

Bericht Phase 1 zum Transferprojekt des Bremen Research Cluster for Dynamics in Logistics Erfassung lokaler Temperaturabweichungen in Transportmitteln

Erstellung von Testdatensätzen für den „intelligenten Container“

Reiner Jedermann und Walter Lang

Technical Report SFB637-B6-07-4 (2007)

1. Motivation und Ziele

Die Haupteinflussfaktoren auf die Haltbarkeit von Lebensmitteln sind Temperatur und Zeit. Telemetrische Überwachungssysteme für Transportfahrzeuge und Auflieger beschränken sich jedoch weitgehend auf die Messung einer mittleren Temperatur oder Messung an nur wenigen Punkten (Zu- und Rückluft Kühlaggregat, maximal 3 oder 4 Sensoren je Fahrzeug). Eine genauere Vorhersage von möglichen Qualitätsveränderungen während des Transportes erfordert jedoch eine Erfassung der lokalen Temperaturverteilung. Von den beteiligten Unternehmen wurde bestätigt, dass räumliche begrenzte Bereiche mit erhöhter Temperatur, so genannte Wärme- oder Reifenester zu erheblichen Problemen beim Transport verderblicher Waren führen können.

Ziel dieser Studie war es, anhand von Feldtests ein Maß für die in der Praxis auftretenden Temperaturabweichungen zu erhalten und Angaben aus der Literatur zu belegen. Hierzu wurde eine größere Anzahl von Temperaturschreibern, so genannten Datenloggern im Fahrzeug oder Container montiert. In Vortests wurde die Genauigkeit dieser miniaturisierten Geräte überprüft. Die Messergebnisse wurden in Testdatensätzen zur Weiterentwicklung des im Sonderforschungsbereiches SFB637 entwickelten ‚intelligenten Containers‘ (www.intelligentcontainer.com) zusammengestellt. Die Auswirkungen der gemessenen Temperaturabweichungen auf die Warenqualität wurden exemplarisch durch Anwendung eines Reifungsmodells für Früchte und Gemüse überprüft.

2. Ergebnisse

In der zur Vorbereitung des Projektes durchgeführten Literaturrecherche konnten Artikel von 5 Gruppen zu räumlichen Temperaturprofilen gefunden werden ([Wild05], [Mou04], [Rod07], [Punt05] und [Tan03]). Es wird übereinstimmend von deutlichen Temperaturabweichen über die Länge des Transportmittels von 5 °C oder mehr berichtet.

Die Umsetzung der beantragten Arbeitspakete wird im Folgenden beschrieben. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf dem Vergleich von Datenloggern verschiedener Herstellung und der Durchführung der Feldtests.

2.1. Vortests mit Datenloggern verschiedener Hersteller in einer Klimakammer

In der Klimakammer des IMSAS wurde zunächst ein Vortest von miniaturisierten Datenlogger verschiedener Hersteller durchgeführt mit dem Ziel die Herstellerangaben zu Genauigkeit / Messtoleranzen zu überprüfen. Gleichzeitig sollte die praktische Handhabung beim Auslesen der Daten erprobt werden. Es standen Datenlogger von drei verschiedenen Herstellern zur Verfügung. Zwei der Logger übermitteln die Daten über eine HF-RFID Schnittstelle. Ein weiterer Typ verwendet ein elektrisches Interface. Datenlogger mit einer UHF-RFID Schnittstelle standen während der Projektlaufzeit noch nicht zur Verfügung. Die Ergebnisse des Vergleichs und die ermittelten Werte für typische Toleranzen (Standartabweichung) sind in **Tabelle 1** zusammengefasst. Zur Aufzeichnung der Luftfeuchtigkeit ist eine besondere Version des iButtons erhältlich. Nach Angaben des Herstellers der

Klimakammer ist es aber kaum möglich, eine Messgenauigkeit von besser als $\pm 2.5\%$ zu erzielen. Die Feldtests wurden mit den TurboTag und den iButton Datenloggern durchgeführt. Beide bieten eine recht gute Genauigkeit von besser als $\pm 0.2\text{ °C}$. Eine Nachkalibrierung war daher nicht notwendig. Eine ausführlichere Darstellung findet sich in Abschnitt I in [Jed07b].

