

Leistungsbeschreibung

**Detail Engineering und Bau eines Wärmerückgewinnungs-Prüfstands zur
Untersuchung der Wärmerückgewinnung aus feuchter
Papiermaschinenabluft**

Modellfabrik Papier gGmbH



Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Projektbeschreibung	3
2	Ziel und Zweck des Prüfstandes	3
3	Prozessbeschreibung	3
4	Arbeitspakete	7
4.1	Einarbeitung in den Prüfstand.....	7
4.2	Mechanische Konstruktion und Layout des Prüfstandes	7
4.3	Beschaffung von Komponenten und zugehörigen Artikeln	8
4.4	Montage, Inbetriebnahme und FAT beim Auftragnehmer	8
4.5	Lieferung, Installation und SAT am Standort MFP	8
5	Deliverables.....	8
5.1	Planung und Engineering	8
5.2	Beschaffung	9
5.3	Fertigung, Montage und FAT.....	9
5.4	Transport, Installation bei MFP, SAT und Inbetriebnahme	9
6	Zeitplan:	10
7	Factory Acceptance Test und Site Acceptance Test	11
7.1	Factory Acceptance Test (FAT)	11
7.2	Site Acceptance Test (SAT)	13
8	Anhang.....	17
8.1	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema.....	17
8.2	DWSIM-Simulation	18
8.3	Komponentenliste	19

1 Allgemeine Projektbeschreibung

Die Modellfabrik Papier beabsichtigt den Bau eines Labor-Prüfstands für Wärmepumpen mit offenem Kreislauf (Wärmerückgewinnungs-Prüfstand). Dieser Prüfstand soll die Wärmerückgewinnung aus feuchter Abluft einer Papierfabrik mit einer Trocknungshaube demonstrieren.

2 Ziel und Zweck des Prüfstandes

Ziel des Prüfstands ist die Demonstration und Untersuchung der Wärmerückgewinnung aus warmer feuchter Abluft der Trocknungspartie einer Papiermaschine mittels einer stoffoffenen Wärmepumpe. Hierzu soll ein Prozessgasstrom erzeugt und bereitgestellt werden, dessen Temperatur und Feuchtebeladung den Bedingungen der Haubenabluft einer Papiermaschine entsprechen.

Ein ähnliches Prüfstandkonzept wurde bereits in Zusammenarbeit mit der PTS im kleineren Maßstab umgesetzt. Der geplante Prüfstand soll dieses Konzept in einem größeren Maßstab realisieren und dessen Funktion unter praxisnahen Bedingungen nachweisen. Durch die vorgesehenen Schnittstellen zur Einbringung und Abscheidung von Störstoffen sollen zudem spätere Untersuchungen zum Einfluss von Verunreinigungen auf den Betrieb der Anlage ermöglicht werden.

3 Prozessbeschreibung

Der im R&I als Haubenabluftgenerator bezeichnete Teil der Anlage dient der Bereitstellung eines feuchten Prozessgasstroms, dessen Eigenschaften (Feuchtebeladung und Temperatur) den einer Trocknungspartie einer Papieranlage entsprechen. Dazu ist ein erwärmter Umgebungsluftstrom mit Wasserdampf in einer Mischkammer zu mischen. Die ausgelegten Prozessdaten sind der DWSIM-Simulation im Anhang zu entnehmen. Zur Bereitstellung des trocknen Luftanteils ist Umgebungsluft mittels eines Radialgebläses von außerhalb des Containers anzusaugen, zu fördern und anschließend mit einem Lufterhitzer auf die geforderte Temperatur zu erwärmen. Es sollte ein Filter eingebaut werden, um Verunreinigungen aus der angesaugten Frischluft zu entfernen. Zum Erreichen der geforderten Feuchtebeladung (Verhältnis Wasserdampf zu trockener Luft) ist ein Wasserdampfstrom erforderlich, der durch einen Dampfgenerator erzeugt wird. Der erwärmte Luft- und Dampfstrom sind der Mischkammer zuzuführen und zu einem homogen durchmischten Prozessgas mit Auslegungstemperatur sowie Feuchtebeladung zu mischen.

Die erwärmte Luft weist vor Eintritt in die Mischkammer einen Druck von etwa 1,05 bara auf. Der vom Dampfgenerator bereitgestellte Dampf hat bei einer Temperatur von 110°C einen Druck von etwa 1,4 bara. Der Dampfgenerator sowie die zugehörigen Datenblätter werden vom Auftraggeber bereitgestellt und muss

2.00-Leistungsbeschreibung_DE

nicht durch den Auftragnehmer beschafft werden. Zur Bereitstellung der erforderlichen Prozessbedingungen vor dem Verdichter, bei einem Druck von etwa 1 bara, einer Temperatur von etwa 85°C und einer Feuchte Beladung von 0,15, ist eine geeignete Mischkammer auszuwählen und auszulegen. Dabei müssen die Druckverluste in der Mischkammer, in den Rohrleitungen und in den Schmutzfiltern berücksichtigt werden.

Es sollte eine geeignete Mischkammer verwendet werden, beispielsweise eine zylindrische Mischkammer mit Lochplatten (zur Erzeugung eines Strömungswiderstands) oder ein statischer Inline-Mischer mit herausnehmbaren Lochplatten oder Mischelementen. Das Endziel besteht darin, eine homogene Mischung aus feuchter Luft unter den im Anhang festgelegten Auslegungsbedingungen zu erzielen.

