

Erfahrungen beim Betrieb

Kaltluftanlagen im Schienenfahrzeugbetrieb des ICE-3

Ulrich Adolph, Leipzig

Einleitend eine Systembeschreibung: Die Klimaanlage für den Zug ICE-3 benutzt ein Klimagerät mit dem Arbeitsstoff Luft als Kältemittel. Die Entscheidung für dieses Kältemittel basiert auf Untersuchungen zur Umweltrelevanz verschiedener Lösungen aus dem Jahre 1992, aus denen Luft mit dem besten Ergebnis hervorging. Aus der Vielzahl der möglichen Lösungen für die Prozesskonfiguration wurde der zweistufige Überdruckprozess ausgeführt, weil mit ihm die Erfahrungen mit der Luftführung und Regelung von konventionellen Anlagen weitgehend am besten einfließen konnten.

Das Funktionsprinzip ist im Bild 1 dargestellt. Für die Funktion als Klimagerät sind zusätzlich der Luft- und Wasserhaushalt des Systems zu betrachten. Die dementsprechend erweiterte Komponentenanzahl ist im Bild 2 dargestellt und im Folgenden beschrieben:

- Verdichter Stufe 1 mit SRD-Antriebsmotor. Die SRD-Technik erlaubt die direkte Versorgung des Motors von der Zugsammelschiene aus ohne zwischengeschalteten Frequenzumformer und ermöglicht eine gute Drehzahlstellung. Der Drehzahlbereich beträgt 15 000–26 000 U/min.
- Verdichter Stufe 2, angetrieben von der Entspannungsturbine.

- Umgebungswärmeübertrager zur Abfuhr der Prozesswärme (Verdampferleistung plus Antriebsleistung) an die Umgebung. Der Umgebungswärmeübertrager ist mit zwei Lüftern ausgestattet, die die Umgebungsluft über den Wärmeübertrager ansaugen und an die Umgebung zurückfördern.
- Entspannungsturbine zur Prozessluftentspannung, um die erforderliche niedrige Temperatur zur Kühlung der Zuluft zu erreichen. Die Nenndrehzahl beträgt ca. 31 000 U/min.
- Lastwärmeübertrager zur Aufnahme der Wärmelast des Wagens aus der Zuluft, die dadurch auf die erforderliche niedrige

Temperatur abgekühlt wird. Die Luft über den Lastwärmeübertrager wird von zwei Zuluftern gefördert. Die Prozessluft gelangt nach der Erwärmung im Lastwärmeübertrager wieder in den Verdichter Stufe 1.

Das Gesamtdruckverhältnis beträgt 2,3. Das Druckniveau im Prozess von 3,5 bar absolut auf der Niederdruckseite wird durch die Luftförderung von drei Nachfüllverdichtern (make-up-Verdichtern) bei Inbetriebnahme hergestellt und während des Betriebs aufrechterhalten. Die stetige Nachförderung ist erforderlich, da mehrere Stellen für den ständigen Luftbedarf vorhanden sind:

- die Leckluft an der berührungsfreien Wellendichtung des Verdichters der 1. Stufe,
- die Leckluft an beiden Wärmeübertragern infolge von erforderlichen Drainagebohrungen zur Entwässerung des Prozesskreislaufs,
- die Luftversorgung von zwei Strahlpumpen zur Luftförderung vom Lager der Verdichter-Turbinen-Einheit und des Motorverdichters sowie die Wasserförderung zur Zusatzkühlung des Umgebungswärmeübertragers mit dem Kondens- und Drainagewasser des Lastwärmeübertragers.

