

Manual de experimentos

WL 352 Aparato para
convección espontánea y fuerza-

G.U.N.T. Gerätebau GmbH

Fahrenberg 14

D-22885 Barsbüttel • Alemania

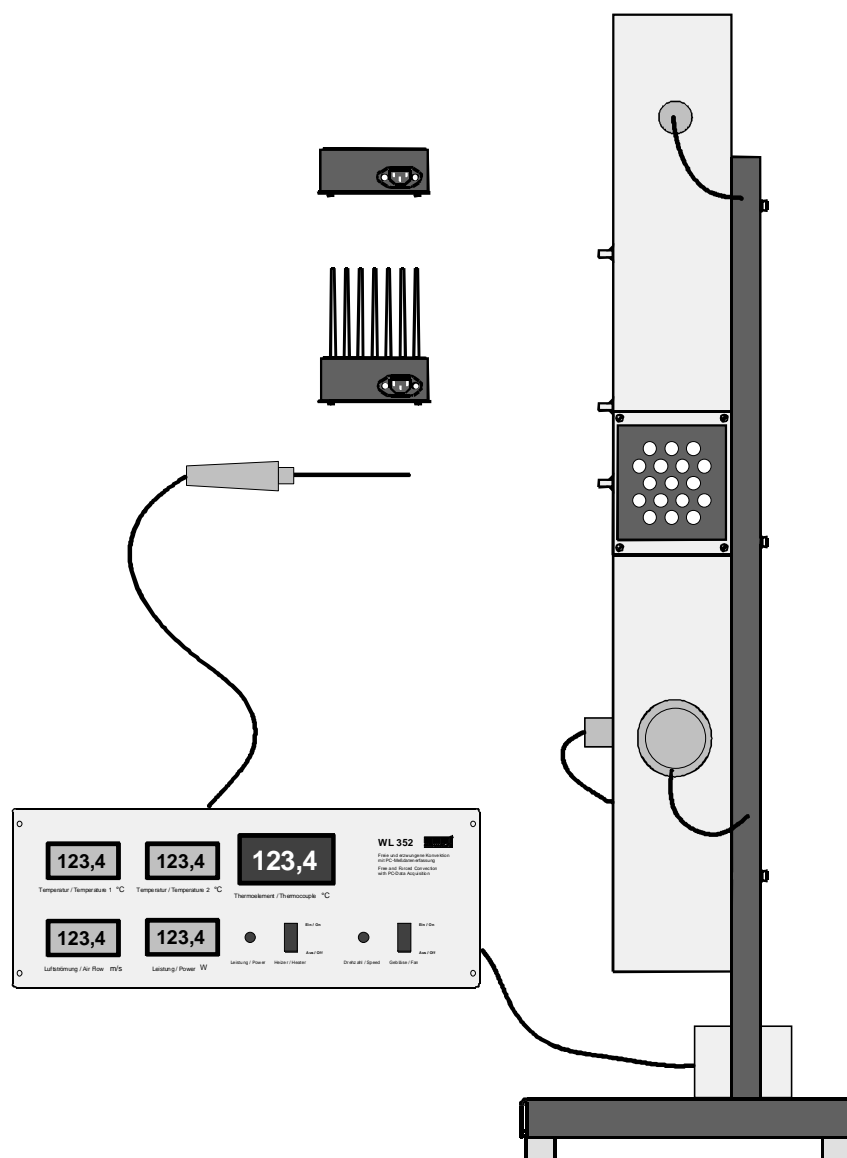
Teléfono +49 (40) 670854-0

Telefax +49 (40) 670854-42

WL 352 Aparato para convección espontánea y forzada/PC



Todos los derechos reservados . G.U.N.T. Gerätebau GmbH., Alemania 02/98



Manual de experimentos

¡Antes de la primera puesta en marcha del equipo lea atentamente las medidas de seguridad!

¡El equipo sirve exclusivamente para educación y formación así como para investigación! ¡No ha sido concebido para el uso industrial!

Indice General

1	Introducción	1
2	Descripción del equipo	2
2.1	Estructura del equipo	2
2.2	Colocación y puesta en marcha	3
2.3	Preparación del registro de datos de medición en PC	4
2.3.1	Montaje de la tarjeta de registro de datos de medición	4
2.3.2	Instalación del software	4
2.3.3	Inicio del software	5
2.4	Manejo del software	5
2.4.1	Menú de inicio	5
2.4.2	Imagen "System Info" (Información sobre el sistema)	6
2.4.3	Imagen "Diagrama"	6
2.4.4	Imagen "Calculations" (Cálculos)	8
3	Indicaciones de seguridad	10
3.1	Peligros de lesiones y de muerte	10
3.2	Peligros para el equipo y su funcionamiento	11
4	Principios teóricos	12
4.1	Cantidad de calor	12
4.2	Grado de efectividad	14
4.3	Transmisión de calor	14
4.4	Inundación laminar y turbulenta	15
4.5	La cifra de Reynold	16
4.6	El coeficiente de Nusselt	17

5	Experimentos	19
5.1	Ensayos sobre la convección libre	19
5.1.1	Balance energético de la placa plana	19
5.1.2	Balance energético del haz de tubos	21
5.1.3	Balance energético de las láminas	22
5.2	Ensayos sobre la convección forzada	23
5.2.1	Balance energético de la placa plana	23
5.2.2	Balance energético del haz de tubos	24
5.2.3	Balance energético de las láminas	25
5.3	Comparación entre convección libre y forzada	26
5.4	Cambio de temperatura en el intercambiador de calor	27
5.5	Coeficiente de transferencia de calor	28
5.6	La cifra de Reynold	29
5.7	El coeficiente de Nusselt	30
6	Anexo	32
6.1	Datos técnicos	32
6.2	Bibliografía	33
6.3	Tablas	34
6.4	Indice	35

1 Introducción

En muchas áreas de la industria la transmisión de calor por convección es de gran importancia. La transmisión de calor por convección se realiza a través del contacto y la conducción. Otra área es la transferencia de calor por radiación. La transmisión de calor convencional se divide en convección libre y forzada. En la convección forzada, el fluido que se debe calentar se envía a las bandas del intercambiador a través de un aparato de transporte (bomba, soplador); en cambio, en la convección libre el líquido calentado sólo fluye debido a la diferencia de densidad.

La zona de transmisión de calor presenta tantas variables (medio de inundación, tamaño y forma de la sección transversal de inundación y magnitudes inundadas) que casi es imposible prever matemáticamente la transferencia de calor.

El **Banco de ensayos para convección libre y forzada con registro de datos de medición en PC WL 352 de G.U.N.T.** es el complemento idóneo. Con él se puede calcular la transferencia de calor de forma experimental. Gracias a las distintas bandas del intercambiador y a un soplador de velocidad regulable, permite conocer las aplicaciones industriales de la transmisión de calor convencional y de la supervisión de procesos mediante PC.

En la realización de estas instrucciones para ensayos se ha intentado sobre todo mantener un orden lógico desde el punto de vista didáctico. Por eso, primero se explican las relaciones teóricas; después, mediante ensayos, algunas características habituales de la transferencia de calor.

