x)
0,29	37,0	39,3	2,4
0,43	42,8	46,4	3,6
0,76	35,3	41,7	6,4
0,79	31,0	37,6	6,5
0,81	29,3	36,0	6,7
1,15	34,1	43,6	9,5
1,20	26,5	36,4	9,9
1,22	27,6	37,6	10,0
1,40	36,3	47,9	11,6



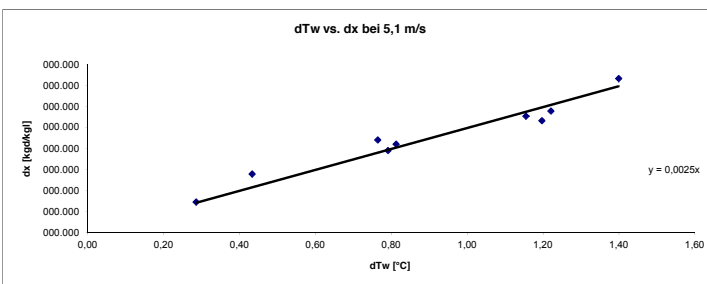
Geschwindigkeit 1,5 m/s

dT _w	h _{(1+x)1}	h _{(1+x)2}	dh _(1+x)
0,26	32,3	39,7	7,4
0,34	34,1	43,6	9,5
0,35	36,5	46,5	10,0
0,38	34,1	44,8	10,7
0,45	25,1	37,8	12,6
0,46	33,9	46,9	13,0
0,61	28,9	46,2	17,3
0,63	35,7	53,4	17,7
0,72	25,4	45,8	20,4
0,78	24,7	46,8	22,0
0,80	25,1	47,6	22,6
0,81	31,9	54,9	23,0
0,82	25,7	48,7	23,0
1,17	24,3	57,3	33,0
1,21	24,2	58,4	34,2
1,27	24,6	60,7	36,0
1,35	23,3	61,6	38,3



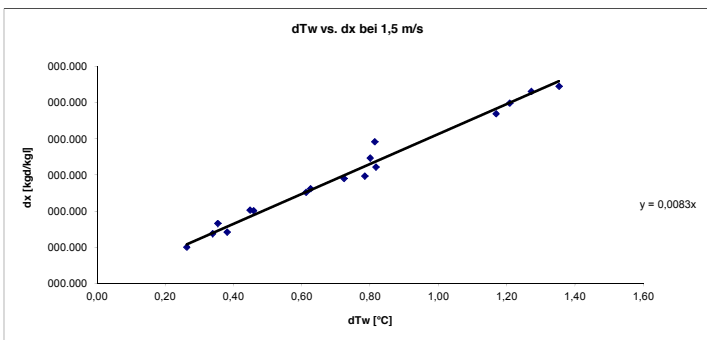
Geschwindigkeit 5,1 m/s

dx	dT _w
0,00073	0,29
0,00139	0,43
0,00220	0,76
0,00195	0,79
0,00210	0,81
0,00277	1,15
0,00266	1,20
0,00289	1,22
0,00366	1,40



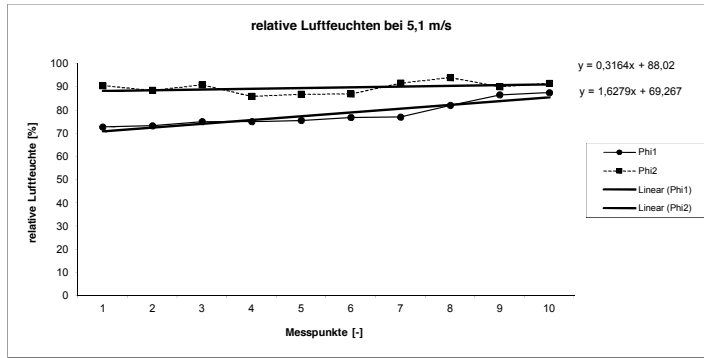
Geschwindigkeit 1,5 m/s

dT _w	dx
0,26	0,00203
0,34	0,00277
0,35	0,00334
0,38	0,00286
0,45	0,00408
0,46	0,00404
0,61	0,00505
0,63	0,00525
0,72	0,00582
0,78	0,00595
0,80	0,00695
0,81	0,00784
0,82	0,00645
1,17	0,00939
1,21	0,00997
1,27	0,01062
1,35	0,01090