Tabelle 1: Vergleich der technischen Daten und der Genauigkeit verschiedener Datenloggertypen

Type	KSW	TurboTag	iButton
Datenpunkte	700	700	4000
Auflösung	$\sim 0.3\text{ °C}$	$\sim 0.2\text{ °C}$	0.0625 °C
Gemessene Genauigkeit (Standardabweichung) $\pm\delta$	$\pm 0.4\text{ °C}$	$\pm 0.18\text{ °C}$	$< \pm 0.1\text{ °C}$
Schnittstelle	RFID	RFID	One-Wire
Preis	5-10 \$		40\$
Handhabung	+	++	-

2.2. Feldtests

Die Feldtests wurden im Zeitraum von September 2006 bis April 2007 bei den drei Kooperationspartnern durchgeführt. Dabei wurden bis zu 40 Datenlogger je Container bzw. Fahrzeug eingesetzt. Durch Vorprogrammierung der Logger war es möglich die Installation im Transportmittel auch durch nicht technisch geschultes Personal durchführen zu lassen. Zum Auslesen der Daten wurden die Logger nach Abschluss der Fahrt an die Universität Bremen zurückgeschickt.

2.2.1. Seetransporte

Von den beiden Partnern Gildemeister und Carl Schröter Assekuranzkontor wurden Container aus Übersee (Chile und Hongkong) nach Europa (England und Bremen) mit Datenloggern an den Wänden und in der Ware ausgestattet. Neben die TurboTags wurden dabei die iButtons verwendet, da sie durch die höhere Speicherkapazität von 4000 Punkten eine längere Aufzeichnungsdauer ermöglichen.

Während der Projektlaufzeit konnte ein weiterer Kontakt zur Bremer Firma CHS CONTAINER Handel GmbH genutzt werden, um einen Tiefkühlcontainer auf der Fahrt von Bremen nach Nigeria zu überwachen.

Beim Entladen der Ware gingen jedoch zahlreiche Datenlogger verloren. Es konnte daher nur eine generelle Abschätzung der Temperaturabweichung ermitteln werden, aber kein räumliches Profil erstellt werden. Während eines Tiefkühltransportes wurde die höchste Abweichung mit $5,0\text{ °C}$ gemessen.

Tabelle 2: Gemessene Temperaturabweichung in Seetransporten

Strecke	Zeitraum	Ware	Abweichung über Containerlänge	Besonderheiten
Bremen nach Nigeria	25.11.06 - 19.12.06	Tiefkühl (-18 °C)	$5,0\text{ °C}$	Höchste Temperatur Unten in der Mitte. Schlechtere Temperaturverteilung durch Zufuhr der Luft von Oben, keine Luftkanäle im Fussboden.
San Antonio (Chile) nach Felixtowe (England)	24.02.07 - 21.03.07	Früchte (0 °C)	$1,8\text{ °C}$	Spitzen während der Abtauvorgänge des Kühlaggregates von $4,5\text{ °C}$ (Decke Tür) bis 15 °C (Decke hinten). Gleichmäßigere Verteilung durch Zufuhr der Kühlluft durch Kanäle im Fussboden.
Hongkong nach Bremen	13.10.06 - 12.11.06	Nicht gekühlt	$2,6\text{ °C}$	Nach passieren des Suez-Kanals Abfall des Mittelwertes aller Logger von 33 °C auf 31 °C

2.2.2. Straßentransporte

In Kooperation mit dem Partner Rungis Express wurden entsprechende Versuche für Straßentransporte durchgeführt. Da die Lieferfahrzeuge an nächsten Tag zum Lager in Meckenheim zurückkehren und dort von entsprechend eingewiesenem Personal in Empfang genommen werden, war die Anzahl der verlorenen Datenlogger wesentlich geringer. Die Fahrzeuge sind in drei Temperaturzonen eingeteilt für Tiefkühlwaren, Fisch und Fleisch sowie Gemüse. Es wurden insgesamt 10 Versuchsfahrten durchgeführt.