2 Descripción del equipo

2.1 Estructura del equipo

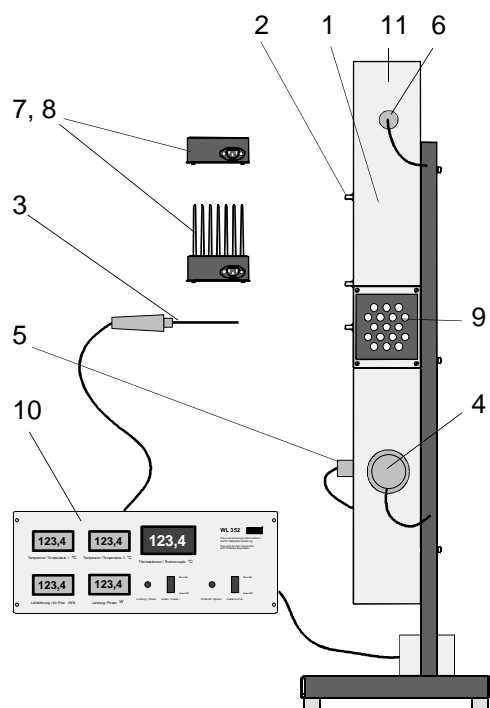


Fig. 2.1

- El **conducto de aire** (1) tiene una sección transversal de inundación de $120 \times 120 \text{ mm}^2$ y una longitud de 1 m, y se utiliza para pasar el aire de entrada.
- Cuenta con **tubuladuras de medición** (2) que permiten registrar la temperatura en distintos puntos gracias a al uso de un **elemento térmico** del tipo K (3). Además, un **sensor de inundación** (4) mide la velocidad de entrada del aire y dos **elementos PTC** (5, 6) miden la temperatura de entrada y de salida, respectivamente.
- Los **elementos de calefacción** (7, 8, 9) se colocan en el canal. Se sujetan mediante simples cierres a presión. Las distintas superficies de intercambiador de calor (placa recta, haz de tubos o láminas) se calientan con 4 resistencias de calefacción que suman una potencia máxima total de unos 170 W. La tensión aplicada se puede regular con el fin de ajustar la potencia calorífica. Para que la temperatura no supere los 120 C, se utilizan bimetales que interrumpen la alimentación eléctrica cuando se alcanza el valor límite ajustado.
- El **equipo de manejo e indicación** (10) incluye la alimentación eléctrica y la regulación del soplador y de los elementos de calefacción. Además, muestra la potencia eléctrica de los elementos calefactores, la velocidad de fluido, la temperatura de entrada y de salida del aire y la temperatura medida del elemento térmico. A la parte trasera se puede conectar un PC para registrar los datos de medición.

- Un **soplador** (11) incorporado de velocidad regulable transporta el aire durante los ensayos en que se requiere convección forzada.

2.2 Colocación y puesta en marcha

El equipo se ha construido de forma que se pueda colocar sobre una mesa. Así, quienes efectúen la observación pueden acceder a todas las tubuladuras de medición y ver el elemento de calefacción utilizado en cada caso a través de una mirilla. El equipo tiene una altura total de 1,2 m y se debe colocar cerca del canal de aire para que las tubuladuras de medición estén al alcance del elemento térmico. Los cables de conexión y medición tienen un largo total máximo de 2 m.

Las conexiones de alimentación, las salidas de los elementos calefactores y sopladores y la entrada de medición del elemento térmico se encuentran en la parte trasera del equipo.

El canal de aire se debe colocar sobre una superficie sólida y lisa. Además, hay que comprobar que se pueda acceder libremente a la entrada y a la salida del canal de aire para que la inundación no repercuta negativamente y para que no se obtengan resultados de medición inexplicables.

Durante la colocación y la puesta en marcha se deben tener en cuenta los puntos siguientes:

- El banco de ensayos se debe colocar en posición vertical.
- La entrada y la salida del canal de aire se deben mantener despejadas para no bloquear la corriente de aire.
- El soplador y los elementos calefactores se deben conectar al equipo de manejo e indicación mediante cables para equipos fríos con enchufe y/o acoplamiento.

- El elemento térmico se debe conectar al equipo de manejo e indicación mediante una hembra.
- La alimentación del equipo de manejo e indicación se debe obtener conectándolo a un enchufe macho con puesta a tierra tipo Schuko de 230 V/50 Hz/6 A.

2.3 Preparación del registro de datos de medición en PC

2.3.1 Montaje de la tarjeta de registro de datos de medición

Antes de poner en funcionamiento la instalación hay que montar la tarjeta de registro de datos de medición en un PC:

- Apagar el PC y desconectar el enchufe de red.
- Abrir la torre del PC (¡atención!, tenga en cuenta las condiciones de garantía).
- Buscar una toma ISA libre en la placa base (comprobar que la dirección 0320 HEX del PC aún no esté ocupada).
- Introducir la tarjeta con cuidado y atornillarla. Procurar no tocar los componentes electrónicos del ordenador, ya que hay peligro de que los componentes se descarguen de electricidad y sufran daños.

Volver a cerrar la torre del PC. Conectar el equipo y la tarjeta de registro de datos de medición mediante un cable de cinta plana.

2.3.2 Instalación del software

- Encender el PC e iniciar Windows.
- Introducir el primer disquete de instalación en la disquetera.
- Seleccionar la unidad de disco en que se encuentre el disquete de instalación.

WL 352 Aparato para convección espontánea y forzada/PC



- Buscar el archivo setup.exe y hacer doble clic en él para ejecutarlo.

El software se instala en el PC siguiendo la guía del usuario.

2.3.3 Inicio del software

Antes de encender el ordenador se debe conectar el banco de ensayos a una alimentación.

- Iniciar Windows.
- Hacer doble clic en el icono correspondiente para iniciar el software.

2.4 Manejo del software

Para visualizar los datos de medición se utiliza el software Visual Designer. Este software se ejecuta en Windows. Los medios gráficos utilizados hacen que sea muy claro. El programa incluye un total de 4 imágenes, ordenadas jerárquicamente:

2.4.1 Menú de inicio

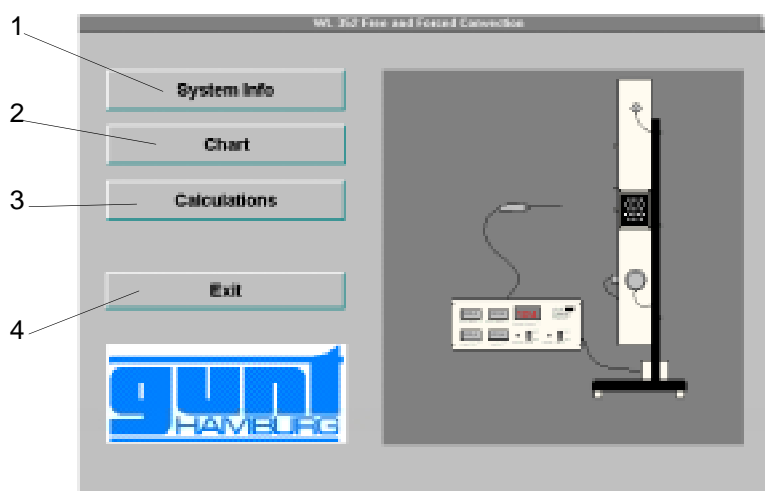


Fig. 2.2 Menú de inicio

La figura 2.2 muestra la imagen superior, que aparece cuando se inicia el programa. Para pasar

a cada una de las imágenes [System Info, Información sobre el sistema (1), Chart, Diagrama (2), y Calculations, Cálculos (3)] y para finalizar el programa (4) basta con hacer clic en el botón correspondiente. El programa sólo se puede finalizar desde este nivel. Por lo demás, se puede cambiar sin problemas de una imagen a otra.

