

Landbauforschung

*Applied Agricultural
and Forestry Research*

Vol. 65
No.2 · 06.2015



Landbauforschung

Landbauforschung *Applied Agricultural and Forestry Research* ist eine wissenschaftliche Zeitschrift, in der Forschungsergebnisse zu gesellschaftlich relevanten Themen veröffentlicht werden, die einen Bezug zur Landwirtschaft, zur Forstwirtschaft und zur ländlichen Entwicklung aufweisen. Die Zeitschrift ist damit explizit Disziplinen übergreifend ausgerichtet.

Veröffentlicht werden insbesondere anwendungsorientierte wissenschaftliche Beiträge, die interdisziplinär angelegt sind oder die ausgeprägte Bezugspunkte zu anderen Fachdisziplinen aufweisen. Der geographische Fokus der Zeitschrift liegt auf Deutschland und Europa. Die Sprache der Beiträge ist deutsch oder englisch. Alle Beiträge unterliegen einer doppelt anonymen Begutachtung (double-blind peer review).

Landbauforschung *Applied Agricultural and Forestry Research* wird vom Thünen-Institut in Braunschweig herausgegeben. Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren und Autorinnen verantwortlich. Eine Haftungsübernahme durch die Redaktion erfolgt nicht.

Mit der Einsendung von Manuskripten geben die Verfasser/Verfasserinnen ihre Einwilligung zur Veröffentlichung. Die von den Autoren/Autorinnen zu beachtenden Richtlinien zur Einreichung der Beiträge sind unter www.ti.bund.de/de/infothek/publikationen/landbauforschung/ oder bei der Geschäftsführung erhältlich.

Als Printausgabe erscheinen vier Hefte pro Jahr. Beiträge, die noch keinem bestimmten Heft zugeordnet sind, werden als Online First – Version veröffentlicht.

Indexiert in: CAB International, Science Citation Index Expanded, Current Contents – Agriculture, Biology & Environmental Sciences, Scopus, Web of Science.

Herausgeber
Johann Heinrich von Thünen-Institut

Schriftleitung
Prof. Dr. Andreas Bolte,
Prof. Dr. Peter Weingarten

Geschäftsführung
Dr. Matthias Rütze
Tel. +49 (0) 40 - 73962 247
Leuschnerstraße 91
21031 Hamburg, Germany
landbauforschung@ti.bund.de
www.ti.bund.de

Grafikdesign und Satz
Karin Tamoschat-Depolt, Thünen-Institut

Fotos Umschlagseite
Katja Seifert, Thünen-Institut (2),
Michael Welling, Thünen-Institut (1)

ISSN 0458-6859

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

Alle Rechte vorbehalten.

Applied Agricultural and Forestry Research

Landbauforschung *Applied Agricultural and Forestry Research* is a scientific journal, concerning the latest research results of socially relevant issues related to agriculture, forestry and rural development. The journal is targeted explicitly to interdisciplinary topics.

Particularly welcome are application-oriented scientific contributions with an interdisciplinary approach or with a close connection to other research areas. The geographical focus of the journal is Germany and Europe. Articles may be written in English or German. All articles are subject to a double-blind peer review.

Landbauforschung *Applied Agricultural and Forestry Research* is published by the Thünen Institute with headquarters in Brunswick, Germany. Authors are responsible for the content of their articles. The publishers are not liable for the content.

With the submission of a manuscript, the authors grant permission for publication. The guidelines for the submission of manuscripts can be found under www.ti.bund.de/en/infothek/publikationen/landbauforschung/ or obtained from the publishers.

The print edition is published quarterly. Articles not yet assigned to a specific issue are available online ("Online First")

Indexed in: CAB International, Science Citation Index Expanded, Current Contents – Agriculture, Biology & Environmental Sciences, Scopus, Web of Science.

Publisher
Johann Heinrich von Thünen Institute

Editor in Chief
Prof. Dr. Andreas Bolte,
Prof. Dr. Peter Weingarten

Managing Editor
Dr. Matthias Rütze
Phone +49 40 - 73962 247
Leuschnerstraße 91
21031 Hamburg, Germany
landbauforschung@ti.bund.de
www.ti.bund.de

Graphic Design and Typesetting
Karin Tamoschat-Depolt, Thünen Institute

Photos cover pages
Katja Seifert, Thünen Institute (2),
Michael Welling, Thünen Institute (1)

ISSN 0458-6859

Printed on FSC-certified paper

All rights reserved.