Tabelle 3: Übersicht der Versuche für Straßentransporte

Anzahl	Zeitraum	Versuch
2	Sep. und Okt. 2006	Profil aller 3 Kammern mit je 40 Loggern in zwei Fahrzeugen, dabei in einem Versuch Aufzeichnung der Feuchtigkeit mit 10 Loggern im Gemüseabteil
8	Feb. bis April 2007	Versuche mit Schwerpunkt auf dem mittleren Abteil in je zwei Fahrzeugen. Es wurden 40 Logger je Abteil eingesetzt. Während der Fahrt wurde in einem Fahrzeug der Sollwert verändert von 0 °C (Fisch und Fleisch) auf -29 °C (Tiefkühlwaren)

Weiterhin fand ein Austausch mit der Bremer Zentrale von Kraft Foods Deutschland GmbH statt, die derzeit vergleichbare Versuche mit den KSW Datenloggern durchführt.

2.3. Zusammenstellung und Auswertung der Daten

Für die aufgezeichneten Daten der Straßentransporte wurde eine detaillierte Auswertung durchgeführt. Das Auftreten von lokalen Temperaturabweichungen hat sich dabei bestätigt. Es traten Abweichungen von mehr als 10 °C im Tiefkühlmodus und 4 °C im Plus-Bereich auf [Abschnitt II in Jed07b].

2.3.1. Zeitlicher Verlauf der Temperatur

Bild 1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperatur an verschiedenen Messpunkten im mittleren Abteil bei einem eingestellten Sollwert von +1 °C. Durch die Ein- und Ausschaltvorgänge des Kühlaggregates treten starke Schwankungen auf. Direkt im Luftstrom des Aggregates kann die Temperatur kurzzeitig auf unter -10 °C abfallen. Zwischen verschiedenen Transportboxen wurde Unterschiede von etwa 2 °C gemessen.

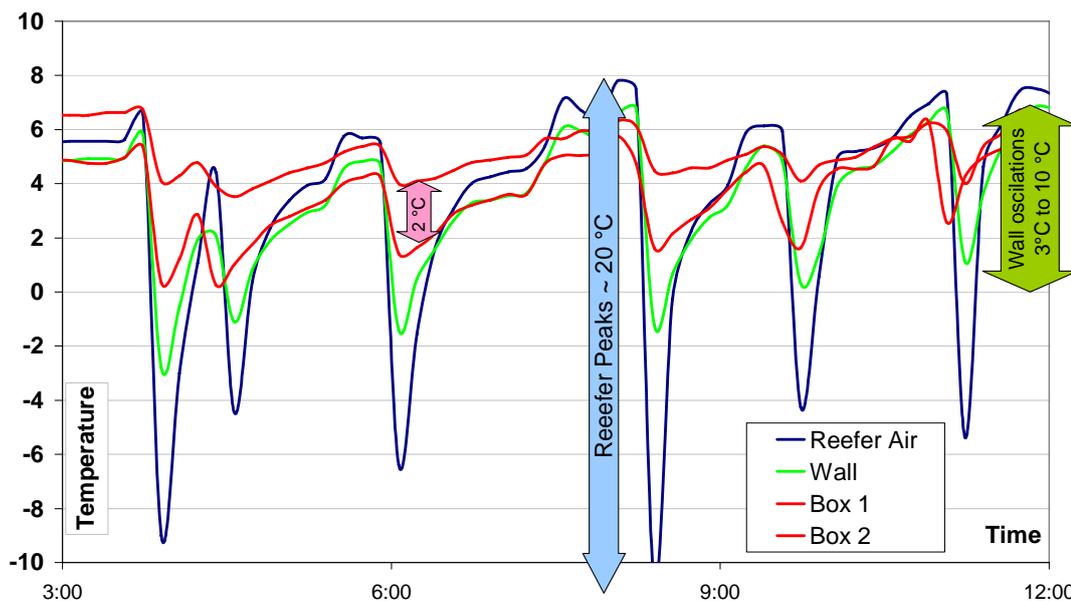


Bild 1: Zeitlicher Verlauf der Temperatur: Luftstrom des Kühlaggregates (blau) an den Wänden (grün) und innerhalb der Boxen.