2.4.2 Imagen "System Info" (Información sobre el sistema)

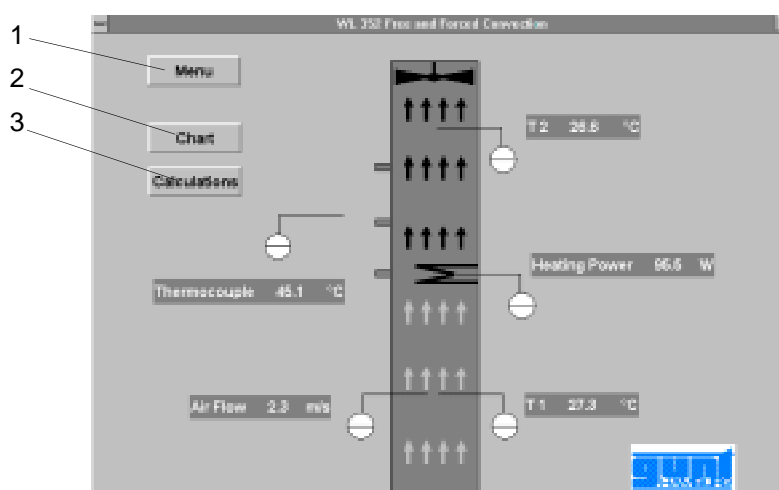


Fig. 2.3 System Info (Información sobre el sistema)

La imagen muestra un esquema de la estructura de la instalación con todos los puntos de medición y los valores de medición actuales correspondientes. Con el botón (1) se vuelve al menú de inicio. Si se hace clic en (2) o (3), se pasa a las imágenes "Chart" (Diagrama) y "Calculations" Cálculos.

2.4.3 Imagen "Diagrama"

En esta imagen se registran todos los valores de medición de la temperatura y la velocidad de fluido de forma continuada a lo largo del tiempo y se contrastan gráficamente (1). Esto permite realizar un seguimiento del proceso y del

ajuste de un estado estacionario. Los valores numéricos reales se muestran en el diagrama (2). (En este diagrama se representa el valor de la velocidad de fluido multiplicado por 10 y la décima parte de la potencia.)

En el campo (3) se puede modificar la velocidad de avance del registrador.

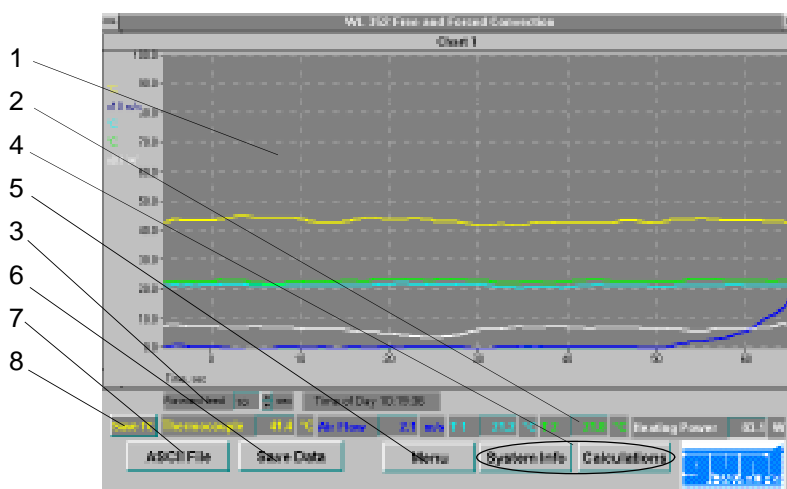


Fig. 2.4 Chart (Diagrama)

Si se hace clic en el botón (4), se pasa a la imagen "System Info" (Información sobre el sistema) o "Calculations" (Cálculos), con (5) se regresa al menú de inicio y con (6) se guardan los valores actuales. (7) permite asignar un nombre al archivo. Los datos se guardan en formato ASCII y se añaden al archivo seleccionado por líneas cada vez que se pulsa (6). Además de los valores de medición actuales se guarda la hora actual, lo que facilita la asignación de los valores de medición.

Para obtener resultados de cálculo correctos es necesario calcular y guardar la temperatura del calefactor. Para ello se debe poner en marcha el calefactor que se debe estudiar (con la placa desmontada) a la potencia deseada. La temperatura de superficie T_0 se mide con el elemento

térmico (con la placa desmontada sobre la superficie y el haz de tubos y las láminas en las tubuladuras de medición). Si se ajusta un valor estacionario, se guardará tras pulsar el botón (8). Este valor es la base de los cálculos posteriores y se sobrescribirá cada vez que se pulse (8). A continuación ya se puede colocar el calefactor de placas en el canal y pasar a los ensayos propiamente dichos.

2.4.4 Imagen "Calculations" (Cálculos)

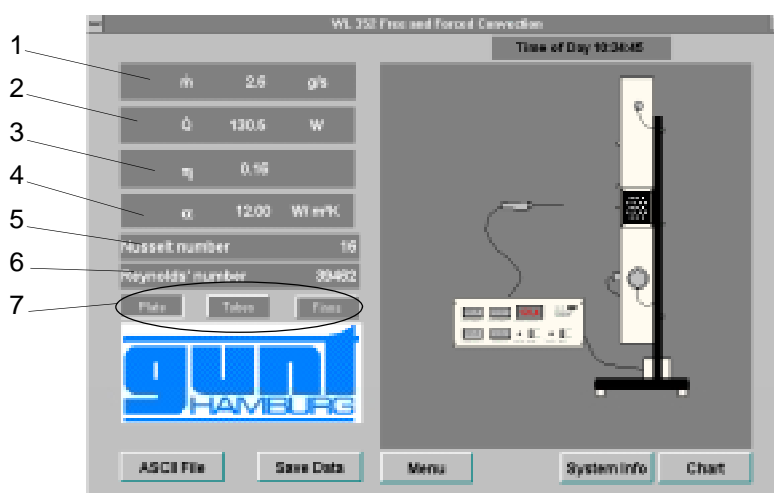


Fig. 2.5 Calculations (Cálculos)

Los campos que se ven en la figura 2.9 muestran los valores actuales en funcionamiento siguientes: fluido en masa (1), cantidad de calor transmitida (2), grado de efectividad (3), coeficientes de transferencia del calor (4), coeficiente de Nusselt (5) y cifra de Reynold (6).

Con los selectores (7) se indica la geometría de calefactor utilizada actualmente (placa, haz de tubos o láminas), que tiene una influencia decisiva en los cálculos.

Para guardar los datos y pasar a otras imágenes se debe seguir el mismo procedimiento ya descrito

WL 352 Aparato para convección espontánea y forzada/PC



en el capítulo 2.4.3. Además de los valores de medición se guardan los valores calculados.