Zukünftig dient der Prüfstand zur Untersuchung von partikulären Verunreinigungen in der feuchten Abluft. Daher muss in der Mischkammer ein Anschluss für die Injektion fester Partikel in die feuchte Luft vorgesehen werden. Das System zur Injektion der partikulären Verunreinigungen ist nicht Bestandteil dieser Ausschreibung. Zwischen der Mischkammer und dem Verdichter ist mindestens ein 2 m langer, gerader, geflanschter Rohrabschnitt vorzusehen, um zukünftig ein Modul zur Abscheidung der Partikel integrieren zu können.

Nach der Mischkammer ist ein Bypass mit steuerbarem Schieber vorzusehen. Im stromlosen Zustand muss der Bypass geöffnet sein, sodass der erzeugte Prozessluftstrom aus dem Container in die Umgebung abgeführt wird. Bei geschlossenem Bypass ist die Prozessluft dem Verdichter zuzuführen. Damit soll sichergestellt werden, dass das Prozessgas erst nach Erreichen der geforderten Ausgangsbedingungen dem Verdichter zugeführt wird. Sobald die erforderlichen Prozessbedingungen erreicht sind, ist das Prozessgas dem Verdichter zuzuführen. Aufgrund der hohen Ein- und Austrittstemperaturen, der hohen Feuchtigkeitsbeladung bzw. des hohen Wasserdampfanteils des Prozessgases ist ein Expander zu wählen, der für diese Bedingungen geeignet ist und im Leistungsbereich von ca. 30 kW liegt, mit einem isentropen Wirkungsgrad von mindestens 70 %. Da sich die Temperatur des Prozessgases bei der Verdichtung erhöht, ist eine Wassereinspritzung zur Temperaturreduzierung nach dem Verdichter vorzusehen. Das Einspritzwasser sollte aufbereitet sein, um die Komponenten des Systems nicht zu beeinträchtigen. Es muss eine gleichmäßige Durchmischung des zur Kühlung eingespritzten Wassers gewährleistet werden. In der nachfolgenden Mischkammer (2) anfallendes Kondensat und nicht verdampftes Wasser sollte von der Mischkammer (2) in einen Pufferspeicher geleitet werden und kann zusammen mit dem Frischwasser in die Mischkammer eingespritzt werden, um den Frischwasserbedarf zu verringern. Dabei muss das Einspritzsystem über eine Beheizung für das Wasser besitzen, da bei Anfahren des Prüfstands noch kein Kondensat im Pufferspeicher ist, muss zu Beginn erwärmtes Frischwasser zum Einspritzen verwendet

2.00-Leistungsbeschreibung_DE

werden. Sobald Kondensat im Pufferspeicher vorliegt, soll dieses verwendet um den Bedarf an Frischwasser sowie durch die hohe Temperatur des Kondensats, die Energie, die zum Erwärmen des Wassers benötigt wird zu verringern. Anschließend durchströmt das Prozessgas nacheinander drei Plattenwärmeübertrager (PWT) in denen mit dem Prozessgas unterschiedliche Kühlmedien erwärmt werden.

Beim ersten PWT ist Umgebungsluft als Kühlmedium zu verwenden. Die Umgebungsluft ist mittels eines Hochdruck-Radialgebläses im Gegenstrom zum Prozessgas durch den Wärmeübertrager zu fördern. Die erwärmte Luft ist außerhalb des Containers in die Umgebung abzugeben. Dem ersten PWT ist ein Kondensatabscheider nachzuschalten, um im Wärmetauscher anfallendes Kondensat aus der Prozessluft abzuscheiden. Im zweiten PWT ist Wasser als Kühlmedium einzusetzen. Das Wasser ist dafür im Gegenstrom zum Prozessgas durch den Wärmeübertrager zu führen und nimmt dabei die vom Prozessgas übertragene Wärme auf. Anschließend ist das erwärmte Kühlwasser einem Umwälzkühler zuzuführen und auf die vorgegebene Eingangstemperatur zu abzukühlen. Das abgekühlte Wasser ist danach dem zweiten PWT erneut zuzuführen. Im dritten PWT ist ebenfalls Wasser als Kühlmedium zu verwenden. Das Kühlwasser ist ebenfalls im Gegenstrom zum Prozessgas durch den Wärmeübertrager zu führen und nimmt dabei die vom Prozessgas übertragene Wärme auf. Anschließend ist das erwärmte Kühlwasser einem Umwälzkühler zuzuführen und auf die vorgegebene Eingangstemperatur abzukühlen. Das abgekühlte Wasser ist danach dem dritten PWT erneut zuzuführen.

Dem ersten Wärmeübertrager ist ein Kondensatabscheider (1) nachzuschalten, um das durch das Abkühlen des Prozessgases anfallende Kondensat abzuscheiden. Hinter dem zweiten Wärmeübertrager ist ebenfalls ein Kondensatabscheider (2) vorzusehen, zur Abscheidung des im zweiten Wärmeübertrager anfallenden Kondensats. Nach durchlaufen des dritten PWT, ist das Prozessgas vor dem Zuführen zum Expander, einem weiteren Kondensatabscheider (3) zuzuführen, um das im dritten PWT anfallende Kondensat aus dem Prozessgas abzuscheiden. Nach dem Kondensatabscheider (3) ist das Prozessgas einem mit einem Generator gekoppelten Expander zuzuführen. Im Expander wird das Prozessgas entspannt, sodass ein Teil der verfügbaren Expansionsarbeit in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Die elektrische Leistung ist zu erfassen und die Energie kann an einen ohmschen Verbraucher oder einen Speicher übertragen oder wieder ins Stromnetz eingespeist werden. Hinter dem Expander ist ein weiterer Kondensatabscheider (4) vorzusehen, um Kondensat aus der entspannten Prozessluft abzuscheiden. Für die Kondensatströme ist vorerst keine Weiterverwendung vorgesehen, weshalb diese abgeführt werden müssen.