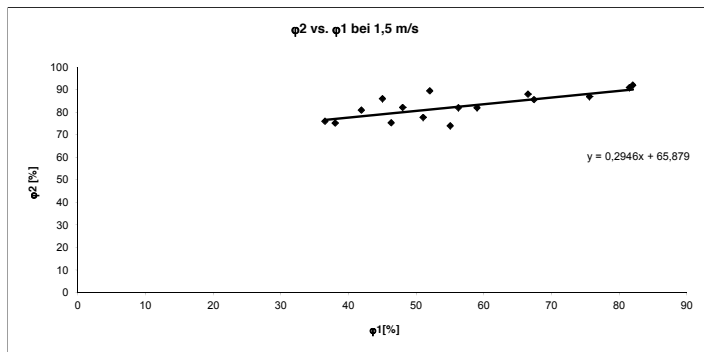
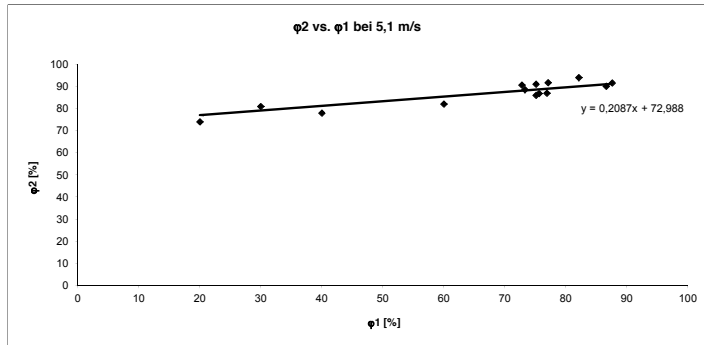
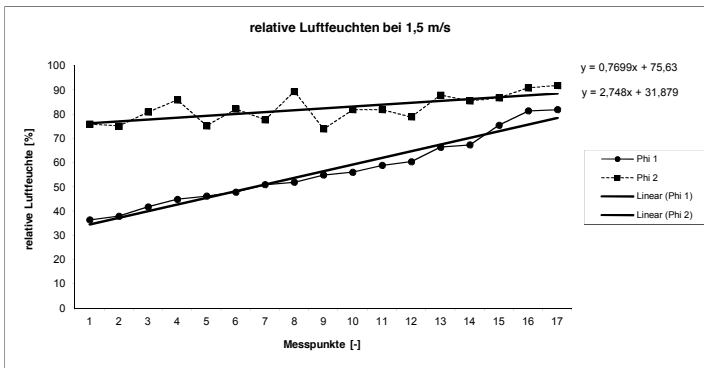
Geschwindigkeit 5,1 m/s

φ1	φ2	T _{L1}	T _{L2}
72,8	90,6	14,4	16,9
73,3	88,6	14,3	14,8
75,1	91	14,7	14,3
75,1	86	11,5	14,2
75,6	86,9	13,1	14,7
76,9	87	10,3	13,4
77,1	91,7	17,8	17,9
82,1	94,1	15,2	16
86,6	90,1	15,7	18
87,6	91,6	12,1	13,5
60	82		
40	78		
30	81		
20	74		



Geschwindigkeit 1,5 m/s

φ1	φ2	T _{L1}	T _{L2}
36,5	76	14,4	16,9
38	75,2	13,1	16,5
41,9	81	12,8	15
45	86	13,7	16
46,3	75,3	13,2	18,8
48	82,2	12,7	19,3
51	77,8	17,4	18,9
52	89,5	16,1	20,4
55	74	19,1	22,2
56,2	82	17	19,7
59	82	14	18,4
60,5	79	14,9	19,8
66,5	88	13,8	22,6
67,4	85,6	13,6	22,6
75,6	86,9	13	22,1
81,5	91	11,9	22,4
82	92	11	17,9