zum Autor

Dr.-Ing.
Ulrich Adolph,
Entwicklungs-
berater,
Leipzig

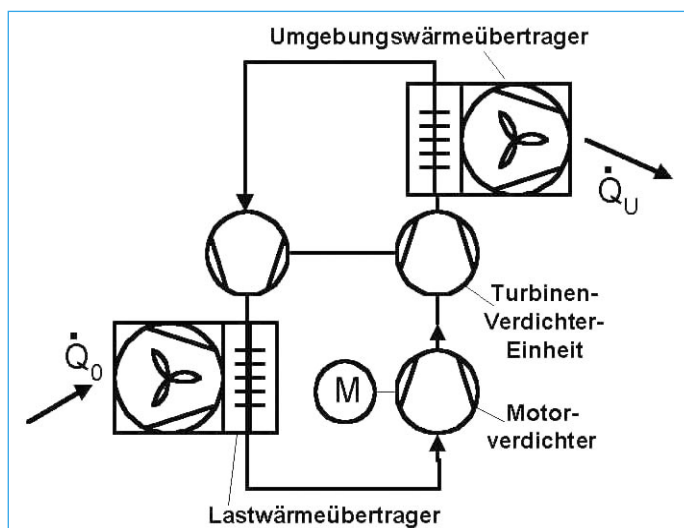


Bild 1 Prozessflussbild des Kaltluftklimagerätes für den Hochgeschwindigkeitszug ICE-3

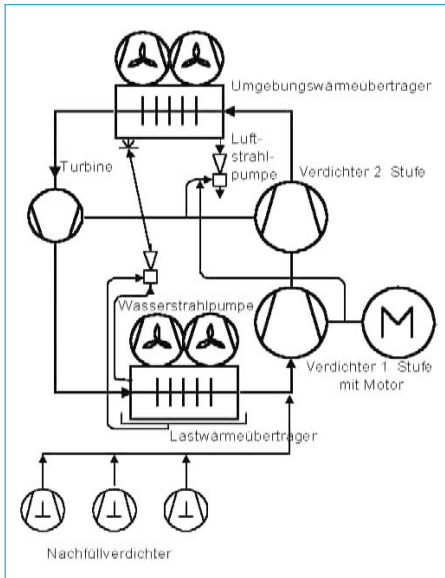


Bild 2 Funktionsschema des Kaltluftprozesses nach dem geschlossenen Überdruckprinzip mit zweistufiger Verdichtung und einstufiger Entspannung

Die Komponenten sind aufeinander abgestimmt, um mit den gewählten Prozessluft-, Zuluft- und Umgebungsluftleistungen die vorgeschriebenen Temperaturen in den unterschiedlichen Wagen des Zuges ICE-3 zu erreichen. Dafür sind bei der größten Wärmelast Nutzkälteleistungen von ca. 30 kW erforderlich. Diese Extremleistung ist jedoch nur wenige Stunden im Jahr aufzubringen.

Feuchtigkeit im Prozesskreislauf

Die ständige Förderung von Luft von außen in den Prozesskreislauf zur Kompensation der Leckverluste an der Motorwelle führt zur Feuchtebeladung des Prozesskreislaufs. Obwohl der Außenluftzustand immer Luftfeuchten von unter 100% gewährleistet, wird dieser Grenzwert beim inneren Druck und bei geringer Temperatur an verschiedenen Stellen überschritten, vor allem am Turbinenaustritt. Die ursprüngliche Annahme, dass diese Feuchtigkeit durch die Wärmeaufnahme im

Lastwärmeübertrager wieder verdampft und ca. 7 kW zur Kühlleistung beiträgt, erfüllte sich nicht. Durch Messungen und Berechnungen konnte näherungsweise ermittelt werden, dass ca. 2 bis 3 kW Leistungsanteil aus der Wasserverdampfung erreicht werden können. Die Zeit und die Temperaturdifferenz reichen nicht aus, um alles Wasser wieder zu verdampfen, obwohl es vom Teildruck des Wassers her natürlich möglich wäre.

Die restliche Flüssigkeit muss durch ständig offene Drainagebohrungen aus den Wärmeübertragern abgeführt werden. Das Wasser aus dem Lastwärmeübertrager sammelt sich gemeinsam mit dem äußeren Kondenswasser dieses Wärmeübertragers in der darunter angeordneten Tropfwanne. Um den Wärmeinhalt dieser Wassermenge zumindest teilweise nutzen zu können, wird das Wasser durch eine Strahlpumpe auf die Außenseite des Umgebungswärmeübertragers gesprüht und trägt zur Absenkung der Temperatur am Turbineneintritt

bei. Dadurch kann die Umgebungsluftmenge am Umgebungswärmeübertrager etwas geringer gehalten werden, was aus Gründen des Einbauplatzes für die Lüfter und ihrer Antriebsleistung vorteilhaft ist.