Das Prozessgas ist anschließend von oben in eine Nebelkammer mit einem Volumen von ca. 1 m³ einzuleiten, die beispielsweise als IBC-Behälter ausgeführt werden kann. Das Prozessgas ist an der tiefsten Stelle der Nebelkammer außerhalb des Containers, in die Umgebung zu leiten.

Die für die Bewertung des Prozesses benötigte zentrale Kennzahl ist der COP (Coefficient of Performance). Dieser ergibt sich aus dem Verhältnis der in den Wärmetauschern übertragenen Wärmeleistung zu der eingesetzten elektrischen Leistung und wird für die thermodynamische Bewertung des Systems benötigt. Die zur Bestimmung des COP benötigten Messgrößen müssen an passenden Stellen erhoben werden. Um Wärmeverluste minimal zu halten, sind Rohrleitungen und relevante Komponenten entsprechend thermisch zu isolieren. Dabei ist die Summe der in den Wärmeübertragern übertragene Wärmeströme im Zähler und die elektrische Leistung im Nenner.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{PWT1} + \dot{Q}_{PWT2} + \dot{Q}_{PWT3}}{W_{\text{Kompressor}} - W_{\text{Expander}}}$$

Der Prüfstand ist für den Versuchs- bzw. Kampagnenbetrieb auszulegen. Die geplanten Betriebszeiten liegen bei ca. 300 – 400 Betriebsstunden pro Jahr. Lastwechsel und intermittierender Betrieb sind Bestandteil des vorgesehenen Versuchsprogramms und sind bei der Auslegung entsprechend zu berücksichtigen.

Die Verrohrung des Prüfstands ist für die vorgesehenen Betriebsbedingungen hinsichtlich Druck, Temperatur, Feuchtebelastung und der verwendeten Medien auszulegen. Die Rohrleitungsnennweiten sind so zu dimensionieren, dass die erforderlichen Volumen- und Massenströme bei möglichst geringen Druckverlusten gefördert werden können. Dabei sind auch die Druckverluste von Armaturen, Wärmeübertragern, Kondensatabscheidern sowie später nachzurüstenden Störstoffabscheider und Filter zu berücksichtigen. Alle Rohrleitungen, Dichtungen und Verbindungselemente müssen für die jeweiligen Medien und Betriebsbedingungen geeignet sein. Die Prozessgas- und Dampfleitung sind möglichst kurz, strömungsgünstig und mit Wärmedämmung auszuführen, um Druck- und Wärmeverluste zu minimieren. Aufgrund möglicher Kondensatbildung sind die Rohrleitungen so zu planen, dass anfallendes Kondensat nicht in den Lufterhitzer oder andere empfindliche Bauteile zurückfließen kann.

An wichtigen Bauteilen sind lösbare Verbindungen vorzusehen, um Wartung, Reinigung und Austausch zu ermöglichen. Die Zugänglichkeit der relevanten Komponenten ist sicherzustellen. Thermische Längenänderungen und Schwingungen sind durch geeignete Rohrhalterungen, Führungselemente und gegebenenfalls Kompensatoren aufzunehmen. Vor der Inbetriebnahme ist die vollständige Verrohrung auf ordnungsgemäße Montage, Dichtheit und sichere Kondensatführung zu prüfen.

4 Arbeitspakete

4.1 Einarbeitung in den Prüfstand

- Prüfen der durch den Auftraggeber bereitgestellten technischen Dokumente, einschließlich R&I, Prozessbeschreibung, Betriebsbedingungen, Konstruktionsanforderungen und Funktionsspezifikationen.
- Analyse des Prozesskonzepts und Ermittlung fehlender Informationen, technischer Probleme und notwendiger Klärungen.
- Teilnahme an technischen Koordinierungsbesprechungen mit dem Auftraggeber.
- Festlegen der erforderlichen technischen Grundlagen für die detaillierte Planung und Umsetzung.

4.2 Mechanische Konstruktion und Layout des Prüfstandes

- *Container festlegen:* Ermittlung des erforderlichen Platzbedarfs und Auswahl eines geeigneten Containers für die Aufnahme des Prüfstands einschließlich Wartungs- und Sicherheitsflächen.
- *Prüfstand im Container anordnen:* Erstellung des Aufstellungsplans mit Positionen und Abmessungen aller Komponenten sowie Festlegung der Zugangs-, Wartungs-, Flucht- und Sicherheitsbereiche.
- *Rohrleitungsplanung:* Vollständige Rohrleitungsplanung einschließlich Rohrdurchmesser, Werkstoffen, Wandstärken, Armaturen, Formstücken, Halterungen und Anschlüssen.
- *Schnittstellen festlegen:* Festlegung und Positionierung aller erforderlichen Anschlüsse für Strom, Medien, Rohrleitungen, Abluft sowie Mess- und Steuerungstechnik.
- *SPS-System auslegen:* Festlegung der SPS, Ein-/Ausgänge, Sensoren, Aktoren und Kommunikationsschnittstellen einschließlich Erstellung der E/A-Liste.
- *Steuerungsabläufe programmieren:* Umsetzung der Steuerungsabläufe für Start, Normalbetrieb, Betriebszustände, Störungen und kontrollierte Abschaltung des Prüfstands.
- *Sicherheitsfunktionen umsetzen:* Auslegung und Umsetzung der erforderlichen Not-Halt-, Verriegelungs-, Druck-, Temperatur- und sonstigen Sicherheitsfunktionen (mit Ausnahme des Brandschutzkonzepts).
- *Risikobeurteilung durchführen:* Ermittlung und Bewertung der Gefährdungen während Aufbau, Inbetriebnahme und Betrieb sowie Festlegung der erforderlichen Schutzmaßnahmen (mit Ausnahme des Brandschutzkonzepts).