Physical Properties**Gases**

	MW kg/kmol	cp-Werte kJ/kg/K	cp-Wert v kJ/kg/K	Dichte kg/m ³	Δhv kJ/kg
N ₂	28,01348	1,040			
O ₂	31,9988	0,916			
H ₂ O	18,01528	4,18	1,81	1000	2500
CO ₂	44,0098	0,840			
CO	28,0104	1,040			
SO ₂	64,0648	0,840			
SO ₃	80,0642	0,840			
H ₂	2,01588				
CH ₄	16,04276				
C ₂ H ₂	26,03788				
C ₂ H ₄	28,05376				
C ₂ H ₆	30,06964				
C ₃ H ₆	42,08064				
C ₃ H ₈	44,0965				
C ₄ H ₈	56,1075				
n-C ₄ H ₁₀	58,1234				
iso-C ₄ H ₁₀	58,1234				
H ₂ S	34,0819				
C	12,0110				
H	1,0079				
N	14,0067				
S	32,0660				
O	15,9994				
MoS ₂	160,0600				
MoO ₃	143,9380				
Ni ₃ S ₂	240,2200				
NiO	74,6990				
V ₂ S ₃	198,0630				
V ₂ O ₅	181,8800				
Mo	95,9400				
Ni	58,7000				
V	50,9415				
Al	26,9815				
Al ₂ O ₃	101,9613				
C ₂₅ H ₅₂	352,6880				
Na ₂ S ₂ O ₅	190,0100				
MgSO ₄	120,37				
H ₂ SO ₄	98,0800				
CuSO ₄	159,61				
ZnSO ₄	161,45				
NiSO ₄	154,78				
H ₂ O ₂	34,01468				
Cr ₂ O ₇	215,988				
Cr	51,9961				
SO ₄	96,0636				
Ca(OH) ₂	74,09268				
CaSO ₄	136,1416				
Luft	28,96	1		1,29285714	
NMMO				1130	
NMM				1000	

Antoine Parameter[hPa, °C]