Inhalt
Content

- Dóra Szalay, Hitoshi Fujiwara, and Michael Palocz-Andresen
Using biodiesel fuel for gas turbine combustors
65 Einsatz von Biodieselskraftstoff für Gasturbinen
- Marcus Clauß
Particle size distribution of airborne micro-organisms in the environment – a review
77 Partikelgrößenverteilung von luftge-tragenen Mikroorganismen in der Umwelt – Ein Review
- Ulrich Dämmgen, Hans-Dieter Haenel, Claus Rösemann, Jim Webb, Wilfried Brade, and Ulrich Meyer
Modelling excretion rates of German dairy heifers
101 Modellierung der Ausscheidungs-raten deutscher Aufzucht-rinder
- Ralf Bussemas und Friedrich Weißmann
Zum Verhalten laktierender Sauen und zur Lebendmasseentwicklung der Ferkel in Einzel- oder Gruppenhaltung mit drei oder sechs Würfen im ökologischen Landbau
119 Behaviour of lactating sows and live weight development of piglets in organic agriculture with regard to single housed vs. group housed sows by three or by six
- Elisabeth Kindler
Analyse zur erweiterten Nachhaltigkeitsberichterstattung deutscher Länderforstbetriebe
131 Analysis of extended sustainability reporting by state forestry services in Germany

Using biodiesel fuel for gas turbine combustors

Dóra Szalay*, Hitoshi Fujiwara**, and Michael Palocz-Andresen*

Abstract

Biodiesel fuel (BDF) mainly refined from vegetable oil has been applied to diesel cars for more than ten years. The objective of this study is to widen the applicability of BDF to other areas to promote its production and consumption, and reducing emissions of carbon dioxide and diverting energy sources. Using BDF for gas turbine engines has various impacts on the environment and on economics, and requires a high quality of technical frame conditions. The combustion rig tests of a 20 MW gas turbine combustor at high load with two different fuels, a biodiesel fuel and a common petroleum diesel fuel, were performed to investigate the needed technical feasibility. The environmental impact was also investigated through the detailed measurement of the exhaust gas of the combustor. The results show that BDF can be technically a promising alternative fuel for land-based, marine-based and aero-space-based gas turbine engines, however it is very expensive compared with conventional fuels.

Keywords: *biodiesel fuel, environment protection, gas turbine engine, alternative fuel, exhaust gas*

Zusammenfassung

Einsatz von Biodieselskraftstoff für Gasturbinen

Biodiesel (BDF) wird hauptsächlich aus Pflanzenöl hergestellt und wird als Dieselöl in Kraftfahrzeugen seit mehr als zehn Jahren verwendet. Diese Studie hat das Ziel gesetzt, die Anwendung von BDF auf andere Bereiche zu erweitern, um die Produktion und den Verbrauch zu fördern, die Kohlendioxid-Emissionen zu verringern und die Nutzung von alternativen Energiequellen zu ermöglichen. Der Einsatz von BDF für den Gasturbinenantrieb hat verschiedene Auswirkungen auf die Umwelt. Versuche an einer 20 MW Gasturbinen-Brennkammer bei hoher Last und mit zwei verschiedenen Brennstoffen, d.h. mit einem Biodieselskraftstoff und einem handelsüblichen fossilen Dieselskraftstoff wurden mit dem Ziel vorgenommen, die benötigte technische Machbarkeit zu untersuchen. Die Umweltbelastung wurde durch die detaillierte Messung der Abgasqualität in der Brennkammer untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass BDF technisch ein vielversprechender alternativer Kraftstoff sowohl für Gasturbinenriebwerke in der Kraftwerktechnik, als auch für die Luft- und die Schifffahrt ist, obwohl sie im Vergleich mit den herkömmlichen Kraftstoffen sehr kostspielig ist.

Schlüsselworte: *Biodiesel, Umweltschutz, Gasturbinenriebwerk, alternativer Kraftstoff, Abgas*

* University of West Hungary, H-9400 Sopron, Bajcsy-Zs. u. 4., Hungary

** Japan Aerospace Exploration Agency, 7-44-1 Jindaiji-higashi-machi, Chofu, Tokyo, Japan

1 Introduction

Global energy consumption is rapidly increasing due to the strong demand in developing countries. The annual increasing ratio reached 2.3 % in 2013. Today, fossil oil is the most dominant energy source making up 32.9 % of total global energy consumption (BP, 2014). However, the continuous long-term use of fossil oil may cause some serious issues such as global warming and the cost increase in the energy system. Moreover, fossil energy resources are regionally concentrated. According to the statistics, the supply is mostly dominated by the Middle Eastern countries, Russia, the United States and China. Of these, the United States and China not only supply a large amount of energy, but also consume a large amount as well.

The R/P (Reserves-to-production ratio) of fossil oil is currently considered to be between 40 to 80 years (BP, 2014; Wikipedia, 2014a; Worldometers, 2015; CNBC, 2011), depending on the development of oil mining, drilling and exploration technologies. Over the past decade, global proved reserves have increased by 27 % due to technological developments (BP, 2014), among which one of the most remarkable methods is shale mining technology in the United States. This technology is going to make the USA the world's leading oil-producing country in a few years' time. Figure 1 compares the relationship between the price of fossil oil and total global consumption in the last 10 years. It shows a clear trend of the increasing consumption with the increase in price; exceptions to this trend can be attributed to the temporal market and to various political reasons. One of the most remarkable exceptions is the recent "temporal" decrease in price, which is believed to be related to the strategy of oil producing countries against the rapid increase in the production of shale oil in the USA. However, this tendency will be recovered in a few years.