4.3 Beschaffung von Komponenten und zugehörigen Artikeln

- Überprüfen und Fertigstellung der Stückliste (BOM) auf Grundlage des genehmigten technischen Konzepts.
- Beschaffung aller erforderlichen Komponenten und benötigten Zubehörteile, einschließlich, aber nicht beschränkt auf Hauptprozesskomponenten, Rohrleitungen und zugehörigen Komponenten, Sensoren, Elektro- und Automatisierungshardware sowie den Container für den Prüfstand.
- Erstellen und Bereitstellen der vollständigen technischen Dokumentationen, Zertifikate, Handbücher und Datenblätter für alle gelieferten Komponenten zur Vorlage bei der Projektübergabe.

4.4 Montage, Inbetriebnahme und FAT beim Auftragnehmer

- Montage und Installation aller mechanischen, elektrischen und automatisierungstechnischen Komponenten am Standort des Auftragnehmers.
- Durchführung der ersten Inbetriebnahme und Funktionsprüfungen.
- Durchführung und Dokumentation des FAT einschließlich Behebung festgestellter Mängel.

4.5 Lieferung, Installation und SAT am Standort MFP

- Transport, Lieferung und Installation des vollständig geprüften Prüfstands am Standort der MFP.
- Aufbau des kompletten Prüfstands.
- Inbetriebnahme und Durchführung von ersten Versuchen am Standort der MFP.
- Durchführung und Dokumentation des SAT (Site Acceptance Test).
- Übergabe des betriebsbereiten Prüfstands einschließlich der zugehörigen Dokumentation.
- Sämtliche Unterlagen, Prüfberichte und Protokolle sind vollständig und in digitaler Form an den Auftraggeber zu übergeben.

5 Deliverables

5.1 Planung und Engineering

- Erstellung und Übergabe einer vollständigen und finalisierten BOM (Bill of Materials) einschließlich aller erforderlichen Komponenten, Mengen, technischen Spezifikationen, anzuwendenden Normen und Herstellerangaben.

- Erstellung des vollständigen mechanischen Designs einschließlich der Rohrleitungsplanung, insbesondere unter Berücksichtigung von Rohrleitungsdimensionen, Werkstoffen, Rohrleitungszubehör, Armaturen, Halterungen und erforderlichen Anschlüssen.
- Erstellung eines vollständigen Automatisierungs- und Steuerungskonzepts, einschließlich der Auswahl und Spezifikation der erforderlichen SPS-Hardware, E/A-Anforderungen, Kommunikationsschnittstellen und Steuerungsphilosophie.
- Durchführung einer Risikobeurteilung, um potenzielle Risiken und Gefährdungen des Prüfstands zu identifizieren und geeignete technische und sicherheitsrelevante Maßnahmen bereits während der Planung und Konstruktion zu berücksichtigen.
- Erstellung des vollständigen elektrischen Designs einschließlich der erforderlichen elektrischen Anschlüsse, Energieversorgungen, Schnittstellen zu den Versorgungsmedien sowie der erforderlichen Verkabelung und der elektrischen Komponenten.

5.2 Beschaffung

- Beschaffung aller erforderlichen Komponenten gemäß finalisierter BOM, einschließlich, aber nicht beschränkt auf, mechanische, elektrische, rohrleitungs-, mess- und sicherheitstechnische Komponenten sowie eines geeigneten Containers.
- Vorlage der vollständigen BOM sowie eines Beschaffungsnachweises für alle Komponenten. Als Beschaffungsnachweis sind insbesondere Lieferscheine zusammen mit einer aktualisierten BOM-Liste zu akzeptieren.

5.3 Fertigung, Montage und FAT

- Montage und Installation aller beschafften Komponenten im Container zur vollständigen Errichtung des Prüfstands.
- Durchführung der erforderlichen Erstprüfungen und Funktionstests nach der Montage.
- Durchführung und Dokumentation der geforderten Factory Acceptance Tests (FAT).
- Übergabe eines Prüfberichts mit den Ergebnissen der Erstprüfungen und FATs an den Auftraggeber.

5.4 Transport, Installation bei MFP, SAT und Inbetriebnahme

- Transport des vollständig montierten Prüfstands sowie dessen vollständige am Standort des Auftraggebers (MFP).

- Herstellung aller erforderlichen Anschlüsse an die am Standort MFP vorhandenen Versorgungsmedien und Schnittstellen, einschließlich elektrischer, mechanischer, rohrlleitungstechnischer und kommunikationstechnischer Anschlüsse.
- Durchführung der vollständigen Inbetriebnahme und des Erstbetriebs des Prüfstands. Einschließlich der Überprüfung der ordnungsgemäßen Funktion des Gesamtsystems unter den vorgegebenen Betriebsbedingungen.
- Durchführung und Dokumentation der in der Leistungsbeschreibung geforderten Site Acceptance Tests (SAT) einschließlich der Übergabe der vollständigen SAT-Protokolle und Testergebnisse.
- Durchführung und Dokumentation der ersten Betriebsergebnisse des Prüfstands einschließlich der relevanten Mess- und Betriebsdaten.
- Durchführung eines Wissenstransfers bzw. einer Einweisung des MFP-Personals hinsichtlich Betrieb-, Start- und Abschaltvorgängen, Sicherheitsvorkehrungen, Fehlerbehebung und Wartung des Prüfstands.

6 Zeitplan:

Die Inbetriebnahme des Prüfstands muss bis zum 31.10.2027 vollständig abgeschlossen sein.