2.3.2. Fisch und Fleisch Abteil

Zur räumlichen Darstellung der Messwerte wurde eine entsprechende Funktion in MATLAB programmiert. **Bild 2** zeigt die Position und den zeitlichen Mittelwert der Temperatur der Messpunkte im mittleren Abteil. Der Mittelwert aller Logger auf der Seite des Kühlaggregates war in allen Versuchen etwa 2 °C kälter als der der gegenüberliegenden Seite.

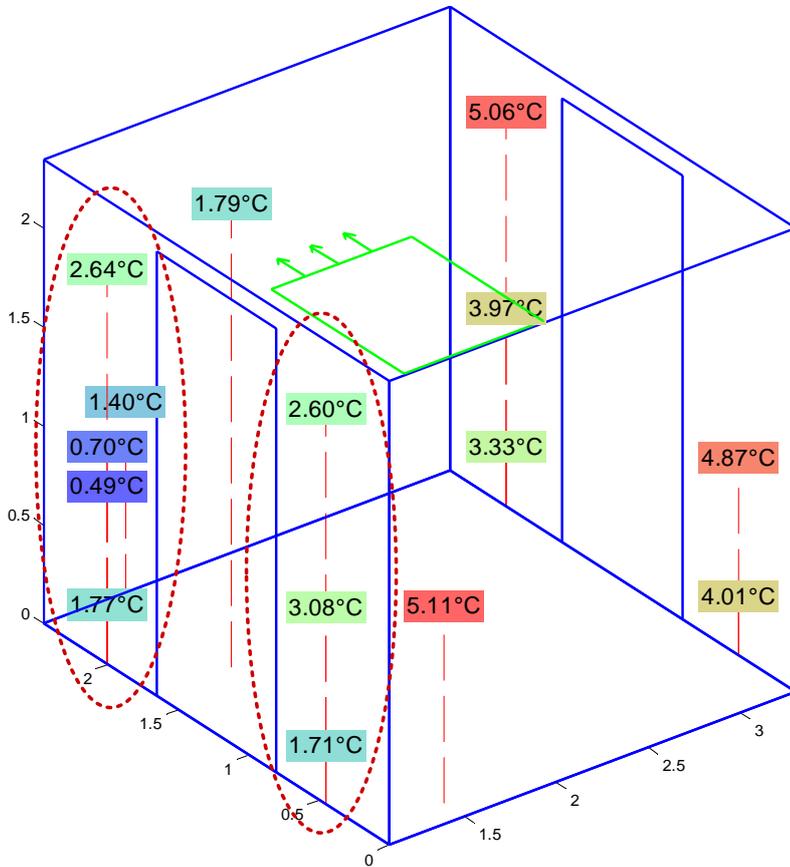


Bild 2: Zeitlicher Mittelwert der Temperatur an verschiedenen Positionen des mittleren Abteils (Fisch und Fleisch) und Position des Kühlaggregates (grün). Längenangaben in Metern.

2.3.3. Tiefkühlmodus

Bild 3: Interpolierter Verlauf der Temperatur im Tiefkühlmodus, 5 Stunden nach Änderung des Sollwertes von 0 °C auf -29 °C.