Moreover, global climate change due to the exploration for and consumption of fossil oil is an urgent issue which should be solved only from a global base with a sincere effort of cooperation from every country in the world.

Increasing the production and consumption of alternative fuels is of great importance to help solve the issues related to the worldwide consumption of fossil oil presented above. Both the diversity of energy sources and the preservation of the global environment have to be considered. Main tasks are:

1. technological developments must consider the increased utilization of wasted resources as a future feedstock
2. further technological innovations that will expand the use of the alternative energy to promote the production and consumption of bioliquids.

Biodiesel fuel (BDF) is usually made from natural fat, main components of which are fatty acid methyl esters (see Figure 8 and related descriptions below for the detailed chemical component analysis of BDF). BDF is one of the important biofuels owing to the advantage of its large potential of CO₂ emission reduction compared to the fossil oil. The average lower heating value of BDF is approximate 38 MJ/kg, which is only 10 % lower than that of usual petroleum diesel fuel (Mehta and Anand, 2009). Moreover, BDF can be refined from natural fat through a fairly simple chemical process, such as alkaline catalysed trans-esterification, which produces less amount of CO₂ through the refinery process, leading to a larger amount of CO₂ reduction evaluated through a life cycle analysis (LCA). The simple process also leads to the lower cost of production. BDF is therefore widely used for alternative fuel for diesel engines.

Biodiesel fuel can be produced not only in large industrial facilities, but also in small factories because of the fairly simple conversion process of waste cooking oils to BDF

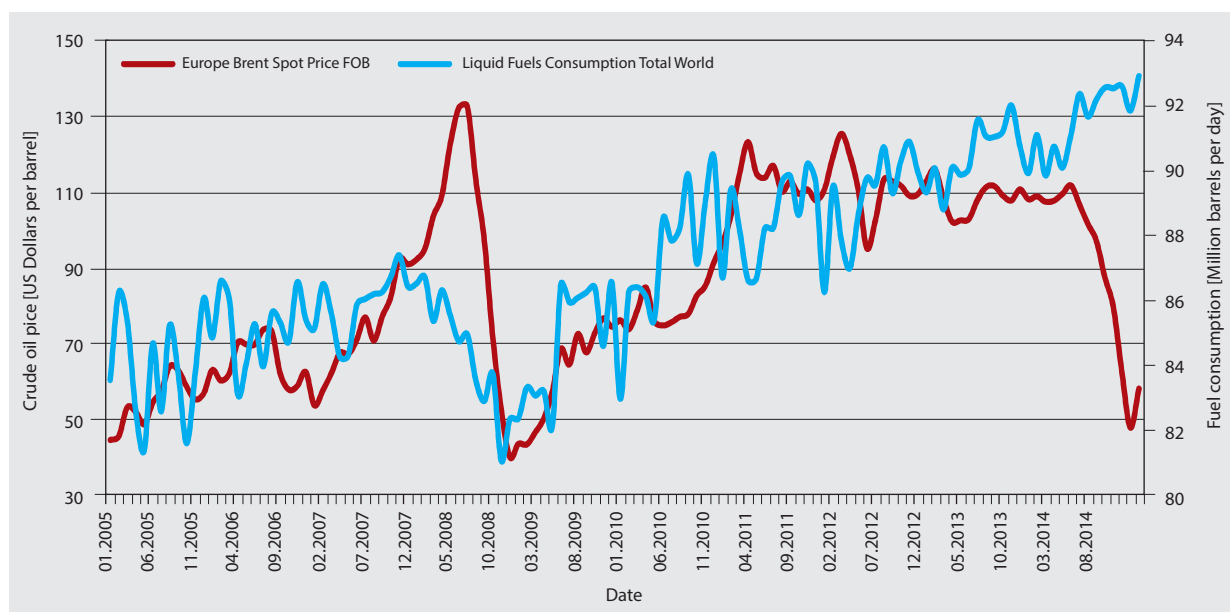


Figure 1
Relationship between pricing and using fossil fuels on the past 10 years (EIA, 2015a; EIA, 2015b)

through alkaline catalysed trans-esterification technology. The refinery process can be performed under atmospheric conditions in small scale plants with low initial investment, unlike Fischer-Tropsch and hydrocracking processes which need to be performed under high pressure conditions with special catalysts and hydrogen.

The possibility of use of BDF for land-based gas turbine engines is investigated in this study to widen the applicability of BDF.

BDF and its feed stocks could further be refined to alternative aviation fuel, specified as ASTM D7566, through the deoxidation and isomerization processes with the high pressure hydrotreatment which needs a large scale chemical plant. Currently, it needs some further research to convert fat and BDF to aviation fuel in a cost-effective way at distributed small scale plants, which is out of the scope of this study.