7 Factory Acceptance Test und Site Acceptance Test

Vor Durchführung der Abnahmen sind Auslegungs- und Betriebsbedingungen verbindlich festzulegen.

7.1 Factory Acceptance Test (FAT)

Der FAT ist beim Auftragnehmer vor Auslieferung des Prüfstands durchzuführen und zu protokollieren. Da der Dampfgenerator vom Auftraggeber bereitgestellt wird, ist der Prüfstand im Rahmen des FAT ausschließlich mit trockener Luft zu betreiben. Er umfasst folgende Abnahmekriterien:

Kennung	Mindestanforderung	Verifizierungsmethode	Nachweis
FAT-01	Alle Sensoren für Druck, Temperatur, Feuchte, Volumen-/Massenstrom und elektrische Leistung sind installiert, kalibriert und funktionsfähig. Die Messwerte werden korrekt von der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) erfasst, verarbeitet und in grafischer Benutzeroberfläche visualisiert.	Funktionsprüfung	Kalibrierprotokolle, SPS-Visualisierung, Prüfprotokoll
FAT-02	Die Messdaten für die COP-Berechnung sind vollständig: Wärmestrom PWT1, PWT2, PWT3 sowie elektrische Leistung Kompressor und Expander werden erfasst und der berechnete COP auf grafischer Benutzeroberfläche ausgegeben.	Funktionsprüfung	SPS-Programm und Visualisierung
FAT-03	Die Regelkreise für den Massenstrom und die Temperatur der Luft nach der Mischkammer sind über die grafische Benutzeroberfläche einstellbar und halten die vorgegebenen Sollwerte innerhalb der definierten Toleranzen (Massenstrom $\pm 10\%$ vom Sollwert und	Funktionsprüfung	Prüfprotokoll mit Messwerten

	Temperatur ± 2 K vom Sollwert). Prüfung bei mindestens drei verschiedenen Betriebspunkten mit trockener Luft.		
FAT-04	Absolutdruck nach dem Verdichter über externen Sollwert regelbar. Anzeige des Ist- und Sollwerts in grafischer Benutzeroberfläche. Prüfung bei verschiedenen Druckverhältnissen mit trockener Luft.	Funktionsprüfung	Prüfprotokoll
FAT-05	Der Verdichter ist installiert, funktionsfähig und mittels nachgelagerter Wassereinspritzung betreibbar. Nach der Wassereinspritzung sind Temperatur und relative Feuchte bzw. Feuchtegehalt der Abluft zu messen und zu dokumentieren. Die Wassereinspritzung muss nachweislich eine Absenkung der Temperatur sowie eine Erhöhung der Feuchte auf die vorgesehenen Auslegungswerte ermöglichen.	Funktionsprüfung	Prüfprotokoll
FAT-06	Die drei Plattenwärmeübertrager PWT1 bis PWT3 sind installiert und funktionsfähig, wobei die Kühlmedien „Umgebungsluft“ und „Wasser“ im Gegenstrom geführt werden.	Funktionsprüfung	Prüfprotokoll
FAT-07	Der Expander ist installiert, funktionsfähig und erfasst die elektrische Leistung. Demonstration der Nutzbarkeit der elektrischen Energie	Funktionsprüfung des Expanders und der Leistungserfassung.	Prüfprotokoll

	mittels eines ohmschen Verbrauchers oder Speichers.		
FAT-08	Bei unzulässigen Betriebszuständen wie Übertemperatur, Überdruck oder Ausfall einzelner Komponenten wird die Anlage in einen sicheren Zustand überführt, wobei alle sicherheitsrelevanten Verriegelungen und Abschaltbedingungen implementiert und wirksam sind.	Auslösen der Sicherheitsfunktionen und Prüfung der sicheren Abschaltung.	Prüfprotokoll und Sicherheitskonzept
FAT-09	Die vorgesehenen Betriebsarten, Regelkreise, Verriegelungen, Alarmer und Abschaltbedingungen sind in der Steuerung implementiert.	Funktionsprüfung der Steuerungs- und Sicherheitsfunktionen.	Funktionsbeschreibung
FAT-10	Der Prüfstand ist aufgebaut und mit trockener Luft betriebsbereit. Alle installierten Komponenten, Sensoren, Aktoren, Armaturen, SPS und Visualisierung sind funktionsfähig.	Vollständige Funktionsprüfung	FAT-Protokoll
FAT-11	Vollständiges FAT-Protokoll mit allen Prüfungen, Messwerten und Ergebnissen ist erstellt und von Auftragnehmer und Auftraggeber unterzeichnet.	Dokumentenprüfung	Unterzeichnetes FAT-Protokoll

7.2 Site Acceptance Test (SAT)

Der SAT ist nach Aufstellung, Anschluss und Inbetriebnahme des Prüfstands am Aufstellort durchzuführen und zu protokollieren. Er umfasst folgende Abnahmekriterien:

Kennung	Mindestanforderung	Verifizierungsmethode	Nachweis
SAT-01	Die Temperatur und der Massenstrom der trockenen Luft sowie die	Funktionsprüfung	Prüfprotokoll mit Messwerten