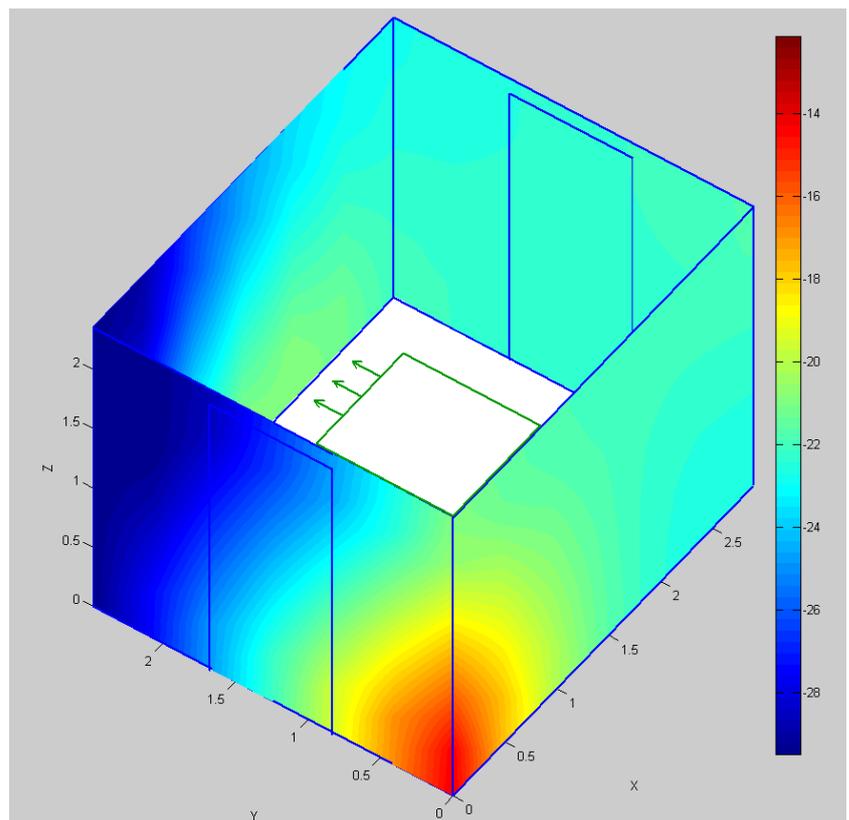


Bild 3 zeigt eine Interpolation der 40 zur Verfügung stehenden Messpunkte über die Seitenwände des Abteils. Der Sollwert von -29 °C wurde nur direkt in der Richtung des Luftstromes des Kühlaggregates erreicht. Die wärmsten Werte wurden unterhalb des Aggregates gemessen. Problematisch ist insbesondere, wenn in diesen Bereich nur mangelhaft vorgekühlte Ware eingebracht wird, da Temperaturdifferenzen aufgrund der mangelnden Luftzirkulation dort über mehrere Stunden bestehen bleiben.

2.3.4. Feuchtigkeit

Für die relative Luftfeuchtigkeit wurden typischerweise Werte zwischen 80% und 100% in den Auslieferungsfahrzeugen gemessen. Die höchsten Werte traten in der Nähe des Kühlaggregates auf.

2.3.5. Anwendung im SFB 637

Aus den Messungen wurde Testdatensätzen zum Training neuronaler Netze extrahiert. Diese werden von einem Doktoranden der Graduate School zur Entwicklung eines Fehleridentifikationssystems (FDI) für Sensornetze verwendet [Jab07].

2.4. Relation zu Reifungsmodellen

Um die Auswirkungen der gemessenen Temperaturabweichungen auf die Warenqualität abzuschätzen wurde eine Simulation mit einem mathematischen Model zur Vorhersage der Resthaltbarkeit (Shelf-Life oder Keeping Quality) durchgeführt. Diese berechnen anhand des Gesetzes von Arrhenius zur Temperaturabhängigkeit chemischer Reaktionen den Verlust an Haltbarkeit je Zeiteinheit. Das Model wurde mit den Parametern für ‚Feldsalat‘ auf den Temperaturverlauf der Transportbox mit dem geringsten ($8,2\text{ °C}$) und dem höchsten ($10,3\text{ °C}$) zeitlichen Mittelwert angewandt [Abschnitt III in Jed07b]. Der Temperaturunterschied führt dazu, dass die Qualität der Ware in der wärmeren Box einen Tag früher, d.h. nach $2\frac{1}{2}$ anstatt nach $3\frac{1}{2}$ Tagen unter den kritischen Grenzwert fällt.