2 Availability of the feedstock of BDF

World biodiesel production was 24.7 million tons in 2013 which accounted for 22.6 % of total global biofuel production (Rapier, 2014). The leading producer countries and the main feedstock are presented in Table 1:

Table 1

Global biodiesel production and its main feedstock in 2013 (Budiman et al., 2013)

Country	Share of the total production [%]	Main feedstock
USA	14	Soybean oil
Brazil	11	Soybean oil
Indonesia	9	Palm oil
Germany	9	Rapeseed oil
France	8	Rapeseed oil
Other countries	49	Soybean oil

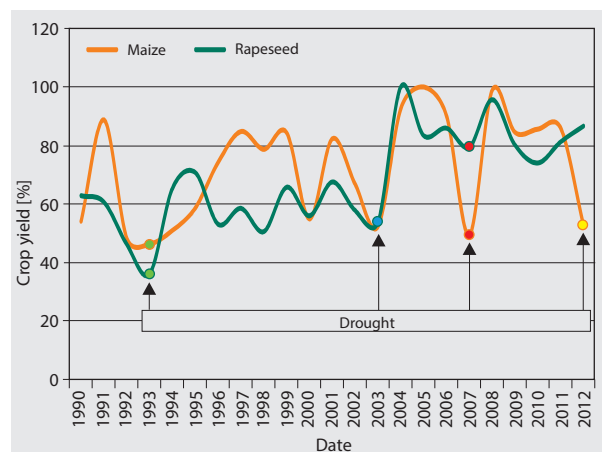


Figure 2

Impacts of climate change in the yield of bioliquid feedstock crops in Hungary compared to the highest yield year (KSH, 2012)

Figure 2 shows the fluctuations of maize and rapeseed production in Hungary. These fluctuations can be attributed to the weather and to market forces.

The use of oilseeds is growing rapidly today. For example, whereas one hundred years ago sunflower seeds were only considered food, they are now important feedstocks for BDF in Europe. Non-food crops, such as Camelina and Jatropha, have the advantage of diverting the conflict between food and energy though they are not currently successful in diverting it entirely because these energy crops often take away land meant for food crops. Therefore, on 28 April 2015, the European Parliament voted to approve new legislation, the "iLUC Directive", that limits the using food biomasses for energy production. Member States can meet the target of 10 % for renewables in transport fuels by 2020. There will be a cap of 7 % on the contribution of biofuels produced from food crops, and greater emphasis on the production of advanced biofuels from waste feedstocks (EBTP, 2015).

Another important feedstock of BDF is waste cooking oil. This might be categorized as the simple recycling of wasted energy carrier, but the total amount of this feedstock cannot be neglected as it could be a major feedstock for BDF, see Table 2. Currently, the collection systems for waste oil from cooking or from industrial production, has not yet been effectively constructed, not even in large cities. It is really disappointing that waste cooking oil containing much untapped energy is treated as nothing more than flammable garbage, and is burned thereby producing carbon dioxides. It is estimated that at least 70 % of the waste cooking oil in cities could be recovered, owing to the statistical data of gathering valuable metals like Aluminum (Diya'uddeen et al., 2012).

Table 2

Availability of waste cooking oil (WCO) in different countries (Shi and Zhang, 2014; JFS, 2011; GF, 2011; Chhetri et al., 2008)

Country	WCO [10 ³ t/year]	WCO [kg/capita]	Population [10 ⁶]
China	6580	4.9	1 351
USA	1400	4.5	319
EU	1000	2.0	508
Japan	400	3.1	128
South Africa	200	3.8	52

Currently is great demand the use of waste cooking oil. China's biodiesel production was 1.13 billion litres in 2014. China has 53 biodiesel plants, with total capacity estimated to be 4 billion litres. The lack of capacity utilization is attributed, in part, to a lack of large-scale collection of waste cooking oil (Voegelé, 2015). China implemented a trial biodiesel program in Hainan, but that trial program has been confined to only two counties since 2010, largely due to inconsistent supplies of feedstocks, mainly waste cooking oil (GAIN, 2013).

In the USA has also serious intention. In 2007 the Energy Independence and Security Act amended the Renewable Fuels Standards (RFS2), thereby setting a target of more than 136 billion litre of biofuels in 2022. At least 3.8 billion litre have to be advanced biodiesel with more than 50 % greenhouse gas savings compared to conventional biodiesel. On federal level the USA has introduced a tax credit for 1\$ per gallon for biodiesel from waste cooking oil (Spöttle et al., 2013).

The EU is the world's largest biodiesel producer. Biodiesel is also the most important biofuel in the EU and, on energy basis, represents about 80 % of the total transport biofuels market. Feedstocks for advanced biofuels (such as FAME from waste cooking oils) count double toward the overall renewable energy targets in order to initiate transition to biofuels with lower ILUC risks (GAIN, 2014).

3 Economic aspects

The most sensitive key factors for the economic feasibility of the BDF plant are (Kasteren and Nisworo, 2007):

- raw material price
- plant capacity
- glycerol price capital cost

The price of the food plant-based BDF is influenced not only by the fluctuation of production depending on the local climate, but also a variety of factors such as investment of money market funds. Feedstock is the largest component of the cost of BDF, which is around 70 to 95 % of the overall cost (MSZO, 2013), see Figure 3. Using waste cooking oil is one of the recommended methods to reduce the price of BDF from the viewpoint of reduced feedstock cost. Moreover, using waste cooking oil also reduces the cost for disposal (Chhetri et al., 2008).

