

Institut für Landtechnik
Professur für Haushalts- und Verfahrenstechnik
Prof. Dr. rer. nat. Rainer Stamminger

**Modelling of domestic refrigerators' energy consumption under real life
conditions in Europe**

I n a u g u r a l – D i s s e r t a t i o n

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 23.05.2011

von

Jasmin Geppert

aus

Saarbrücken

Referent:	<u>Prof. Dr. rer. nat. Rainer Stamminger</u>
Korreferent:	<u>PD. Dr.-Ing. Judith Kreyenschmidt</u>
Tag der mündlichen Prüfung:	<u>27.06.2011</u>
Erscheinungsjahr:	<u>2011</u>

Schriftenreihe der Haushaltstechnik Bonn

Band 2/2011

Jasmin Geppert

**Modelling of domestic refrigerators' energy
consumption under real life conditions in Europe**

D 98 (Diss. Universität Bonn)

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Bonn, Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0393-2

ISSN 1863-320X

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

Modelling of refrigerators' energy consumption under real life conditions in Europe

In recent decades, energy and resource savings have become increasingly important, not only in the industrial, but also the residential sector.

As one of the largest energy users in private homes, domestic refrigerators and freezers were among the first appliances to be targeted for energy efficiency improvements. With the aim of encouraging manufacturers to develop and produce more efficient appliances, the European Energy Label was introduced in the mid-nineties. However, the energy use of refrigerators does not only depend on technical components and features. Especially the using conditions in private homes are of a decisive influence.

Thus, the present study has been conducted to test the sensitivity of refrigerators' energy consumption to various usage conditions within realistic ranges, which have been determined by means of two empirical studies. Key information gathered from the experiments were used as a base for the development and validation of a simplified model that allows predicting the energy consumption of refrigerators in use.

The practical experiments were performed under controlled laboratory conditions with four different refrigerators with an A⁺ or A⁺⁺ energy efficiency rating (two statically cooled built-in fridge-freezers, one dynamically cooled refrigerator and one statically cooled refrigerator). The investigations revealed that the ambient temperature has the greatest impact on a refrigerator's energy consumption, followed by thermostat setting and heat load by insertion of warm items. The refrigerators' load under static conditions as well as the number of door openings have almost no impact on energy consumption.

The modelling methodology follows a first-principle approach adjusted by experimental data. When compared to experimental results, model predictions show a reasonable agreement for the whole range of investigated conditions.

Kurzfassung

Modellierung des Energieverbrauchs von Kühlgeräten unter verbrauchernahen Bedingungen in Europa

In den letzten Jahrzehnten haben die Themen Energie- und Ressourceneinsparung sowohl im Industrie- als auch im Wohnbereich immer mehr an Bedeutung gewonnen. Zu den größten Energieverbrauchern im Privathaushalt zählen Kühl- und Gefriergeräte. Daher gab und gibt es Anstrengungen, die Energieeffizienz dieser Geräte zu verbessern. Mitte der Neunziger Jahre wurde das EU-Energie-Etikett für Kühl- und Gefriergeräte unter anderem mit dem Ziel eingeführt, die Entwicklung und Produktion effizienterer Geräte seitens der Hersteller durch Wettbewerbsvergrößerung voranzutreiben. Der Energieverbrauch der Geräte ist jedoch nicht nur von den eingebauten technischen Komponenten und der Bauart abhängig, sondern wird entscheidend von der jeweiligen Nutzung beeinflusst.

Daher war es Ziel der vorliegenden Arbeit, den Einfluss verschiedener Nutzungsfaktoren auf den Energieverbrauch von Kühlgeräten innerhalb realistischer Grenzen zu testen, die mittels zwei empirischer Studien ermittelt wurden. Auf Grundlage der experimentellen Daten wurde ein Modell entwickelt und validiert, welches die Vorausberechnung des Energieverbrauchs von Kühlgeräten in Nutzung ermöglicht.