2.5. Anforderungsprofil Sensornetzwerk

Abgesehen von dem Einfluss der Position des Kühlaggregates ist die Temperaturverteilung kaum vorhersehbar. Um ein genaues Profil zu ermitteln und die Haltbarkeit individuell für Versandteinheiten berechnen zu können (Paletten oder Boxen) ist eine höhere Anzahl von Sensoren notwendig. Insbesondere ist es nicht möglich, durch eine Mittelwertberechnung der Sensoren an der Decke und in Fußbodennähe, die zwischen liegenden Sensoren zu ersetzen. Bei den rot eingekreisten Gruppen in Bild 2 zeigt der Sensor in der Mitte vorne den höchsten und hinten den geringsten Wert der jeweiligen Gruppe. Für die Transportsituation eines teilweise bepackten Transportfahrzeuges ist daher mindestens 1 Sensor je Meter erforderlich, um lokale Maxima der Temperaturverteilung zu erfassen.

2.6. Veröffentlichung

Die Ergebnisse der Studie wurde auf der RFID live Conference / Academic Convocation 2007 in Orlando [Jed07b] sowie den Treffen der CoolChainAssociation in Schweden [Jed06] und Frankreich [Jed07c] vorgestellt. Eine weitere interne Präsentation fand für die Mitglieder der CoolChainGroup in Bremen statt [Jed07a]. Für das IEEE Systems Journal wurde ein Artikel eingereicht [Jed08].

- [Jab07] Jabbari, A.; Jedermann, R.; Lang, W.: Application of Computational Intelligence for Sensor Fault Detection and Isolation. In: CESSE 2007: 22. International Conference on Computer, Electrical, and Systems Science, and Engineering. Prague, Czech Republic, 2007
- [Jed06] Jedermann, R.: Project Intelligent Container. CoolChainAssociation Workshop 'Temperature Measurements - When, Where and How?', Knivsta, Sweden, 13th and 14th November 2006.
- [Jed07a] Jedermann, R.: The temperature profile of delivery trucks; Measurements at Rungis Express. CCG (Cool Chain Group) Global Management Meetings, Atlantic Hotel Bremen, 12.02.07 (Internal Meeting)

- [Jed07b] Jedermann, R.; Lang, W.: Semi-passive RFID and beyond - steps towards automated quality tracing in the food chain. In: Fifth RFID Academic Convocation. Orlando, Florida, 2007
- [Jed07c] Jedermann, R.: Automated handling of temperature data on tag-level. In: Cool Chain Association Workshop and Annual General Meeting: "Future Changes to today's Consumer Demands -even more demands for quality in the unbroken cool chain-", 23 May 2007 - 25 May 2007, Vetry, France
- [Jed08] Jedermann, R.; Lang, W.: RFID and sensor systems for tracking quality in the cool chain (IEEE Systems Journal), Eingereicht 30.04.2007

2.6.1. Ergebnisse der Literaturrecherche

- [Mou04] Moureh, J.; Flick, D.: Airflow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets In: International journal of refrigeration, Bd. 27 (2004), 5, S. 464-474
- [Punt05] Punt, H. ; Huysamer, M.: Supply Chain Technology and Assessment - Temperature Variances in a 12 m Integral Reefer Container Carrying Plums under a Dual Temperature Shipping Regime. In: Acta horticulturae, (2005), 687, S. 289-296.
- [Rod07] Rodriguez-Bermejo, J. et al., Thermal study of a transport container, Journal of Food Engineering, 80 (2), May 2007, pp. 517-527 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.06.010>
- [Tan03] Tanner, D.J.; Amos, N.D.: Heat and Mass Transfer - Temperature Variability during Shipment of Fresh Produce. In: Acta horticulturae, (2003), 599, S. 193-204.
- [Wild05] Y. Wild, R. Scharnow and M. Rühmann, Containerhandbook, Vol. 3, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV), Berlin, 2005

2.7. Liste der Partner

Fördergeber	Bremen Research Cluster for Dynamics in Logistics
Ausführendes Institut	IMSAS, Institute for Microsensors, -actuators and -systems
Partner 1	CCG Cool Chain Group Holding AG und Rungis Express AG
Partner 2	Carl Schröter GmbH & Co. Assekuranzkontor
Partner 3	Seehafen-Transportkontor Gildemeister GmbH