To date, the development of conventional biodiesel has been associated with mandates or other supportive programs such as tax incentives. Conventional biodiesel is

characterized by relatively low yields per unit of land compared to other bioliquids. Biodiesel feedstocks (e.g. palm oil) are coupled with environmental problems such as deforestation and the subsequent eutrophication of water sources. Biodiesel is highly sensitive to increases in oil price (Cazzola et al., 2013).

Compared to the price of petroleum diesel, the price of traditional feedstock is too expensive to be commercialized. Using waste cooking oils for biodiesel production significantly saves cost, which is approximately 60 % lower than that of conventional vegetable oils (Predojevic, 2008), refer Table 3.

Table 3

Biodiesel raw material prices in the past 10 years (IM, 2015)

Type of oil	Price [US\$ per ton]
Sunflower oil	650 - 2300
Rapeseed oil	700 - 1750
Soybean oil	400 - 1400
Palm oil	350 - 1200
Waste cooking oil	200 - 1000

Even the price of waste cooking oil is still too high to be commercially used. In addition, competition for these resources between the fuel and the food industry makes it impossible to realize a large scale introduction of bioliquids (Wang, 2012).

Various government interventions are fighting to bring the cost of bioliquids down. Low fossil fuel prices are very disadvantageous for bioliquids production because they hinder technological development (Carriquiry and Babcock, 2008).

Using a supercritical trans-esterification process for biodiesel production from waste cooking oil leads to processing high purity of methyl esters (99.8 %) and almost pure glycerol (96.4 %) is processed as a by-product. The globally

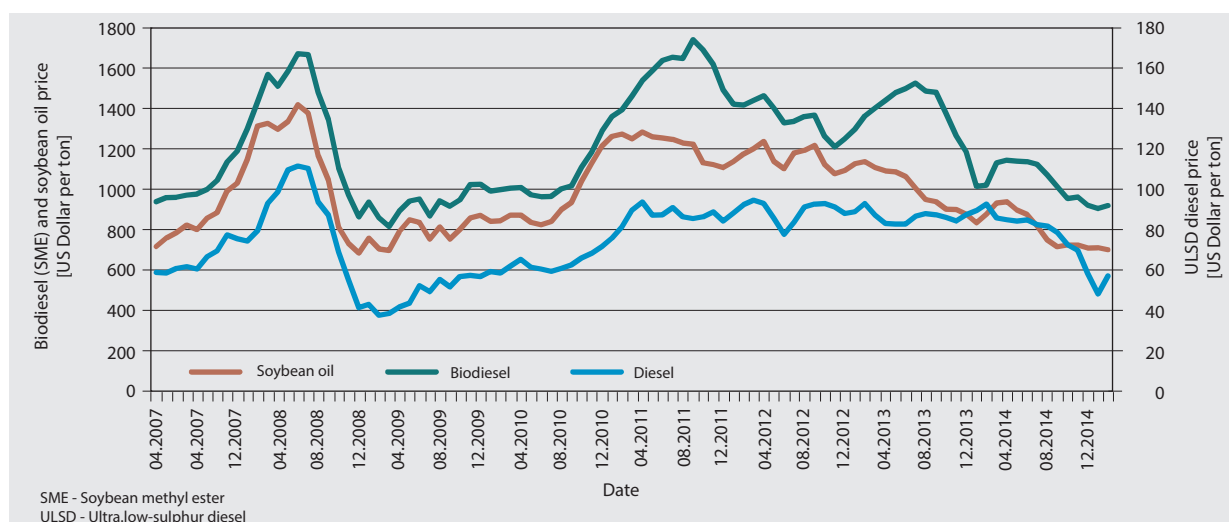


Figure 3

Comparing the price of soybean oil, biodiesel and diesel between 2007 and 2014 (IM, 2015; CARD, 2015)

increasing production of biodiesel and fatty acids leads to an oversupply of the generated by-product glycerol. The glycerol can use among other things in the food and pharmaceutical industries, but its much larger volume is formed as could be applied. As a result, the glycerol price declines significantly, but can reduce some extent the costs of biodiesel production (ab&cd, 2014).

4 Environmental benefits of BDF

There has been some research and development with biodiesel combustion. The reduction of GHG emissions can reach up to 86 % (EPA, 2010), see Table 4.

Table 4

Decreasing emissions by using biodiesel in heavy duty highway engines (EPA, 2002)

Pollutants	Emissions [%]
PM	-30
CO	-50
Ozone-forming (smog)	-50
PAH	-80
Unburned HC	-93
SO ₂	-100

BDF based on waste cooking oil basically adds no extra CO₂ greenhouse gas to the atmosphere except for some power needed to operate the plant and transportation. Moreover the use of waste cooking oil as BDF feedstock reduces the harmful load in sewers, sewage treatment plants, landfill, soil and living aquatic ecosystem (HE, 2014).