Die Laborexperimente wurden unter kontrollierten Bedingungen mit vier verschiedenen Geräten der Energieeffizienzklasse A⁺ und A⁺⁺ (zwei statisch gekühlte Einbau-Kühl-Gefrier-Kombinationen und jeweils ein Kühlgerät mit dynamischer und statischer Kühlung) durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Umgebungstemperatur den weitaus größten Einfluss auf den Energieverbrauch von Kühlgeräten ausübt, gefolgt von der Innentemperatureinstellung und dem Wärmeeintrag durch Lebensmittel. Der Einfluss von Befüllungsgrad unter sonst statischen Bedingungen sowie von Türöffnungen ist hingegen als gering zu bewerten.

Der Modellansatz basiert auf thermodynamischen Grundlagen und wurde mit Hilfe experimenteller Daten angepasst. Ein Vergleich der vorausberechneten Energieverbräuche mit den gemessenen Werten zeigt eine gute Übereinstimmung für den gesamten untersuchten Bereich.

Content

1	Introduction.....	1
2	Theoretical background	3
2.1	Energy consumption in Europe	3
2.2	Design and functional principle of refrigerators	4
2.2.1	The reversed Carnot cycle	5
2.2.2	The vapour-compression refrigeration cycle	7
2.3	Domestic refrigerators' energy efficiency standards and labels	10
2.3.1	Test procedures	12
2.3.2	Test standard versus actual energy consumption.....	16
2.4	Consumers' handling and practices in home refrigeration	17
2.4.1	Food shopping habits	18
2.4.2	Internal refrigerator temperatures	19
2.4.3	Door openings.....	22
2.4.4	Ambient/ room temperature.....	23
2.4.5	Filling level.....	24
2.5	Impact of consumer behaviour on refrigerators' energy consumption.....	24
2.5.1	Room/ ambient temperature.....	25
2.5.2	Compartment temperature	26
2.5.3	Door openings	27
2.5.4	Storage of food.....	28
2.5.5	Filling level	29
3	Objective	30

4	Material and Methods	31
4.1	Empirical studies.....	32
4.1.1	Online survey	32
4.1.2	In-home study	34
4.1.2.1	Temperature survey	34
4.1.2.2	Diary surveys	34
4.1.2.3	Pictures.....	35
4.1.3	Data analysis	35
4.2	Determination of actual conditions and consumer behaviour.....	37
4.3	Laboratory experiments.....	41
4.3.1	Experimental set-up	41
4.3.2	Design of experiments	46
4.3.2.1	Experimental series under static conditions	47
4.3.2.2	Experimental series under diurnal ambient conditions.....	47
4.3.2.3	Experimental series under dynamic conditions	49
4.3.2.4	Experiments testing the influence of door openings	50
4.3.3	Analysis of experimental data.....	51
4.4	Model development.....	54
5	Results	59
5.1	Online survey.....	59
5.1.1	Ambient temperatures.....	59
5.1.2	Internal temperature adjustment	61
5.1.3	Door openings.....	62
5.1.4	Estimated use of refrigerator's capacity	63
5.1.5	Placement of hot food	64
5.2	In-home study.....	65
5.2.1	Compartment temperatures.....	66

5.2.2	Food shopping behaviour.....	67
5.2.3	Observed use of refrigerator’s capacity.....	71
5.3	Laboratory experiments.....	73
5.3.1	Experimental series under static conditions	73
5.3.2	Experimental series under diurnal ambient conditions.....	79
5.3.3	Experimental series under dynamic conditions	83
5.3.4	Experiments concerning the effect of door openings	87
5.4	Results of the model validation.....	89
6	Discussion.....	95
6.1	Characterisation of real life conditions with regard to domestic refrigerators.....	95
6.2	Effect of different factors on refrigerators’ energy consumption	100
6.3	Application of the simulation model and its potentials and limitations ..	104
6.4	Further findings deduced from the present work	107
7	Conclusion	109
	References	113
	List of abbreviations	130
	List of figures.....	133
	List of tables.....	136

Acknowledgements

Curriculum Vitae