Einfluss des Umgebungswärmeübertragers

Als ein wichtiges Kriterium für die Leistungsfähigkeit des Klimagerätes hat sich die äußere Luftmenge am Umgebungswärmeübertrager erwiesen. Dabei treten zwei Besonderheiten gegenüber Kaldampfanlagen mit Verflüssiger auf, nämlich

- erhöhter Druckverlust durch die Wirbelzellenausführung, siehe Bild 3, und dadurch erforderliche leistungsfähigere Lüfter, und
- ungleiche Temperaturdifferenz über die Breite des Wärmeübertragers mit hoher Temperaturbelastung des Lüftermotors auf der Prozessluft-Eintrittsseite und nur geringem Wärmefluss auf der Austrittsseite, so dass die erwähnte Wasserberieselung auf der Austrittsseite wichtig ist für das Erreichen der erforderlichen niedrigen Temperatur der Prozessluft nur wenige K über der Umgebungstemperatur.

Temperaturverteilung am Lastwärmeübertrager

Eine besondere Herausforderung ergab sich aus den Strömungsbedingungen am Lastwärmeübertrager. Analog zur Problematik am Umgebungswärmeübertrager ergibt sich infolge der kaum vorhandenen latenten Wärmeübertragung ein Temperaturprofil über die Breite des von der Prozessluft horizontal durchströmten Lastwärmeübertragers, während ihn die Zuluft außen rechtwinklig dazu durchströmt, d. h. es liegt ein Kreuz-Gegenstrom vor. Die Zuluft hat vor dem Wärmeübertrager ein nahezu gleichmäßiges Strömungs- und

Temperaturprofil, wird aber auf der Prozesslufteintrittsseite erheblich weiter abgekühlt als auf der Austrittsseite. Damit ist die Entfeuchtung eintritsseitig sehr stark und durch die Wirbelzellenstruktur des Wärmeübertragers kann die Feuchte auf dem Strömungsweg nicht abtropfen. Im Grenzfall verstopft der Kanal bis hin zum Druck des Lüfters schlagartig frei bläst. Damit dieser Feuchtigkeitsanfall den Zuluftkanal nicht erreicht, erweist sich ein Flüssigkeitsabscheider über einem Teil der Breite des Wärmeübertragers als erforderlich. Die aus dem Zuluftwärmeübertrager austretende gekühlte Luft muss bis zum Eintritt in den Passagiererraum auf ein möglichst gleichmäßiges Temperaturprofil vermischt werden.

Einfluss der Turbomaschinen

Die Anpassung der Kühlleistung an den jeweiligen Bedarf des Wagens ist bei der Kaltluftanlage durch die Drehzahlverstellung am Verdichterantrieb der ersten Verdichterstufe einfach möglich, zudem die Antriebsdrehzahl über einen SRD-Motor (switched reluctance drive) mittels des Motorcontrollers sehr gut und verlustarm einstellbar ist. Die Drehzahl des Motorverdichters bestimmt damit die Kühlleistung. Die Drehzahl des Turbinen-Verdichter-Aggregats stellt sich selbsttätig auf den jeweiligen Gleichgewichtszustand ein. Allerdings nehmen die Leistung und die Effektivität bei Drehzahlabsenkung stärker ab als bei den Verdrängermaschinen der konventionellen Anlagen. Das resultiert einmal aus den Ähnlichkeitsgesetzen der Turbomaschinen bezüglich Drehzahl, Druck und Leistung, überlagert von der starken Abhängigkeit des Wirkungsgrades der Turbomaschinen von der Drehzahl. Beispielhaft ist das für die Turbine im Bild 4 gezeigt.

Die Gestaltung des Gerätes in einer Ausführung, die nicht gänzlich der Serienausführung entspricht, zeigt Bild 5.