¡Atención! Para obtener valores correctos es necesario guardar la temperatura del calefactor en la imagen "Diagrama" (véase capítulo 2.4.3).

3 Indicaciones de seguridad

3.1 Peligros de lesiones y de muerte

Cuando se trabaja con el Banco de ensayos para convección libre y forzada WL 352 se deben tener en cuenta los siguientes aspectos relacionados con la seguridad durante el trabajo:



- **¡PELIGRO! Precaución al abrir el equipo de manejo e indicación y manipular las demás conexiones eléctricas.**
Peligro de descarga eléctrica. Desconectar primero el enchufe de red.
- Utilizar sólo dispositivos protectores (fusibles) con el valor adecuado.
- **¡PELIGRO! No desatornillar las tapas de los elementos calefactores.** Las piezas se encuentran bajo tensión.
- **¡PELIGRO! No tocar las superficies calentadas de los componentes después del ensayo ni colocarlos cerca de piezas termosensibles.** La superficie puede alcanzar temperaturas de hasta 130 C.
Peligro de quemaduras debido a las altas temperaturas de la superficie. Además, las piezas con punto de fusión bajo se podrían fundir.
Cuando se trabaja con potencias caloríficas altas, la caja también se calienta. Llevar siempre guantes o utilizar un paño para el desmontaje. Los tornillos de los tapones a presión pueden alcanzar temperaturas de hasta 120 C.



- **¡PELIGRO! No introducir jamás los dedos por arriba en el canal de aire.**
Puede haber aplastamientos o cortes debidos al soplador giratorio.

3.2 Peligros para el equipo y su funcionamiento



- No utilizar el soplador en el margen de regulación inferior ya que, aunque el ventilador se encuentra bajo presión, está parado.
- Las conexiones del ventilador y de los elementos calefactores tienen conectores idénticos. En la parte trasera del equipo de manejo e indicación se ha marcado el lugar de cada conexión. No hay que confundir estas dos conexiones.
- La punta de la sonda del sensor de velocidad es muy sensible. Por lo tanto, hay que evitar tocarla.
- En el indicador digital del equipo de manejo e indicación aparecen valores incorrectos cuando las salidas están abiertas (cuando el sensor o los elementos calefactores no están conectados).

4 Principios teóricos

En este capítulo se presentan algunos principios teóricos que facilitarán la comprensión y la evaluación de los ensayos posteriores. Sólo se representa una parte de la transmisión de calor; una explicación teórica completa ocuparía mucho más espacio.

4.1 Cantidad de calor

La cantidad de calor en las fórmulas de termodinámica se simboliza con \dot{Q} .

La cantidad de calor se puede calcular de varias formas.

El primer método para calcular la cantidad de calor transmitida se basa en el medio endotérmico (fluido). Para el cálculo se utiliza la fórmula siguiente:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_{p_L} \cdot \Delta T$$

El caudal másico del aire \dot{m} se compone del modo siguiente:

$$\dot{m} = w \cdot A \cdot \rho_{Luft}$$

w es la velocidad de fluido calculada en toda la sección transversal de inundación. En el banco de ensayos para convección libre y forzada se define una sección transversal de inundación A constante de $0,0144 \text{ m}^2$. La sección transversal se calcula a partir de las dimensiones del canal: $120 \cdot 120 \text{ mm}^2$.

La densidad del aire ρ_{aire} se puede leer en las tablas. La densidad del aire es inversamente proporcional a la temperatura.

T en °C	ρ_{aire} en $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- 20	1,3765
0	1,2754
20	1,1881
40	1,1120
60	1,0452
80	0,9859
100	0,9329
120	0,8854
140	0,8425
160	0,8036
180	0,7681
200	0,7356

Tab. 4.1 Temperatura/densidad

T en °C	ρ_{aire} en $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
- 20	1,004
0	1,004
20	1,007
40	1,008
60	1,009
80	1,010
100	1,012
120	1,014
140	1,017
160	1,020
180	1,023
200	1,026

Tab. 4.2 Temperatura/capacidad térmica

La densidad de aire que se debe aplicar para calcular el caudal másico depende de la temperatura en el lugar de medición de la velocidad.

La diferencia de temperatura ΔT se calcula a partir de la diferencia entre la temperatura de entrada y la de salida. Este cálculo de la diferencia de temperatura no es correcto al 100% desde el punto de vista físico, pero es lo bastante preciso para calcular la cantidad de calor a partir de los valores de medición de ensayo.

La capacidad térmica específica del aire c_{pL} también depende de la temperatura del aire. Es proporcional a la temperatura, de ahí los valores detallados en la tabla de la izquierda.

Si presuponemos que la temperatura evoluciona en el intercambiador de calor de forma prácticamente lineal, para determinar la capacidad térmica específica que se debe aplicar en la fórmula de la cantidad de calor se puede utilizar el valor medio de la temperatura del aire a la entrada y a la salida del intercambiador de calor.

$$T_M = \frac{T_{\text{ein}} + T_{\text{aus}}}{2}$$

Otra forma de calcular la cantidad de calor transmitida se basa en la fuente de calor. La fuente de calor del banco de ensayos para convección libre y forzada consiste en unas resistencias eléctricas, por lo que la energía P_{el} aplicada se puede considerar una medida de la cantidad de calor.

4.2 Grado de efectividad

El grado de efectividad η aporta información sobre las pérdidas que se producen durante una transmisión de calor. Este factor indica la potencia calorífica aplicada que se transmite al fluido (en este caso, aire). Esto se puede expresar mediante la ecuación siguiente:

$$P_{el} \cdot \eta = Q$$

Si se resuelve la ecuación anterior para calcular η , el resultado es el siguiente:

$$\eta = \frac{Q}{P_{el}}$$

El grado de efectividad tiene en cuenta todas las pérdidas debidas a la transmisión por convección y radiación al entorno y no al fluido.

4.3 Transmisión de calor

La transmisión de calor de una superficie a un fluido se describe matemáticamente como sigue:

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha \cdot T_m$$

Con esta fórmula se puede determinar el coeficiente de transferencia de calor α . La cantidad de calor \dot{Q} es igual a la cantidad de calor transmitida en el capítulo 4.1. La superficie de intercambiador de calor A se puede calcular a partir de sus particularidades geométricas (placa plana, cilindro, láminas, etc.). El factor T_m es la diferencia de

temperatura logarítmica media. Para el cálculo se utiliza la fórmula siguiente:

$$T_m = \frac{(T_{O_{Ein}} - T_{L_{Ein}}) - (T_{O_{Aus}} - T_{L_{Aus}})}{\ln \frac{(T_{O_{Ein}} - T_{L_{Ein}})}{(T_{O_{Aus}} - T_{L_{Aus}})}}$$

Dado que la temperatura de superficie T_O del intercambiador de calor permanece prácticamente constante en toda la superficie y sólo se modifica de forma considerable la temperatura del aire T_L entre la entrada y la salida, en este caso particular también se puede aplicar la ley siguiente:

$$T_m = \frac{T_{L_{Aus}} - T_{L_{Ein}}}{\ln \frac{(T_{O_{Ein}} - T_{L_{Ein}})}{(T_{O_{Aus}} - T_{L_{Aus}})}}$$

Como en el banco de ensayos para convección libre y forzada se utilizan superficies de intercambiador de aluminio, se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor α del aluminio al aire.