In an effort to avert political conflicts and reduce foreign oil dependency, the increased use of bioliquids may be justified. This increased usage would also have environmental benefits. Due to the high use of fossil fuels, the number and the severity of oil spill accidents in extraction, transport and processing into the environment. Over the past ten years 613 thousand tons of oil has spilled by accident worldwide (Wikipedia, 2015).

Currently, BDF is not generally popular for industrial gas turbines, but it could be a promising alternative fuel for gas turbines operating with diesel fuel. Biodiesel operated diesel engines, combined with other renewable energy sources such as solar or wind power, may be suitable for electricity generation for consumers outside the current energy grid.

There are further application possibilities in highly polluted cities with environmentally sensitive areas by supply with peak electricity, see Figure 4.

5 BDF application to gas turbines

Gas turbine manufacturers currently tend to design combustors operating with multi fuels such as natural gas, diesel and heavy oils, responding to the strong demand of the customers for diversity of the fuel used.

Diesel fuel is not specifically applied in large power plants, but it is especially used in peak power turbines for the purpose of electricity generation, and has a significant role in transportation (Wikipedia, 2014b). Most peak power turbines use gas as fuel. In the EU the market for gas-fired power plants will grow very intensively. Between 2001 and 2011 natural gas dominated the fuel type for gas turbines by 40 % and diesel fuel by 16 %. The Far East claimed the top geographical location for gas turbine orders by 35 % (Haight, 2012).

The nuclear phase-out in Germany, which is one of the largest markets for nuclear power, will result in a growing



Figure 4

Top 20 most polluted cities in the world in 2014 (CNN, 2014)

need for alternative energy sources like biodiesel as well (Ecoprog, 2011). Worldwide, the market for natural gas-fired power generation equipment is highly concentrated. The current global natural gas-powered capacity stands at around 1300 GW, out of which over 35 % is located in North America (Sontakke, 2015).

Japan consumes a large amount of electricity; its consumption per capita reached 7700 kWh in 2010, i.e. the same level as the OECD, but 30 % higher than the EU average. The share of electricity represented about 25 % of total energy consumption in 2010. Nuclear power contributed more than 25 % to electricity production, which is about the same contribution as coal and gas.

Power generation from nuclear energy has been considerably reduced since Fukushima. In 2011 only 11 % of reactors were in operation. As a result, total power production decreased by 5 % in 2011 and nuclear power production was reduced by 43 % between 2010 and 2011. In the same time interval, thermal production increased substantially. In 2011, this demand increased by 18 % (Sebi, 2012).

It is widely known that the most effective power generation plant is a combined cycle, in which gas turbines operate with the steam turbines connected with the exhaust heat of the gas turbines. The combined cycle plant tends to be a large scale one because it uses a lot of water. The power plants with only gas turbines are more compact and flexible, and are often used to respond to peaking power demand. Due to their compactness, they are often applied for as a source of distributed energy, such as the co-generation of heat and electricity for shopping malls or large buildings. Gas turbines are also suitable for remote military facilities, mine sites and rural or isolated communities. Moreover, gas turbines, which can start very quickly reaching full power in a few minutes, play an important role in power generation during emergency situations when there may be power outages. Many large hospitals currently equip gas turbines for use in emergency situations. A combination of a compact and simple gas turbine operating with a small refinery plant treating waste cooking oil could be one of the best energy supply systems in small communities.

6 Technical feasibility

6.1 Combustion rig test

A combustion rig test of a 20MW gas turbine combustor at high load was performed with two different fuels, a biodiesel fuel and a usual petroleum diesel fuel. The combustor of the gas turbine consists of ten single can combustors located circumferentially. Each of them has an air blast fuel nozzle at the head and some dilution holes on the liner wall, see Figure 5. A combustion rig test was performed with the single can combustor test model. The effect of the fuel change was investigated on the emission, such as NO_x, CO, hydrocarbons, particular matter, stability, ignition, blow out and exit gas temperature. The combustion test was performed in JAXA-AP7 rig, see Figures 5 and 6.

Type-B thermocouples were used to measure the combustor exit temperature distribution. Horiba MEXA7000 was used to measure the chemical component of exhaust gas, where NO_x, CO and hydrocarbons were measured through chemoluminescence detector (CLD), non-dispersive infrared detector (NDIR) and flame ionization detector (FID), respectively. Soot concentration was measured through AVL 415SE, a filter type smoke meter.