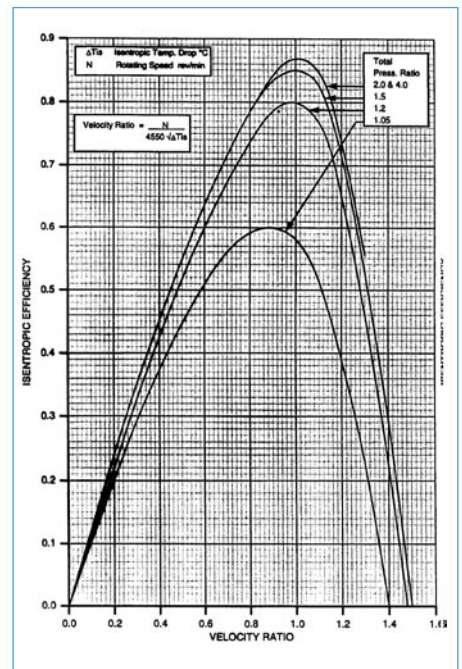


Bild 4 Turbinenkennfeld

Anlage mit offenem Überdruckprozess

Parallel zur Anlage mit geschlossenem Überdruckprozess wurde von einem zweiten Anbieter (Liebherr Lindenberg) eine Anlage mit offenem Überdruckprozess entwickelt und erprobt. Das Anlagenschema zeigt Bild 6.

Man erkennt die geringere Anzahl der Komponenten, was sich als sehr vorteilhaft erwies. Der Antrieb erfolgte mittels eines Hochfrequenzmotors (400 Hz). Es entfallen alle Einrichtungen zur Aufrechterhaltung des Systemdruckes und für den Kondenswasserhaushalt. Die Feuchte am Turbinenaustritt bereitete keine Schwierigkeiten. Sie wurde abgeschieden und teilweise nachverdampft.

Die Anforderungen an die Innenraumtemperaturen wurden in gleicherweise erfüllt wie bei der Anlage mit geschlossenem Überdruckprozess.

Vergleich beider Anlagen

Bei der Auswertung beider Entwicklungen spielten der Jahresenergieverbrauch und in der weiteren Aufarbeitung die Lebensdauerkosten eine wesentliche Rolle. Aus dem Jahresenergieverbrauch wurde als zusätzliches Kriterium der TEWI-Wert ermittelt.

Für den Auslegungspunkt 32°C/50% außen und 26,3°C/50% innen ergaben sich für den reinen Kaltluftprozess Leistungs-

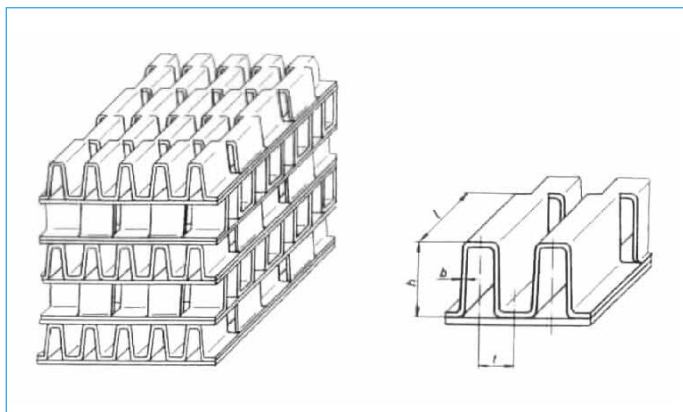
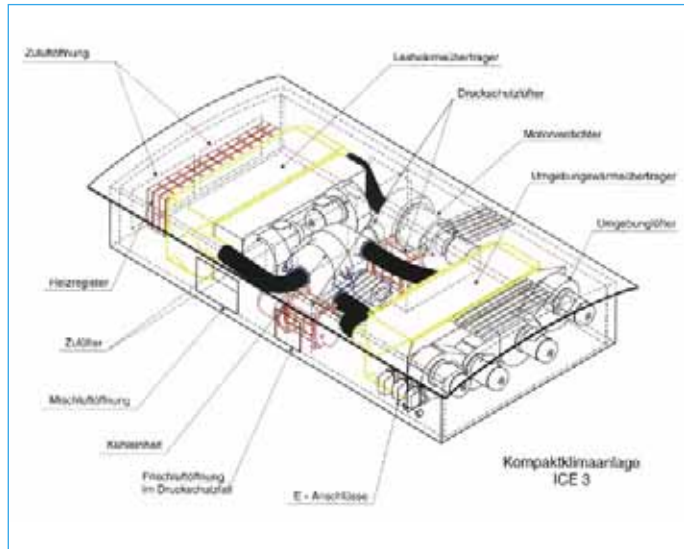


Bild 3 Wirbelzellenwärmeübertragerelement

Bild 5 Gestaltung des Kaltluftklimagerätes des ICE-3



zahlen COP von ca. 0,65 bis 0,70. Das bedeutet ungefähr den dreifachen Energiebedarf gegenüber dem konventionellen Kaldampfprozess.