4.4 Inundación laminar y turbulenta

La transferencia de calor no sólo depende de la diferencia de temperatura y del material de la superficie del intercambiador de calor, sino también de la velocidad de fluido. Se diferencia entre dos formas de inundación:

- inundación laminar,
- inundación turbulenta.

Estos dos tipos de inundación dependen directamente de la velocidad de fluido. La inundación laminar sólo se produce cuando la velocidad es

reducida. La transferencia de calor con una inundación laminar es mucho peor que con una inundación turbulenta. Con la inundación laminar, en la superficie del intercambiador de calor siempre hay las mismas partículas de fluido. Como el aire es un aislante térmico relativamente bueno, el calor se propaga muy mal. Cuando la velocidad es mayor y la inundación es turbulenta, se produce una mezcla. La inundación se separa de las paredes debido a la elevada velocidad. Se forman remolinos que acercan partículas de la superficie del intercambiador más alejadas y aún frías, y al mismo tiempo, alejan las partículas ya calientes.

El tipo de inundación (laminar/turbulenta) no sólo depende de la velocidad, sino también de la viscosidad del fluido y de las dimensiones geométricas de la inundación. Así pues, como medida objetiva, se ha introducido la cifra de Reynold.

4.5 La cifra de Reynold

La cifra de Reynold es un criterio que permite determinar si una inundación es turbulenta o laminar. En una placa plana inundada, el límite se encuentra aproximadamente en $Re = 1$ a $5 \cdot 10^5$. En tubos y láminas, este valor varía.

La cifra de Reynold se calcula como sigue:

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}, \text{ para placas planas}$$

o

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu}, \text{ para haces de tubos}$$

T en °C	$\nu_{\text{aire}} \text{ en } \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 10^{-6}$
- 20	11,73
0	13,41
20	15,13
40	16,92
60	18,88
80	21,02
100	23,15
120	25,33
140	27,53
160	29,88
180	32,43
200	34,94

Tab. 4.3 Temperatura/viscosidad cinética

Cuando la cifra de Reynold alcanza un valor determinado, se puede presuponer que la inundación va a cambiar de laminar a turbulenta. Sin embargo, este valor no sólo depende de las magnitudes medidas, sino también de la forma geométrica del cuerpo inundado.

La velocidad de fluido w durante la convección depende, por un lado, del grado de calentamiento del aire, ya que la velocidad aumenta cuando se da una diferencia de densidad importante entre la entrada y la salida de aire. Por otro lado, si se utiliza un soplador, la velocidad podría aumentar.

La viscosidad cinemática del aire ν depende de la temperatura y se puede leer en la tabla de la izquierda. Los valores vuelven a indicar claramente que la temperatura y la viscosidad cinemática son proporcionales entre sí.

4.6 El coeficiente de Nusselt

El coeficiente de Nusselt adimensional permite medir la transferencia de calor. Es importante en muchas teorías de similitud de la transferencia de calor. Se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \text{ o, en el caso de los tubos,}$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \frac{\pi}{2} \cdot d}{\lambda}$$

La letra griega λ simboliza los coeficientes de conductibilidad térmica del aire. Este coeficiente

T en °C	ρ_{aire} en $\frac{W}{Km}$
- 20	0,02301
0	0,02454
20	0,02603
40	0,02749
60	0,02894
80	0,03038
100	0,03181
120	0,03323
140	0,03466
160	0,03607
180	0,03749
200	0,03891

Tab. 4.4 Temperatura/coeficiente de conductividad térmica

depende de la temperatura. Los valores se pueden deducir de la tabla de la izquierda.

Mediante la ecuación siguiente, también se puede calcular de forma aproximada el coeficiente de Nusselt de una superficie plana (placa) inundada en paralelo durante una inundación laminar.

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}$$

En esta ecuación se utiliza por primera vez el número de Prandtl, que en el caso del aire es de aproximadamente 0,7. Se pueden deducir valores más precisos de la tabla del anexo.

Con las dos ecuaciones del coeficiente de Nusselt se puede comprobar la fiabilidad de los valores de medición. Si se obtiene un resultado parecido con las dos ecuaciones y los mismos valores de medición, se puede afirmar que las mediciones son correctas.

Las teorías de similitud contienen muchas otras ecuaciones con otros números característicos. En la bibliografía del anexo figuran todas las teorías sobre la transferencia de calor.

5 Experimentos

5.1 Ensayos sobre la convección libre

En este apartado se describen ensayos con los tres elementos de calefacción. En todos los casos, el ventilador está apagado. Los elementos calefactores funcionan a máxima potencia.

5.1.1 Balance energético de la placa plana

Para empezar el ensayo, el elemento de calefacción (placa) desmontado se conecta al equipo de manejo e indicación. Una vez establecida la alimentación, el potenciómetro del equipo de manejo se ajusta al 100% de la potencia calorífica y la temperatura de superficie T_0 se mide con el elemento térmico. Una vez alcanzado un régimen constante (imagen "Chart", Diagrama), es decir, cuando no se dan cambios de temperatura importantes en la superficie del elemento calefactor, se guarda la temperatura. A continuación, el calefactor se introduce en el canal y se espera de nuevo a que se restablezca el régimen constante. Para la evaluación se registran los valores siguientes:

- Temperatura T_1 a la entrada del canal de aire.
- Velocidad del aire a la entrada del canal de aire.
- Temperatura T_2 a la salida del canal de aire.

Este orden es válido también para los ensayos posteriores relacionados con los balances energéticos de los distintos intercambiadores de calor. En los calefactores de haces de tubos o láminas, las temperaturas de superficie también se pueden medir con estos elementos montados gracias a las tubuladuras de medición.

Para la placa plana se registran los valores de medición siguientes:

$$T_1 = 21,5 \text{ C}, \quad w = 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad T_2 = 25,5 \text{ C}$$

Para calcular la cantidad de calor transmitida se utiliza la fórmula siguiente:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_{p_L} \cdot (T_2 - T_1)$$

El caudal másico del aire se calcula como sigue:

$$\dot{m} = w \cdot A \cdot \rho_{L_{\text{ein}}}$$

Para resolver esta ecuación, los valores c_{p_L} y $\rho_{L_{\text{ein}}}$ se deducen de las tablas del capítulo 4. Si se tiene en cuenta T_1 , se obtiene una densidad $\rho_{L_{\text{ein}}}$ de $1,1824 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. La capacidad térmica específica c_{p_L} se calcula a partir del valor medio de la temperatura del aire a la entrada y a la salida. A partir de la tabla se obtiene una c_{p_L} de $1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$. De aquí se deducen los valores numéricos siguientes:

$$\dot{m} = 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0144 \text{ m}^2 \cdot 1,1824 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,70 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q} = 1,70 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot (25,5 \text{ C} - 21,5 \text{ C})$$

$$\dot{Q} = 6,9 \text{ W}$$

El grado de efectividad η se calcula del modo siguiente:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{P_{\text{el}}} = \frac{6,9 \text{ W}}{171,9 \text{ W}} = 0,039$$

En los capítulos siguientes se aplican casi siempre las mismas fórmulas, por lo que no se detallarán todas.