A	B	C
8,19625	1730,46	233,42

Anhang10_Auswertungsfile.xls
Stoffwerte

LEISTUNGSPLAN

Controlling am: 15.06.2012

Projekt: Diplomarbeit Kühlturm

1. Projektplanung		2. Versuchsplanung		3. Projektstatusbericht		4. Versuchsdurchführung		5. Projektstatusbericht		6. Auswertung und Analyse		7. Doku und Präsentation	
1.1	PSP erstellen	2.1	Ist Stand	3.1	Bericht inkl. Präsentation	4.1	detaillierte Versuchsabnahme	5.1	Bericht inkl. Präsentation	6.1	Ergebnisdarstellung	7.1	Dokumentation
Ziel	PSP erstellen	Ziel	Vor Ort eruierten	Ziel	Erstellung der Unterlagen	Ziel	Plan für Versuche	Ziel	Erstellung der Unterlagen	Ziel	Auswertung der Versuche	Ziel	Genau und übersichtlich
Erg.	Balkenplan erstellen	Erg.	Aus Doku eruierten	Erg.	Bestandsaufnahme	Erg.	Präzise Versuchsreihen	Erg.	Bestandsaufnahme	Erg.	Vergleich mit Vorberech.	Erg.	Nachvollziehbare klar
Erg.	PSP	Erg.	Bestandsaufnahme	Erg.	Diskussion	Erg.	Versuchsabnahme	Erg.	Diskussion	Erg.	Aussage über die Versuche	Erg.	strukturierte Arbeit
Erg.	Balkenplan	Erg.	Event. Zukauf	Erg.	Infos für Versuch	Erg.	Planung vorher OK	Erg.	Infos für Versuch	Erg.	Aussage über die Bilanzen	Erg.	
Erg.		Erg.	Für Zubeinherrmittlung	Erg.		Erg.	Planung vorher OK	Erg.		Erg.		Erg.	
STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>
1.2	Organisatorisches	2.2	Literaturrecherche	3.2	Bericht inkl. Präsentation	4.2	IBN	5.2	Bericht inkl. Präsentation	6.2	Analyse	7.2	Präsentation
Ziel	Formalitäten abwickeln	Ziel	Literatur beschaffung	Ziel	Erstellung der Unterlagen	Ziel	Versuchsreihe ermöglichen	Ziel	Erstellung der Unterlagen	Ziel	Analysieren des Erhaltenen	Ziel	Erstellen und präsentieren
Erg.	Sicherheitsbeleuchtung	Erg.	Projektkenntnisse	Erg.	Bestandsaufnahme	Erg.	Wenig Zeitaufwand	Erg.	Bestandsaufnahme	Erg.	Wo ist Verbesserung möglich	Erg.	Abschluss
Erg.	Werksbesichtigung	Erg.	EDV Zubeinh.	Erg.	Diskussion	Erg.	Problemlösung, rasch	Erg.	Diskussion	Erg.	Wo ist Scale Up möglich	Erg.	
Erg.	Sicherheitsausbildung	STA	<input type="radio"/>	Erg.	Infos für Versuch	Erg.	Planung vorher OK	Erg.	Infos für Versuch	Erg.	Energieeinsparung	STA	<input type="radio"/>
STA	<input type="radio"/>	Ziel	Am Kühlturm	Erg.		Erg.	Planung vorher OK	Erg.		Erg.	Änderungen	STA	<input type="radio"/>
1.3	Der Tercel Prozess	Ziel	Rund um den Turm	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>
Ziel	Allgemeines zum Prozess	Erg.	Überblick	4.3	Versuche	4.3	Versuche	6.3	Gesamtmittelgebr.	6.3	Gesamtmittelgebr.	6.3	Gesamtmittelgebr.
Erg.	Grundkenntnisse	Erg.	Benötigte Stromgrößen	Ziel	Reibungsfreier Ablauf	Ziel	Reibungsfreier Ablauf	Ziel	Ersetzung des Turms	Ziel	Ersetzung des Turms	Ziel	Ersetzung des Turms
Erg.	NMTC-Rückgewinnung	STA	<input type="radio"/>	Erg.	Platzlose Versuchsreihen	Erg.	Ausagekräftige Werte	Erg.	Ersetzung des Turms	Erg.	Möglichkeiten des Einsatzes	Erg.	Möglichkeiten des Einsatzes
Erg.	Kühlturm Einbindung	Ziel	Benötigtes Zubehör	Erg.	Planung vorher OK	Erg.	Planung vorher OK	Erg.	Infos für Versuch	Erg.	Möglichkeiten der Einsparung	Erg.	Möglichkeiten der Einsparung
Erg.	Überblick	Ziel	Erstellung	Erg.	Planung vorher OK	Erg.	Planung vorher OK	Erg.	Infos für Versuch	Erg.	Idealer Einsatz	Erg.	Idealer Einsatz
STA	<input type="radio"/>	Erg.	Beschaffung ermöglicht	Erg.		Erg.	Planung vorher OK	Erg.		Erg.		STA	<input type="radio"/>
2.5	Sicherheit	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>
Ziel	Versuchsbetrieb sichern	Ziel	Sicherheitsbeleuchtung	Ziel	Erstellung der Unterlagen	Ziel	Versuchsreihe ermöglichen	Ziel	Erstellung der Unterlagen	Ziel	Analysieren des Erhaltenen	Ziel	Erstellen und präsentieren
Erg.	Größe von Auffangbecken	Erg.	Risikoprüfung	Erg.	Bestandsaufnahme	Erg.	Wenig Zeitaufwand	Erg.	Bestandsaufnahme	Erg.	Wo ist Verbesserung möglich	Erg.	Abschluss
Erg.	Montageplan	Erg.	Montageplan	Erg.	Diskussion	Erg.	Problemlösung, rasch	Erg.	Diskussion	Erg.	Wo ist Scale Up möglich	Erg.	
2.6	Betrieb des Turms	STA	<input type="radio"/>	Erg.	Infos für Versuch	Erg.	Planung vorher OK	Erg.	Infos für Versuch	Erg.	Energieeinsparung	STA	<input type="radio"/>
Ziel	R & I Pläne erstellen	Ziel	Instrumente u. Messungen	Erg.		Erg.	Planung vorher OK	Erg.		Erg.	Änderungen	STA	<input type="radio"/>
Erg.	Detaillplanung	Erg.	Fertigmessungen	Erg.		Erg.	Planung vorher OK	Erg.		Erg.		STA	<input type="radio"/>
2.7	Versuchsabnahme	STA	<input type="radio"/>	Erg.		Erg.	Planung vorher OK	Erg.		Erg.		STA	<input type="radio"/>
Ziel	Genauer Plan	Ziel	Genauer Plan	Erg.		Erg.	Planung vorher OK	Erg.		Erg.		STA	<input type="radio"/>
Erg.	Ergebnisdarstellung	Erg.	Ergebnisdarstellung	Erg.		Erg.	Planung vorher OK	Erg.		Erg.		STA	<input type="radio"/>
STA	<input type="radio"/>	STA	<input type="radio"/>	Erg.		Erg.	Planung vorher OK	Erg.		Erg.		STA	<input type="radio"/>

STA	Status
<input type="radio"/>	Beginn
<input type="radio"/>	Mittel
<input checked="" type="radio"/>	Abgeschlossen