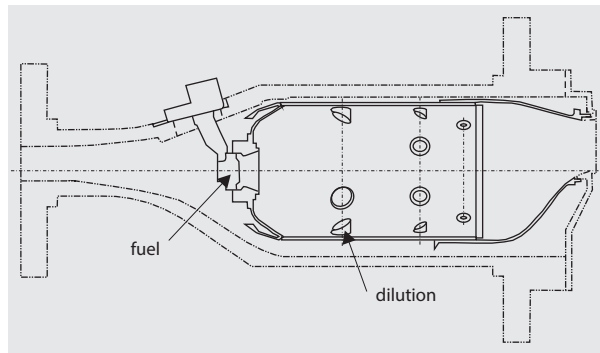


Figure 5
Schematic view of the can combustor

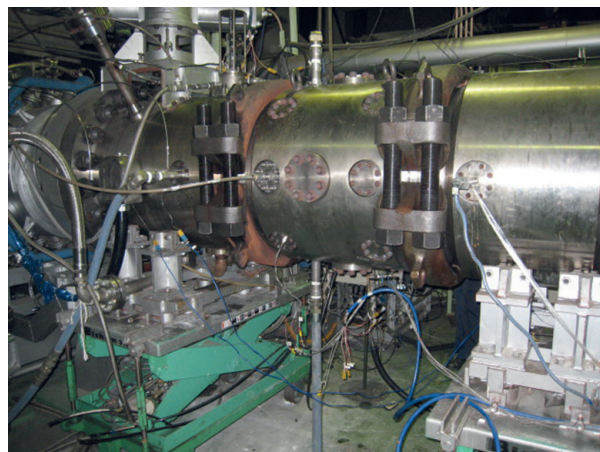


Figure 6
JAXA AP7 combustion test rig

The feedstock of the BDF was waste cooking oil, which was gathered and refined with Alkali catalysed trans-esterification reaction at the facility of Fuchigami co Ltd. located in the southern part of Japan, see Figure 7.

The main component of the BDF was a fatty acid methyl ester (FAME), which consists of various compounds with various length of the carbon chain. According to the chemical analysis of the BDF used in this study, presented in Figure 8, the representative chemical formula can be shown as C₁₇H₃₃-CO-O-CH₃. This is fairly different from that of the usual diesel fuel, C_nH_m (n is usually ranging from 10 to 20 with the peak value at around 17) which does not contain any oxide.

Downstream view of the single can combustor test model is shown in Figure 9, in which a thermo-couples rake and an exhaust gas sample probe are also shown; both of