	Temperatur und der Massenstrom des Wasserdampfs sind über die SPS einstellbar. Die Mischkammer mischt beide Medien zu einem definierten Prozessgasstrom. Die Prozessbedingungen vor dem Verdichter (ca. 1 bara, 85 °C, Wasserdampfbeladung 0,15) können durch die Einstellung der Luft- und Dampfparameter erreicht und stabil gehalten werden. Nach der Mischkammer sind Temperatur und relative Feuchte der Prozessluft zu messen. Durch Variation der Luft- und Dampfparameter müssen neben dem Auslegungspunkt auch unterschiedliche relative Feuchten reproduzierbar eingestellt werden können.		
SAT-02	Der Absolutdruck nach dem Verdichter ist über einen externen Sollwert regelbar; der Istwert wird angezeigt und der Sollwert stabil gehalten. Der Verdichter und die nachgelagerte Wassereinspritzung sind funktionsfähig. Durch die Wassereinspritzung kann die relative Feuchte erhöht und die Temperatur der trockenen Luft gezielt abgesenkt werden.	Prüfung bei verschiedenen Druckverhältnissen mit feuchter Luft und Erstellung des Kennfelds	Prüfprotokoll, Verdichterkennfeld
SAT-03	Die PWT1–PWT3 sind installiert und funktionsfähig. Die vorgesehenen Medienströme sind gewährleistet.	Funktionsprüfung	Prüfprotokoll
SAT-04	Der Expander ist mit feuchter Luft funktionsfähig und die erzeugte	Funktionsprüfung	Prüfprotokoll

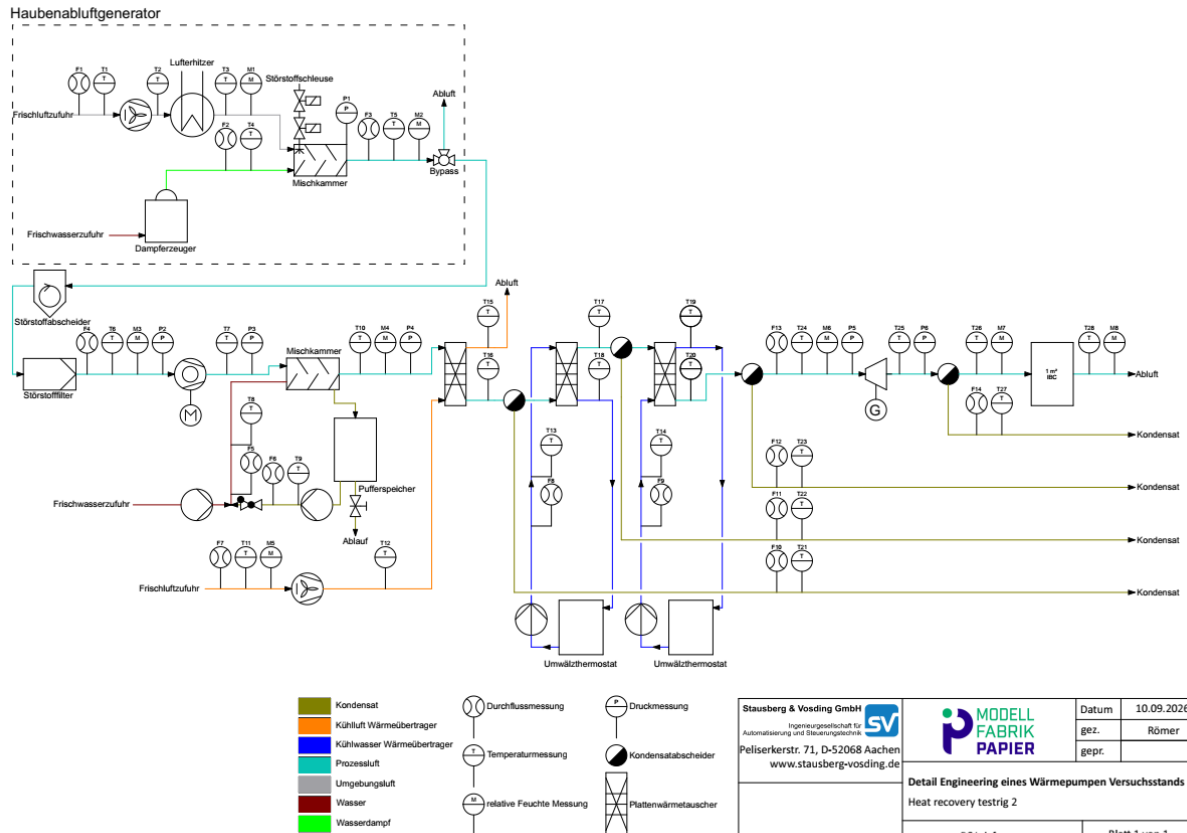
	elektrische Leistung wird erfasst und dokumentiert.		
SAT-05	Sicherheitsverriegelungen und Abschaltbedingungen für unzulässige Betriebszustände sind wirksam und führen die Anlage in einen sicheren Zustand.	Auslösen der Sicherheitsfunktionen	Prüfprotokoll
SAT-06	Die vorgesehenen Betriebsarten, Regelkreise, Verriegelungen, Alarme und Abschaltbedingungen sind in der Steuerung implementiert.	Funktionsprüfung	Prüfprotokoll
SAT-07	Der Prüfstand ist vollständig aufgebaut und mit feuchter Luft betriebsbereit. Alle Komponenten, Sensoren, Aktoren, Armaturen, SPS und Visualisierung sind funktionsfähig.	Vollständige Funktionsprüfung	SAT-Protokoll
SAT-08	Der Prüfstand ist fachgerecht aufgestellt und an die erforderlichen Medien-, Elektro-, Abluft- und Sicherheitseinrichtungen angeschlossen.	Inspektion und Funktionsprüfung	Anschlussprotokoll
SAT-09	Die Schnittstelle zum vom Auftraggeber bereitgestellten Dampfgenerator ist funktionsfähig und der Dampfgenerator ist in die Steuerung integriert.	Inbetriebnahme und Funktionsprüfung	Inbetriebnahmeprotokoll
SAT-10	Alle Messstellen, Aktoren und die SPS-Steuerung sind im Betrieb funktionsfähig. Prozessdaten können angezeigt, gespeichert und exportiert werden.	Funktionsprüfung	Messdaten, Prüfprotokoll
SAT-11	Der Prüfstand erfüllt die vereinbarten Betriebsbedingungen und Betriebsarten.	Betriebstest	Betriebsdaten, Prüfprotokoll

