

Diss. ETH Nr. 7509

GRUNDLAGEN ZUR EXPERIMENTELLEN BESTIMMUNG DER  
BEREIFUNG VON LUFTKUEHLERN

ABHANDLUNG  
ZUR ERLANGUNG DES TITELS EINES  
DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN  
DER  
EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZUERICH

VORGELEGT VON

HERBERT EGOLF

DIPL.MASCH.-ING. ETH

GEBOREN AM 29. APRIL 1951

VON HOMBRECHTIKON ZH UND ZÜRICH

ANGENOMMEN AUF ANTRAG VON:

PROF.DR. CH. TREPP, REFERENT

PROF. A. BUCK, KORREFERENT

1984

## Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Reifbildung an Luftkühlern unter geometrisch einfachen Verhältnissen zu untersuchen.

Zunächst wurde hiezu mit dem Aufbau des klimatisierbaren Windkanals die Grundlage für experimentelle Untersuchungen geschaffen. Die Klimatisierungsmöglichkeiten in der Versuchsanlage ergaben zusammen mit deren automatisiertem Datenerfassungs- und Regelsystem die Voraussetzungen zur Durchführung von Experimenten mit stationären (diese Arbeit) und instationären Anströmbedingungen (künftige Untersuchungen) sowie zur geeigneten Speicherung und Simultanauswertung der Messdaten.

Mit Hilfe zweier für die vorliegenden Untersuchungen entwickelten Plattenkühlaggregate wurde die Reifbildung im ebenen beidseitig gekühlten Spaltkanal bei konstanten Wandtemperaturen beobachtet und quantitativ erfasst. Durch das gewählte Regelungskonzept konnten insbesondere auch während der Anfangsphase der Experimente einwandfreie Versuchsbedingungen eingehalten werden.

Ueber den gesamten untersuchten Versuchsparameterbereich konnten in bezug auf die Art und Weise der Reifentstehung keine grundlegenden Unterschiede festgestellt werden, vielmehr wurde stets derselbe typische Verlauf beobachtet: Trübung der Kühlplatten, Entstehung einzelner Makrokristallverbände (Baumgruppen), sich darum herum linsenförmig ausbreitender fein strukturierter Reif (Buschwerk) und schliesslich gleichmässiges Reifwaldwachstum. Aus dem Verlauf der während der Versuche bestimmten mittleren Dichte der Reifschicht muss gefolgert werden, dass anfänglich die Kühlplatten mit einer ersten eisartigen Schicht hoher Dichte beaufschlagt werden. Eine besondere Bedeutung wird der in

Strömungsrichtung fortschreitenden Reifwaldwachstumsfront zugeschrieben, trennt sie doch die Kühlzone in zwei Abschnitte: einen mit praktisch unveränderter und einen mit stark vergrößerter spezifischer Oberfläche.

Aus den Versuchsergebnissen können ausserdem unmittelbar folgende quantitative Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Die Reifschichtdickenentwicklung hängt im Einlaufbereich nicht vom Plattenabstand ab.
- Die Dichte des erstentstehenden Reifwaldes weist im untersuchten Parameterbereich stets den selben Wert von ca.  $\rho_{R,0} \approx 75 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  auf.

Für die aus den Experimenten bekannten zeitlichen Reifprofilverläufe gelang es, die Luftströmungswiderstandsbeiwerte theoretisch zu ermitteln. Mit einem numerischen Berechnungsverfahren konnte für den Gesamtdruckverlust der Luftströmung eine gesamthaft gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten erzielt werden.

Im abschliessenden Teil der Arbeit wurde ein theoretisches Gedankenmodell zur Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der Reifbildung entwickelt. Ausgehend von einer aufgrund der zuvor definierten Struktur berechenbaren Wärmeleitfähigkeit der Reifschicht sowie den theoretisch bestimmten Wärmeübergangszahlen und den mit Hilfe einer Analogiebetrachtung daraus abgeleiteten Stoffübergangszahlen konnten abschnittsweise unter Annahme quasistationärer Verhältnisse Wärme- und Stofftransport an die Reifschicht berechnet werden.

Aus dem Vergleich der rein theoretisch berechneten mit den experimentell ermittelten Luftzustandsänderungen konnte abgeleitet werden, dass

- die Wärmeübergangskoeffizienten Luft/Reifoberfläche durch die Schaffung neuer Oberfläche, d.h. das Fortschreiten der Reifwaldwachstumsfront stark erhöht werden und ausserdem

- eine Abweichung von der einfachen Analogie zwischen Wärme- und Stoffübertragung im Sinne eines starken Ueberwiegens des Stofftransportes bestehen muss.

Die modifizierte Modellrechnung mit den beiden entsprechenden aus den gemessenen Luftzustandsänderungen ermittelten Korrekturfunktionen  $k_\alpha$  und  $\bar{k}_\beta$  ergab eine gute Uebereinstimmung zwischen den theoretisch und experimentell bestimmten Reifprofilen und Bereifungskennwerten.

Abstract

The aim of this thesis is to examine the frost formation on air-coolers with simple geometric parameters.

First of all, the experimental set-up, an air-conditioned wind-tunnel, has been built. The possibility to produce well-defined climatic conditions is essential to get observations under strictly steady state (this thesis) as well as transient (future thesis) air-flow conditions. An automatic data-acquisition and control unit combined with an appropriate data storage method allows to work up and interpret all measured parameters simultaneously.

With the help of two flat parallel plates cooled to constant temperature it is possible to simulate and observe the frost formation in such a channel. Due to the chosen control-concept the experiments bear meaningful data even for the start up phase.

The process of frost formation shows the same typical development over the total range of experimental parameters: darkening of the cooling plates, formation of isolated macrocrystal clusters (clump of trees), then building up of finely structured frost-lenses (brushwood) and finally growth of a uniform frost layer (frost forest). Exact analysis of the mean frost density shows that at first a very dense and smooth ice layer is deposited. Of special concern is moreover the progress of the frost forest front in air flow direction as it divides the cooled surface into a zone with nearly unchanged and a zone of highly enhanced specific surface.

Quantitative results about two phenomena can be given:

- the development of the frost layer thickness in the entrance region is independent of the spacing between the plates

- the density of the first frost forest is about  $\rho_{R,0} \approx 75 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  over the whole range of parameters.

A numerical calculus, based on theoretically determined drag coefficients, yields the total air-flow pressure drop for any observed frost profile-over-time behaviour. The thus obtained results describe the measured values with considerable accuracy.

The final part consists of a theoretical model describing the characteristics of frost formation in time. By defining the morphology of the frost layer in the first place, its heat conductivity can be calculated. Out of flow theories follow heat and (by analogy) mass transfer coefficients. Consequently, heat and mass transfer are determined section by section assuming quasi steady state conditions in the respective balance sheets.

The comparison of theoretically calculated and experimentally observed changes of state in the air leads to two main conclusions:

- the heat transfer rate (air/frost surface) highly increases with progressing frost forest front
- it is found that the mass transfer rates are considerably higher than predicted by the common heat and mass transfer analogy.

A modified model calculus, correlating the theory to the observed changes of state, uses two new heat and mass transfer coefficients and gives characteristic values as well as profiles of frost formation conform to those in the experiments.