Trotz der ähnlichen thermodynamischen Daten beider verglichenen Kaltluft-Prozesse entschied der deutlich geringere Jahresenergieverbrauch der Anlage mit geschlossenem Überdruckprozess zugunsten dieser Anlage für die Serienausführung. Er war ca. 20% höher als bei der parallel erprobten konventionellen R12-Anlage. Dieser im Verhältnis zum COP-Vergleich deutlich geringere Unterschied resultierte aus dem Leistungsbedarf im Teillastbetrieb, bei dem die Kaltluftanlage die bessere Regelcharakteristik aufwies. Ein weiterer Grund ist die Bezugsbasis, die die Heizperiode mit einschließt. Zum Heizen werden dabei elektrische Direktheizer benutzt, die einen hohen Basiswert liefern. Damit ist der von der Kaltluftanlage beeinflusste Anteil im Jahresverbrauch ohnehin geringer als es dem COP-Verhältnis entspricht.

Im Vergleich der beiden Kaltluftanlagen ergab sich für den offenen Prozess ein höherer Energiebedarf, weil

- der frequenzvariable 400 Hz-Antrieb verlustreicher als der SRD-Antrieb ist,
- die offene Anlage auch im Winterbetrieb die Außenluft durch die Prozess-turbomaschinen fördern musste, wenn auch ohne innere Verdichtung.
- Das ist u.a. durch die Bedingungen für den Druckschutz begründet, der für Hochgeschwindigkeitszüge Bestandteil des Klimakonzeptes sein muss. Dabei verhindern die Turbomaschinen durch ihren Druckgradienten auf einfache Weise das Eindringen von äußeren Druckstößen

in den Passagierraum, was aber beim Betrieb außerhalb der Kühltisaison wie o.g. viel Antriebsenergie für die Außenluftförderung benötigt. Der Druckschutz bei der geschlossenen Anlage war dagegen unter dem Gesichtspunkt geringsten Energiebedarfs entwickelt worden.

Im Ergebnis der Auswertung der Tests kamen beide Entwicklungsteams zu dem Schluss, dass eine optimale Anlage ein zur Umgebung offener einstufiger Unterdruckprozess sein kann. Dabei bleibt die Komponentenzahl etwa wie beim offenen Überdruckprozess gering, durch die Einstufigkeit wird zudem ein Verdichter weniger benötigt, und der Energieverbrauch

würde die Größenordnung des geschlossenen Prozesses erreichen bzw. etwas unterbieten. Diese Anlage wurde von beiden Anbietern wiederum wettbewerblich entwickelt, aber nur von LLI zur Serienreife geführt.

Anlage mit dem offenen Unterdruckprozess

Bei dieser Konzeption entfällt der Umgebungswärmeübertrager, da die Prozessluft unmittelbar aus der Umgebung durch Entspannung auf ca. ½ bar Unterdruck gewonnen und durch den Verdichter wieder auf Umgebungsdruck nach außen gefördert wird. Konstruktiv sind die einstufigen Turbomaschinen auf einer gemeinsamen Welle mit dem zwischen ihnen angeordneten Motor verbunden. Wesentliche Vorteile dieser Lösung sind:

- Geringere Komponentenzahl durch Entfall der zweistufigen Verdichtung, des Umgebungswärmeübertragers und des Luftnachfüllsystems, dadurch Möglichkeit für einen bezüglich der Durchströmung günstiger gestalteten Lastwärmeübertrager.
- Nutzung des Energieinhaltes der Fortluft als Teil der Turbineneintrittsluft bei Umgebungstemperaturen oberhalb der Fortlufttemperatur als Option, was aber zusätzlicher Aufwendungen beim Druckschutz bedarf.
- Bessere Nutzung des Kondenswassers von der Außenseite des Lastwärmeübertragers durch Injektion dieses Wassers