SAT-12	Alle Prüfergebnisse, Abweichungen und offenen Punkte werden im SAT-Protokoll dokumentiert.	Dokumentenprüfung	Unterzeichnetes SAT-Protokoll
---------------	--	-------------------	-------------------------------

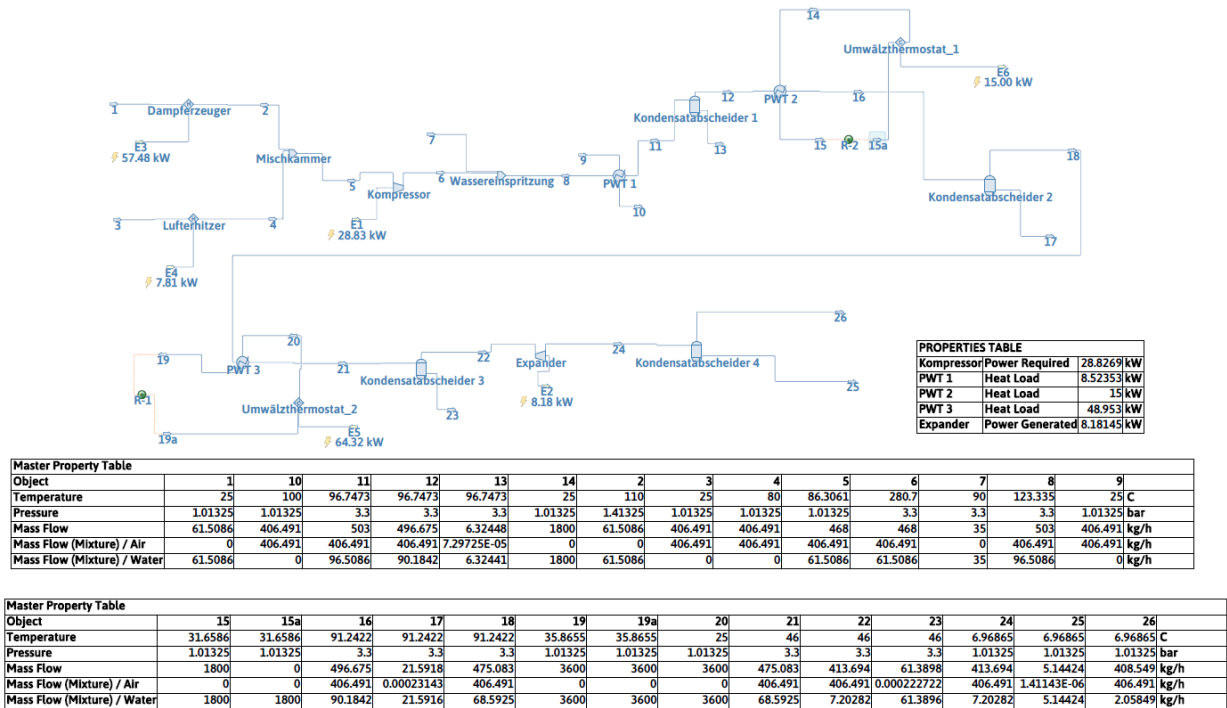
Die Abnahme gilt als erfolgt, wenn sämtliche vereinbarten FAT- und SAT-Kriterien erfüllt sind oder verbleibende Restmängel einvernehmlich im Abnahmeprotokoll festgehalten wurden.

8 Anhang

8.1 Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema



8.2 DWSIM-Simulation



8.3 Komponentenliste

Komponente	Anforderungen
Radialgebläse	Das Radialgebläse muss einen Luftmassenstrom von etwa 410 kg/h fördern und einen ausreichenden statischen Überdruck bereitstellen, um die Druckverluste der nachgeschalteten Komponenten, insbesondere der Mischkammer und des Störstofffilters, auszugleichen.
Lufterhitzer	Der Lufterhitzer muss den Luftmassenstrom von etwa 410 kg/h um etwa 90 K erwärmen können und eine Heizleistung von mindestens 11 kW aufweisen.
Dampfgenerator	Der Dampfgenerator benötigt eine Leistung von etwa 60 kW. Er wird vom Auftraggeber beschafft und das Datenblatt sowie alle zugehörigen Informationen, werden an den Auftragnehmer übergeben. Er sollte beim Anfahren des Prüfstands Frischwasser verwenden und sobald sich Pufferspeicher 1 füllt, das Wasser aus dem Speicher zusammen mit Frischwasser verwendet werden.
Mischkammer (Haubenabluft)	Die Mischkammer muss eine homogene Durchmischung des erwärmten Luftstroms mit dem Wasserdampfstrom gewährleisten.
Verdichter	Der Verdichter muss eine Leistung von etwa 30 kW aufweisen und einen feuchten Prozessluftstrom von etwa 470 kg/h von ca. 1,0 bar(a) auf ca. 3,3 bar(a) (Auslegungspunkt) verdichten können, bei einem isentropen Wirkungsgrad von 70 %. Der Verdichter muss für eine Eintrittstemperatur von etwa 90 °C ausgelegt sein. Am Austrittsstutzen des Verdichters ist eine Wassereinspritzung zur Reduzierung der Austrittstemperatur des Prozessgases vorzusehen.
Pumpe für Wassereinspritzung	Zum Fördern des Wassers in die Einspritzdüse wird eine Pumpe benötigt die einen Wassermassenstrom von 35 kg/h bei 90°C fördern kann. Ebenfalls wird ein Konzept benötigt um das Wasser mit einer Temperatur von 90°C bereitzustellen. Für das Wasser soll beim Anfahren des Prüfstands erwärmtes Frischwasser verwendet werden. Sobald der Pufferspeicher 2 sich füllt, sollte das in ihm