5.1.2 Balance energético del haz de tubos

Si la placa plana se sustituye por el elemento de calefacción con haz de tubos, se obtienen los valores de medición siguientes:

$$T_1 = 21,8 \text{ C},$$

$$w = 0,2 \frac{m}{s},$$

$$T_2 = 43,9 \text{ C},$$

$$P = 169,3 \text{ W}.$$

De aquí se derivan los valores obtenidos de las tablas para densidad y capacidad térmica específica:

$$\rho_{L_{ein}} = 1,1813 \frac{kg}{m^3},$$

$$c_{pL} = 1,0075 \frac{kJ}{kg K}.$$

Una vez realizados los cálculos con estos valores, se obtienen los resultados siguientes:

$$\dot{m} = 0,2 \frac{m}{s} \cdot 0,0144 \text{ m}^2 \cdot 1,1813 \frac{kg}{m^3} = 3,40 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{Q} = 3,40 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s} \cdot 1,0075 \frac{kJ}{kg K} \cdot (43,9\text{C} - 21,8\text{C})$$

$$\dot{Q} = 75,8 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{75,8 \text{ W}}{163,9 \text{ W}} = 0,460$$

5.1.3 Balance energético de las láminas

Cuando se utiliza el elemento calefactor con láminas se obtienen los valores de medición siguientes:

$$T_1 = 21,6 \text{ C,}$$

$$w = 0,2 \frac{m}{s},$$

$$T_2 = 44,8 \text{ C,}$$

$$P = 164,7 \text{ W.}$$

De aquí se derivan los valores siguientes para densidad y capacidad térmica específica:

$$\rho_{Lein} = 1,1820 \frac{kg}{m^3},$$

$$c_{pL} = 1,0075 \frac{kJ}{kg K}.$$

Los cálculos sobre el balance energético en las láminas aportan los resultados siguientes:

$$m = 0,2 \frac{m}{s} \cdot 0,0144 m^2 \cdot 1,1820 \frac{kg}{m^3} = 3,40 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{Q} = 3,40 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s} \cdot 1,0075 \frac{kJ}{kg K} \cdot (44,8C - 21,6C)$$

$$\dot{Q} = 84,8 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{84,8 \text{ W}}{164,7 \text{ W}} = 0,514$$

5.2 Ensayos sobre la convección forzada

En este apartado se repiten los ensayos del capítulo 5.1, pero en este caso el ventilador funciona al 100% de su potencia nominal cuando se alcanza la potencia calorífica máxima. De este modo, se provoca el paso de inundación laminar a turbulenta, lo cual influye de manera decisiva en la transferencia de calor.

Para reducir el tiempo transcurrido hasta alcanzar el régimen constante y resaltar con claridad la diferencia entre la convección libre y la forzada, es importante utilizar un elemento calefactor primero sin ventilador, e inmediatamente después utilizarlo con ventilador. Si se realizan los ensayos por este orden, el tiempo transcurrido hasta el calentamiento es nulo.

5.2.1 Balance energético de la placa plana

Cuando se realiza el ensayo con el ventilador encendido, se pueden leer los valores siguientes para la placa plana:

$$T_1 = 21,0 \text{ C},$$

$$w = 2,97 \frac{m}{s},$$

$$T_2 = 21,5 \text{ C},$$

$$P = 171,9 \text{ W}.$$

De aquí se derivan los valores siguientes para densidad y capacidad térmica específica:

$$\rho_{Lein} = 1,1843 \frac{kg}{m^3},$$

$$c_{pL} = 1,007 \frac{kJ}{kg K}.$$

Una vez realizados los cálculos con estos valores, se obtienen los resultados siguientes:

$$m = 2,97 \frac{m}{s} \cdot 0,0144 m^2 \cdot 1,1843 \frac{kg}{m^3} = 0,051 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{Q} = 0,051 \frac{kg}{s} \cdot 1,007 \frac{kJ}{kg K} \cdot (21,5C - 21,0C)$$

$$\dot{Q} = 25,5 W$$

$$\eta = \frac{25,5 W}{171,9 W} = 0,148$$

5.2.2 Balance energético del haz de tubos

Este ensayo aporta los valores de medición siguientes:

$$T_1 = 21,2 C,$$

$$w = 2,50 \frac{m}{s},$$

$$T_2 = 24,5 C,$$

$$P = 163,9 W.$$

De aquí se derivan los valores medios siguientes para densidad y capacidad térmica específica:

$$\rho_{L_{ein}} = 1,1835 \frac{kg}{m^3},$$

$$c_{pL} = 1,007 \frac{kJ}{kg K}.$$

Una vez realizados los cálculos con los valores leídos y los medidos, se obtienen los resultados siguientes:

$$m = 2,50 \frac{m}{s} \cdot 0,0144 m^2 \cdot 1,1835 \frac{kg}{m^3} = 0,043 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{Q} = 0,043 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot (24,5\text{C} - 21,2\text{C})$$

$$\dot{Q} = 142,9 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{142,9 \text{ W}}{163,9 \text{ W}} = 0,872$$

5.2.3 Balance energético de las láminas

Cuando se realiza el ensayo con el elemento de calefacción de láminas, se obtienen los valores de medición siguientes:

$$T_1 = 21,1 \text{ C},$$

$$w = 2,76 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$T_2 = 23,9 \text{ C},$$

$$P = 164,7 \text{ W}.$$

De aquí se derivan los valores interpolables de las tablas para densidad y capacidad térmica específica:

$$\rho_{L\text{ein}} = 1,1839 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

$$c_{pL} = 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}.$$

Una vez realizados los cálculos con estos datos, se obtienen los resultados siguientes:

$$\dot{m} = 2,76 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0144 \text{ m}^2 \cdot 1,1839 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,047 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q} = 0,047 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot (23,9\text{C} - 21,1\text{C})$$

$$\dot{Q} = 132,6 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{132,6 \text{ W}}{164,7 \text{ W}} = 0,805$$

5.3 Comparación entre convección libre y forzada

A continuación se contrastan en una tabla los resultados de los ensayos de convección libre y de los ensayos de convección forzada.

A partir de esta tabla se pueden sacar algunas conclusiones respecto a la transmisión de calor basada en la convección. Así, por ejemplo, se ve que la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida es menor en la convección forzada que

	Placa plana		Haz de tubos		Láminas	
	Libre	Forz.	Libre	Forz.	Libre	Forz.
T_1	21,5 °C	21,0 °C	21,8 °C	21,2 °C	21,6 °C	21,1 °C
T_2	25,5 °C	21,5 °C	43,9 °C	24,5 °C	44,8 °C	23,9 °C
w	$0,1 \frac{m}{s}$	$2,97 \frac{m}{s}$	$0,2 \frac{m}{s}$	$2,50 \frac{m}{s}$	$0,2 \frac{m}{s}$	$2,76 \frac{m}{s}$
\dot{Q}	6,9 W	25,5 W	75,8 W	142,9 W	84,8 W	132,6 W
P_{el}	171,9 W	171,9 W	163,9 W	163,9 W	164,7 W	164,7 W
η	0,039	0,148	0,460	0,872	0,514	0,805

la libre. Sin embargo, la cantidad de calor transmitida y el grado de efectividad aumentan en un factor entre 2 y 3,5. Este fenómeno se relaciona con el paso de inundación laminar a turbulenta. En la inundación turbulenta el aire se mezcla, por lo que la capa límite de la superficie del intercambiador de calor se renueva constantemente.