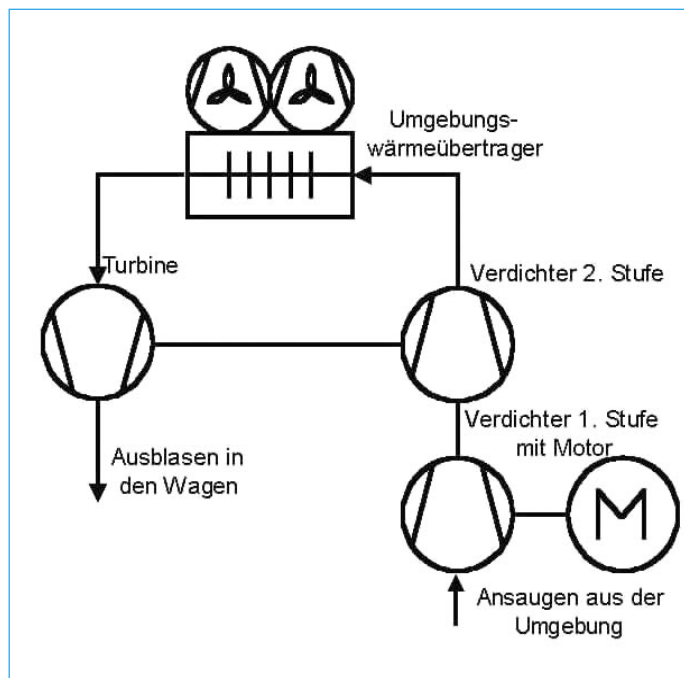


Bild 6 Anlagenschema des offenen Überdruckprozesses

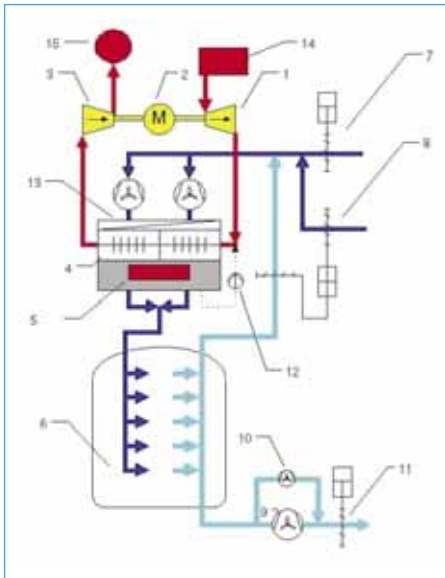


Bild 7 Schema des offenen Unterdruckprozesses mit Luftführung
 1 Turbine, 2 Motor, 3 Verdichter, 4 Lastwärmeübertrager, 5 Heizer, 6 Abteil, 7 Außenluft-Druckschutzventil für Normalbetrieb, 8 zusätzliches Außenluft-Druckschutzventil für Spülbetrieb, 9 Fortlüfter für Normalbetrieb, 10 zusätzlicher Fortlüfter für Spülbetrieb, 11 Fortluftdruckschutzventil, 12 Wasserpumpe, 13 Zuluftfilter, 14 Ansaugfilter und -schalldämpfer, 15 Auslassschalldämpfer

in die Prozessluft, da sich die Aufnahmemöglichkeit der entspannten Prozessluft für Feuchtigkeit gegenüber dem Normaldruck nahezu verdoppelt. Allerdings wird wie beim Überdruckprozess nicht alles eingespritzte Wasser verdampfen, weil bei den geringen Temperaturdifferenzen die Verweilzeit innerhalb des Wärmeübertragers dazu ebenfalls nicht ausreicht.

Im Schema nach Bild 7 ist diese Gesamtlösung gezeigt, einschließlich der Klimaluftführung. Als nachteilig bei dieser Lösung erweisen sich wegen der geringeren Dichte der Prozessluft die größeren Abmessungen der Turbomaschinen und der Rohrleitungen gegenüber dem Überdruckprozess, aber in der Gesamtbilanz ist diese Anlage günstiger zu gestalten.

Ein wesentlicher Vorteil ergibt sich für den Lastwärmeübertrager, indem ihn die Prozessluft über die gesamte Breite von oben nach unten durchströmt, während die Zuluft ebenfalls über die gesamte Breite von der Geräteseite zum Zuluftkanal strömt, siehe Bilder 8 und 9.

Damit ist die Temperatur der Zuluft nicht mehr in der Breite, sondern nur noch in der Höhe geschichtet, so dass die erforderliche Vermischung längs des Zuluftkanals bis zum Ausblasen in den Wagen leichter möglich ist. Es bleibt das Problem der Wasserabscheidung, was man lösen könnte, wenn die Zuluft von oben nach unten und die Prozessluft horizontal strömen würde. Das ist aber eine Frage der Einbauhöhe, evtl. ergäbe sich ein Kompromiss durch ausreichende diagonale Anordnung, siehe Bild 10.