	enthaltende Wasser verwendet werden und mit Frischwasser für den benötigten Massenstrom gemischt werden.
Mischkammer (hinter Verdichter)	Hinter dem Verdichter ist eine Mischkammer, Mischstrecke oder andere geeignete Technologie anzubringen, in der das eingespritzte Wasser möglichst homogen durchmischt wird und vollständig verdampft.
Pufferspeicher	An der tiefsten Stelle der Mischstrecke ist ein Rohr zu einem Pufferspeicher zu führen, in den nicht verdampftes Wasser abfließen kann. Der Pufferspeicher sollte mit einem Ablauf ausgestattet sein, um diesen bei Stillstand der Anlage entleeren zu können. Ebenfalls sollte dieser mit einer zusätzlichen Pumpe, mit der Wassereinspritzung verbunden werden, um den Frischwasserbedarf und Energiebedarf der Einspritzung zu reduzieren.
Radialgebläse (Wärmeübertrager)	Das Radialgebläse zur Förderung der Kühlluft muss einen Luftmassenstrom von etwa 410 kg/h fördern und einen ausreichenden Druck bereitstellen, um den Druckverlust des nachgeschalteten Wärmeübertragers auszugleichen.
Wärmeübertrager 1	Der Wärmeübertrager muss eine Wärmeleistung von etwa 8,5 kW übertragen können und für den Betrieb mit Umgebungsluft als Kühlmedium sowie mit feuchter Prozessluft geeignet sein. Er muss einen Prozessluftmassenstrom von etwa 503 kg/h bei etwa 3,3 bara sowie einen Massenstrom an Kühlluft von etwa 410 kg/h bei möglichst geringem Druckverlust fördern können.
Kondensatabscheider 1	Der Kondensatabscheider muss Kondensat mit einer Temperatur von etwa 100°C, einem Druck von etwa 3,3 bara und einem Massenstrom von etwa 6,4 kg/h zuverlässig abscheiden können.
Wärmeübertrager 2	Der Wärmeübertrager muss eine Wärmeleistung von etwa 10 kW übertragen können und für den Betrieb mit Wasser als Kühlmedium sowie mit feuchter Prozessluft geeignet sein. Er muss einen Prozessgasmassenstrom von etwa 500 kg/h bei etwa 3,3 bara sowie einen Kühlwasserstrom von etwa 1000 kg/h bei möglichst geringem Druckverlust fördern können.

Umwälzkühler 1	Der Umwälzkühler muss den Kühlwassermassenstrom von etwa 3600 kg/h von etwa 29°C auf 25°C des dritten PWT abkühlen können. Sofern die Pumpenleistung und Steuerung ausreichend sind, kann der Umwälzkühler auch zur Förderung des Kühlwassers verwendet werden. Sofern der Umwälzkühler die erforderliche Förderleistung nicht bereitstellen kann, ist eine zusätzliche Umwälz- oder Kreislumppe vorzusehen.
Kondensatabscheider 2	Der Kondensatabscheider muss Kondensat mit einer Temperatur von etwa 100°C und einem Massenstrom von etwa 15 kg/h zuverlässig aus dem Prozessgas abscheiden können.
Wärmeübertrager 3	Der Wärmeübertrager muss eine Wärmeleistung von etwa 55 kW übertragen und für den Betrieb mit Wasser als Kühlmedium sowie mit feuchter Prozessluft geeignet sein. Er muss einen Prozessgasmassenstrom von etwa 485 kg/h bei etwa 3,3 bara sowie einem Kühlwassermassenstrom von etwa 1000 kg/h bei möglichst geringem Druckverlust fördern können.
Umwälzkühler 2	Der Umwälzkühler muss den Kühlwassermassenstrom von etwa 3600 kg/h von etwa 36°C auf 25°C des dritten PWT abkühlen können. Sofern die Pumpenleistung und Steuerung ausreichend sind, kann der Umwälzkühler auch zur Förderung des Kühlwassers verwendet werden. Sofern der Umwälzkühler die erforderliche Förderleistung nicht bereitstellen kann, ist eine zusätzliche Umwälz- oder Kreislumppe vorzusehen.
Kondensatabscheider 3	Der Kondensatabscheider muss Kondensat mit einer Temperatur von etwa 50°C und einem Massenstrom von etwa 70 kg/h zuverlässig aus dem Prozessgas abscheiden können.
Expander	Der Expander muss einen feuchten Prozessluftmassenstrom vom ca. 3,3 bar(a) auf Umgebungsdruck entspannen können [Design Point]. Er muss für eine Eintrittstemperatur von etwa 46 °C und eine Austrittstemperatur von etwa 7 °C ausgelegt sein. Zusätzlich ist der Expander mit einem Generator zur Umwandlung der Expansionsarbeit in elektrische Energie ausgestattet.

Kondensatabscheider 4	Der Kondensatabscheider muss Kondensat mit einer Temperatur von etwa 7°C und einem Massenstrom von etwa 5 kg/h zuverlässig aus dem Prozessgas abscheiden können.
Nebelkammer	Nach durchströmen des letzten Kondensatabscheiders, wird das Prozessgas einer Nebelkammer zugeführt, in der es mit Umgebungsluft durchmischt wird und anschließend in die Halle abgeleitet wird. Als Nebelkammer kann auch ein 1 m ³ IBC verwendet werden.