5.4 Cambio de temperatura en el intercambiador de calor

Si se utiliza un elemento de calefacción con haz de tubos, la caída de la temperatura siempre se debe registrar dentro del intercambiador de calor, tanto en convección libre como en forzada. Para ello, el elemento de calefacción se utiliza al 100% de su potencia y el elemento térmico se mueve al canal de aire mediante las tubuladuras de medición, de forma que su punta quede en el centro del orificio del cilindro. En este ensayo, se alcanza el régimen constante cuando se puede medir una temperatura de aproximadamente 100 C.

El elemento térmico se saca de la primera tubuladura de medición y se introduce consecutivamente en los tres orificios siguientes del cilindro. De este modo, se obtienen los valores de medición siguientes en convección libre:

$$T_{O1} = 101 \text{ C}$$

$$T_{O2} = 98 \text{ C}$$

$$T_{O3} = 96 \text{ C}$$

$$T_{O4} = 93 \text{ C}$$

Las mediciones se deben repetir después de encender el ventilador. Cuando se alcanza un régimen constante, se obtienen los valores siguientes en convección forzada:

$$T_{O1} = 53 \text{ C}$$

$$T_{O2} = 50 \text{ C}$$

$$T_{O3} = 46 \text{ C}$$

$$T_{O4} = 42 \text{ C}$$

En la convección libre se da una diferencia de temperatura de 8 K entre la pieza añadida del cilindro y su punta. En cambio, en la convección forzada la temperatura disminuye 11 K entre la

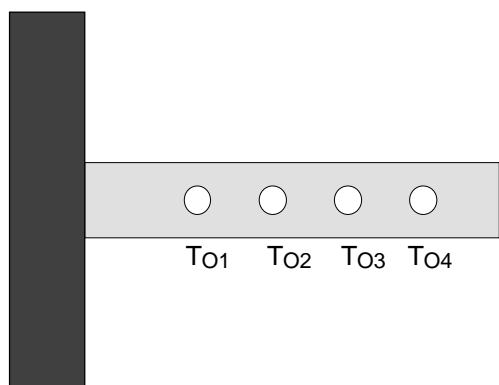


Fig. 5.1 Puntos de medición en el haz de tubos

pieza añadida y la punta. La transferencia de calor también es mejor en la segunda parte del ensayo.

5.5 Coeficiente de transferencia de calor

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor α del aluminio al aire, se toman los valores de medición del ensayo sobre la convección libre con la placa plana y se utilizan en la fórmula de la transferencia de calor.

$$T_1 = T_{L_{Ein}} = 21,5 \text{ C},$$

$$T_2 = T_{L_{Aus}} = 25,5 \text{ C},$$

$$T_O = T_{O_{Ein}} = T_{O_{Aus}} = 105 \text{ C},$$

$$\dot{Q} = 6,9 \text{ W}.$$

De todo ello se obtiene una diferencia de temperatura logarítmica media de:

$$T_m = \frac{T_{L_{Aus}} - T_{L_{Ein}}}{\ln \frac{(T_{O_{Ein}} - T_{L_{Ein}})}{(T_{O_{Aus}} - T_{L_{Aus}})}}$$

$$T_m = \frac{25,5 \text{ C} - 21,5 \text{ C}}{\ln \frac{(105 \text{ C} - 21,5 \text{ C})}{(105 \text{ C} - 25,5 \text{ C})}} = 81,48 \text{ C}$$

A continuación se puede calcular el coeficiente de transferencia del calor del aluminio al aire mediante la ecuación siguiente:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A \cdot T_m}$$

$$\alpha = \frac{6,9 \text{ W}}{0,0118 \text{ m} \cdot 0,0118 \text{ m} \cdot 81,48 \text{ K}} = 6,082 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Si se toman los valores de medición del ensayo realizado con el ventilador encendido

($T_1 = T_{L_{Ein}} = 21,0 \text{ C}$, $T_2 = T_{L_{Aus}} = 21,5 \text{ C}$,
 $T_{O_{Ein}} = T_{O_{Aus}} = 105 \text{ C}$, $\dot{Q} = 18,2 \text{ W}$), se obtiene un
coeficiente de transferencia de calor α consider-
ablemente mayor. Tras el cálculo se obtienen los
valores siguientes:

$$T_m = 83,75 \text{ C},$$

$$\alpha = 21,86 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}.$$

Estos resultados destacan claramente que la
transferencia de calor es peor en la convección
libre que en la forzada.

Los resultados son similares con las demás super-
ficies de intercambiador de calor.

En la literatura técnica se señalan coeficientes de
transferencia de calor entre 5 y 25 en convección
libre. En cambio, en una convección forzada se
alcanzan valores entre 12 y 60.

5.6 La cifra de Reynold

Para calcular la cifra de Reynold también se utili-
zan los valores de medición usados anteriormen-
te. De nuevo se muestra aquí un ejemplo de
cálculo basado en una placa en convección libre
y forzada. La viscosidad cinemática del aire ν se
puede deducir de las tablas del capítulo 4.5.

En la convección libre:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot l}{\nu} = \frac{0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,118 \text{ m}}{15,13 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 779,9$$

En la convección forzada:

$$\text{Re} = \frac{2,97 \frac{m}{s} \cdot 0,118 m}{15,13 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 231633$$

En la literatura técnica se habla repetidas veces de $\text{Re}_{krit} = 1 - 5 \cdot 10^5$ como límite superior entre la inundación laminar y la turbulenta. Como la cifra de Reynold se encuentra dentro de este valor límite en la convección forzada y la transferencia de calor es mejor que en la convección libre, estamos ante una inundación turbulenta.

5.7 El coeficiente de Nusselt

De nuevo se recurre a los ensayos realizados con la placa plana en convección libre para calcular el coeficiente de Nusselt. Los valores siguientes sirven de base para ambas formas de cálculo:

$$\alpha = 6,082 \frac{W}{m^2 K},$$

$$l = 0,118 m,$$

$$\lambda = 0,02627 \frac{W}{K m},$$

$$\text{Re} = 779,9,$$

$$\text{Pr} = 0,7.$$

Con la primera fórmula se obtiene el resultado siguiente:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \frac{6,082 \frac{W}{K m^2} \cdot 0,118 m}{0,02627 \frac{W}{m K}} = 27,31$$

WL 352 Aparato para convección espontánea y forzada/PC



Con la siguiente forma de cálculo, derivada de una teoría de similitud, se obtiene el resultado siguiente para una placa plana inundada en paralelo:

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}$$

$$Nu = 0,664 \cdot 779,9^{0,5} \cdot 0,7^{0,33} = 16,46$$

La desviación de los dos resultados es relativamente pequeña, por lo que se puede dar por supuesto que las mediciones son correctas.