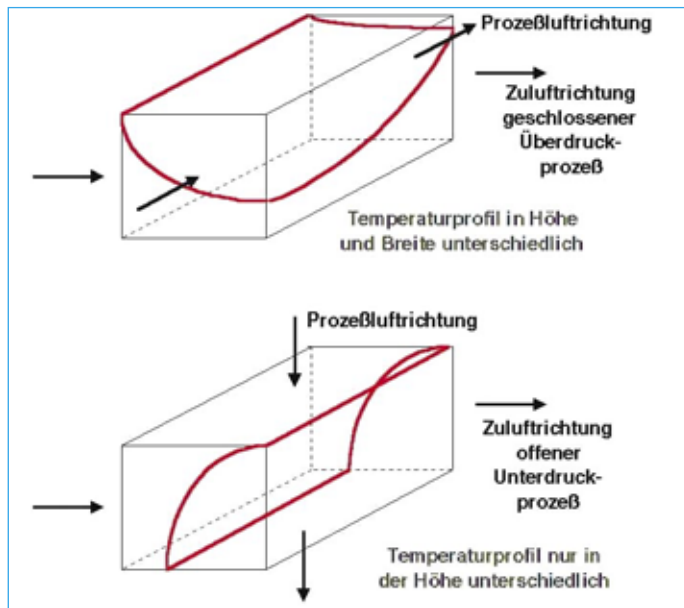
Ideal wäre bei der vorwiegend sensiblen Wärmeübertragung ein reiner Gegenstromwärmeübertrager, was aber in der Wirbelzellenbauart wegen der komplizierten Ein- und Austrittssammler sehr kostenintensiv sein würde. Zudem würden wegen des längeren Strömungsweges die Druckverluste ansteigen.

Eine weitere Variante ist im Bild 12 gezeigt, bei der ein Kreuz-Gegenstrom-Wärmeübertrager mit drei Wegen für die Prozessluft schematisch gezeigt ist. Zur Gewährleistung der besseren Wasserabscheidung aus der Zuluft sind zwischen den



Bild 8 Gerät für den Unterdruckprozess mit Blick auf die Strömungsführung für die Prozessluft zum Lastwärmeübertrager (LLI)

Bild 9 Schema der Prozess- und Zuluftführung im Gerät nach Bild 8



Wegen Freiräume gelassen. Das Problem besteht bei dieser Ausführung vorrangig in der schwierigen Dimensionierung des Prozessluftweges unter dem Gesichtspunkt ausreichend geringer Druckverluste.

Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Die Entwicklung des Kaltluftklimagerätes war eine anspruchsvolle Aufgabe, bei deren Lösung viel Neuland beschritten werden musste und bei der viele Erfahrungen gesammelt wurden. Trotzdem muss eingeschätzt werden, dass die Anwendung dieser Technologie wegen des hohen Energiebedarfs auf Ausnahmefälle beschränkt bleiben wird. Der Entwicklungsstand der Kaldampfanlagen hat im Vergleich dazu ein hohes Niveau erreicht und ihre allgemeine Verbreitung hat dazu geführt, dass die Wartung beherrscht wird und funktionelle Zuverlässigkeit gegeben ist. Auch die Dichtheit liegt nunmehr in Bereichen, die der von stationären Anlagen nahe kommen. Das Entwicklungspotential konventioneller Anlagen liegt in der weiteren Verbesserung der Dichtheit, in der Senkung des Energieverbrauchs durch Abenergie-nutzung, durch Verbesserung der Luftführung und in der Verwendung weiterentwickelter Komponenten für Verdichtung, Lüftung und Druckschutz.

Die Antriebe in neuzeitlichen Bahnklimageräten sollten in Auswertung der positiven Erfahrungen bei der ersten Serienkaltluftausführung vorwiegend mittels der SRD-Technologie angestrebt werden, um die Leistungsanpassung bei Verdichtern und Lüftern einfacher und verlustärmer als mit Frequenzumformern vornehmen zu können. Damit würden auch die Probleme der EMV, der elektromechanischen Belastung der Motoren durch die pulsweitenmo-

dulierten Rechteckspannungen und des großen Scheinleistungsbetrags bei dieser Art des Antriebes von Drehstrommotoren verschwinden.