WL 352 Aparato para convección espontánea y forzada/PC



6 Anexo

6.1 Datos técnicos

Dimensiones del banco de ensayos:

Peso:	25	kg
Alto:	1,2	m
Ancho:	0,35	m
Largo:	0,7	m

Dimensiones del canal de aire:

Sección transversal de inundación:

120 x 120 mm²

Alto: 1 m

Velocidad máxima del aire: 3,0 m/s

Caudal máximo de aire: 180 m³/h

reas de medición:

Sensor de inundación: 0...10 m/s

-Medio de medición -20...85 C

-Entorno 0...60 C

Elemento térmico del tipo K:

-50...+1200 C

Sensor PTC: -40...+150 C

Potencia calorífica máxima: 170 W

Límite de temperatura: 120 C

Superficies de intercambiador de calor

Placa plana: 0,014 m²

Haz de tubos: 0,098 m²

Láminas: 0,14 m²

Conexión a la red:

Tensión: 230 V

Frecuencia: 50 Hz

Corriente: 6 A

Protección por fusible del equipo de manejo:

4 A

6.2 Bibliografía

Günter Cerbe, Hans Joachim Hoffmann,
Einführung in die Wärmelehre,
Carl Hanser Verlag,
9., verbesserte Auflage, München Wien 1990

Dr.-Ing. Friedrich Stelzer,
Wärmeübertragung und Strömung,
Verlag Karl Thiemig KG,
München 1971

Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Kalide,
Einführung in die technische Strömungslehre,
Carl Hanser Verlag,
6., durchgesehene Auflage, München Wien 1984

6.3 Tablas

Propiedades de transmisión del calor del aire seco a 1 bar

t °C	ρ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	c_p $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	λ $\frac{\text{W}}{\text{K m}}$	η $\frac{\text{kg}}{\text{m s}}$	ν $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	a $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Pr —
— 20	1,3765	1,004	0,02301	$16,15 \cdot 10^{-6}$	$11,73 \cdot 10^{-6}$	$16,6 \cdot 10^{-6}$	0,71
0	1,2754	1,004	0,02454	$17,10 \cdot 10^{-6}$	$13,41 \cdot 10^{-6}$	$19,1 \cdot 10^{-6}$	0,70
20	1,1881	1,007	0,02603	$17,98 \cdot 10^{-6}$	$15,13 \cdot 10^{-6}$	$21,8 \cdot 10^{-6}$	0,70
40	1,1120	1,008	0,02749	$18,81 \cdot 10^{-6}$	$16,92 \cdot 10^{-6}$	$24,5 \cdot 10^{-6}$	0,69
60	1,0452	1,009	0,02894	$19,73 \cdot 10^{-6}$	$18,88 \cdot 10^{-6}$	$27,4 \cdot 10^{-6}$	0,69
80	0,9859	1,010	0,03038	$20,73 \cdot 10^{-6}$	$21,02 \cdot 10^{-6}$	$30,5 \cdot 10^{-6}$	0,69
100	0,9329	1,012	0,03181	$21,60 \cdot 10^{-6}$	$23,15 \cdot 10^{-6}$	$33,7 \cdot 10^{-6}$	0,69
120	0,8854	1,014	0,03323	$22,43 \cdot 10^{-6}$	$25,33 \cdot 10^{-6}$	$37,0 \cdot 10^{-6}$	0,68
140	0,8425	1,017	0,03466	$23,19 \cdot 10^{-6}$	$27,53 \cdot 10^{-6}$	$40,5 \cdot 10^{-6}$	0,68
160	0,8036	1,020	0,03607	$24,01 \cdot 10^{-6}$	$29,88 \cdot 10^{-6}$	$44,0 \cdot 10^{-6}$	0,68
180	0,7681	1,023	0,03749	$24,91 \cdot 10^{-6}$	$32,43 \cdot 10^{-6}$	$47,7 \cdot 10^{-6}$	0,68
200	0,7356	1,026	0,03891	$25,70 \cdot 10^{-6}$	$34,94 \cdot 10^{-6}$	$51,6 \cdot 10^{-6}$	0,68
250	0,6653	1,035	0,04243	$27,40 \cdot 10^{-6}$	$41,18 \cdot 10^{-6}$	$61,6 \cdot 10^{-6}$	0,67
300	0,6072	1,046	0,04591	$29,20 \cdot 10^{-6}$	$48,09 \cdot 10^{-6}$	$72,3 \cdot 10^{-6}$	0,67
400	0,5170	1,069	0,05257	$32,55 \cdot 10^{-6}$	$62,95 \cdot 10^{-6}$	$95,1 \cdot 10^{-6}$	0,66
500	0,4502	1,093	0,05848	$35,50 \cdot 10^{-6}$	$78,86 \cdot 10^{-6}$	$119 \cdot 10^{-6}$	0,66
600	0,3986	1,116	0,0635	$38,30 \cdot 10^{-6}$	$96,08 \cdot 10^{-6}$	$143 \cdot 10^{-6}$	0,67
700	0,3577	1,137	0,0678	$40,87 \cdot 10^{-6}$	$114,3 \cdot 10^{-6}$	$166 \cdot 10^{-6}$	0,69
800	0,3243	1,155	0,0713	$43,32 \cdot 10^{-6}$	$133,6 \cdot 10^{-6}$	$190 \cdot 10^{-6}$	0,70
900	0,2967	1,171	0,0743	$45,65 \cdot 10^{-6}$	$153,9 \cdot 10^{-6}$	$214 \cdot 10^{-6}$	0,72
1000	0,2734	1,185	0,0768	$47,88 \cdot 10^{-6}$	$175,1 \cdot 10^{-6}$	$237 \cdot 10^{-6}$	0,74

t: temperatura

ρ : densidad

c_p : capacidad térmica específica

λ : coeficiente de conductibilidad térmica

η : viscosidad dinámica

ν : viscosidad cinemática

a: cifra característica de temperatura

Pr: número de Prandtl

6.4 Indice

A	
	aislante térmico 16
B	
	balance energético 19
C	
	cambio de temperatura 27
	cantidad de calor 12
	capacidad térmica específica 13
	caudal másico del aire 12
	cifra de Reynold 16, 29
	coeficiente de conductibilidad térmica 17
	coeficiente de Nusselt 17, 30
	coeficiente de transferencia de calor 14, 28
	colocación 3
	conducto de aire 2
	conexión 3
	convección forzada 23
	convección libre 19
D	
	densidad 12
	diferencia de temperatura 13
	diferencia de temperatura logarítmica media 14
E	
	elemento de calefacción 2
	energía 13
	equipo de manejo e indicación 2
	evolución de la temperatura 13
G	
	grado de efectividad 14
H	
	haz de tubos 21, 24
I	
	indicador digital 11
	inundación laminar 15
	inundación turbulenta 15
L	
	lámina 22, 25
P	

WL 352 Aparato para convección espontánea y forzada/PC



	pérdida	14
	placa plana	19, 23
	principios teóricos	12
	puesta en marcha	3
S		
	sección transversal de inundación	12
	seguridad durante el trabajo	10
T		
	temperatura de superficie	15
	teoría de similitud	18, 31
	transmisión de calor	12, 14, 26
V		
	velocidad de fluido	12
	viscosidad cinemática	17