Die Senkung des Jahresenergieverbrauchs wäre weiterhin möglich durch regenerative Nutzung der Fortluftenergie sowohl im Sommer als auch im Winter, indem die Fortluft mit der Frischluft in einem zusätzlichen Wärmeübertrager aneinander vorbei geführt werden würden. Aus gegenwärtiger Sicht besteht die Schwierigkeit in der Unterbringung eines derartigen Wärmeübertragers im Einbauraum eines Klimagerätes und dem Umstand, dass Fortluftaustritt und Frischlufteintritt an unterschiedlichen voneinander entfernten Stellen des Wagens liegen.

Aber auch speziell beim Kaltluftprozess ist noch ein Entwicklungspotential vorhanden, das man bei weiteren Projekten berücksichtigen sollte. Neben der schon erwähnten Abenergienutzung beim offenen Unterdruckprozess und der besseren Gestaltung der Wärmeübertrager liegen die Reserven

- bei der Anwendung des geschlossenen Überdruckprozesses mit einstufiger Verdichtung, jedoch auf deutlich höherem Druckniveau, um die Abmessungen der Komponenten zu verringern und evtl. Verdrängermaschinen für Verdichtung und Entspannung verwenden zu können,
- Hermetisierung, um auf die Nachfüllluft verzichten zu können,
- Optimierung des feuchtigkeitsbeladenen geschlossenen hermetisch dichten Prozesses durch gezielten Umlauf einer verdampfenden Flüssigkeit. Das sollte vorzugsweise wie bisher Wasser sein, jedoch wären wegen dessen geringer Wirkung bei hohen Drücken auch besser verdampfende Stoffe, die im Undichtigkeitsfall die Umwelt nicht belasten, in Betracht zu ziehen. ■

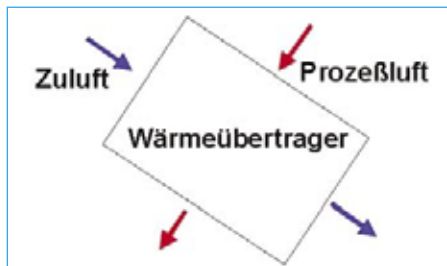


Bild 10 Vorschlag für eine Luftführung mit verbesserter Wasserabführung aus der Zuluft

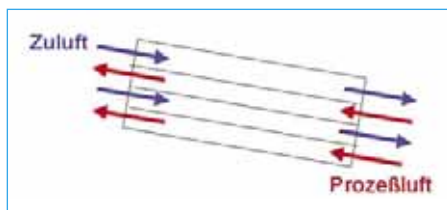


Bild 11 Schema für einen Gegenstromwärmeübertrager

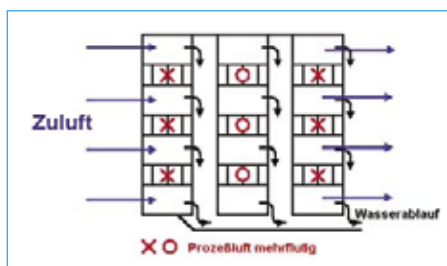


Bild 12 Schema eines dreiflutigen Kreuz-Gegenstrom-Wärmeübertragers

Literatur

- [1] Kauffeld, M.: Untersuchung von Kaltluftprozessen unter besonderer Berücksichtigung kleiner Kompressions- und Expansionsmaschinen DKV-Forschungsheft Nr. 39, Stuttgart 1993
- [2] Adolph, U.: Possibilities and Limits of Using Natural Refrigerants in Air-Conditioning Systems for Railway Cars, IIR-Proceedings, B2, 1994-1, S. 477-487
- [3] Adolph, U., L. Boeck u. M. Coldewey: Kaltluft-Klimagerät mit Druckschutzsystem für Hochgeschwindigkeitsreisezugwagen, ZEV + DET Glasers Annalen 121(1997) 2/3, S. 192-200
- [4] Boeck, L., K. Keske u. W. Köhler.: Betriebserfahrungen mit einer Kaltluftanlage im ICE-3, KI Luft- und Kältetechnik, 2/2002, S. 81-85
- [5] EN 13129 bzw. UIC 553: Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs, Berlin 1999