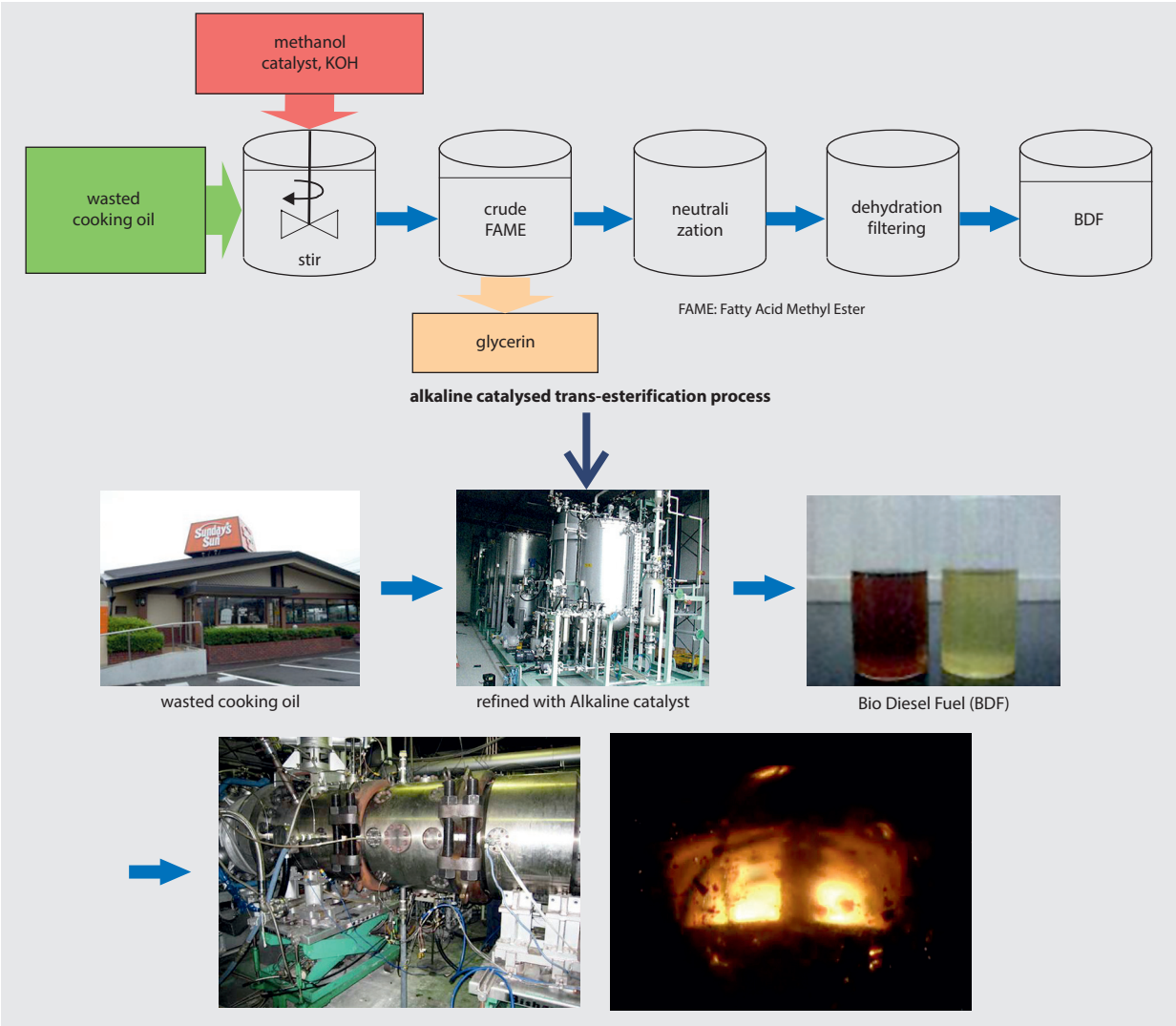


Figure 7
BDF refinery and combustion test

them move for circumferential direction to measure the distribution of temperature and components of the exhaust gas on the exit surface of the can combustor.

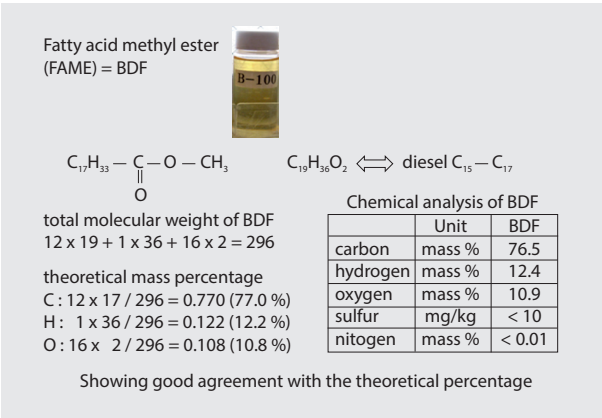


Figure 8
Chemical analysis of BDF

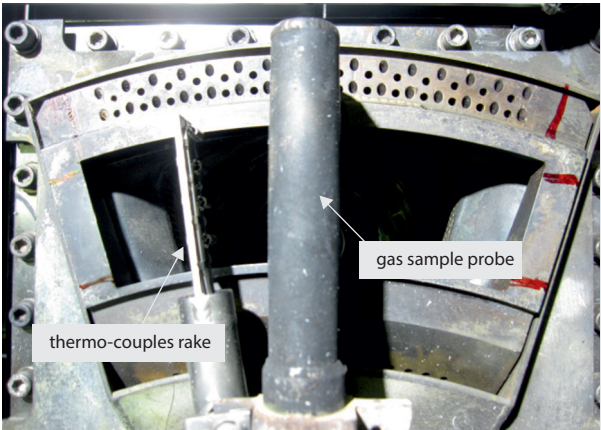


Figure 9
Downstream view of the can combustor test model

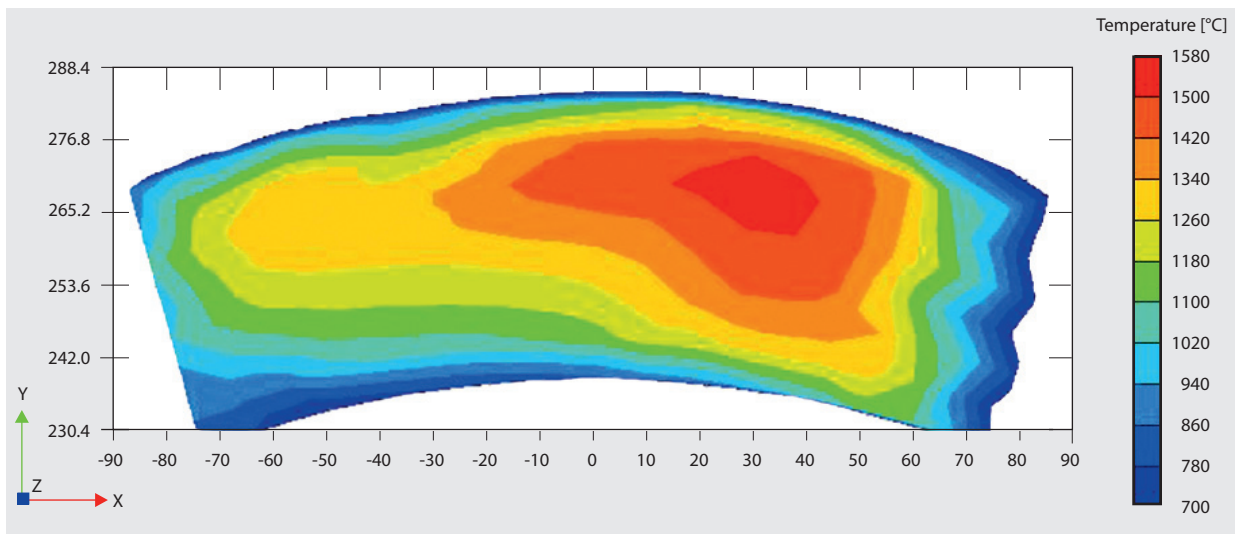


Figure 10
Exit temperature distribution at diesel fuel [°C]

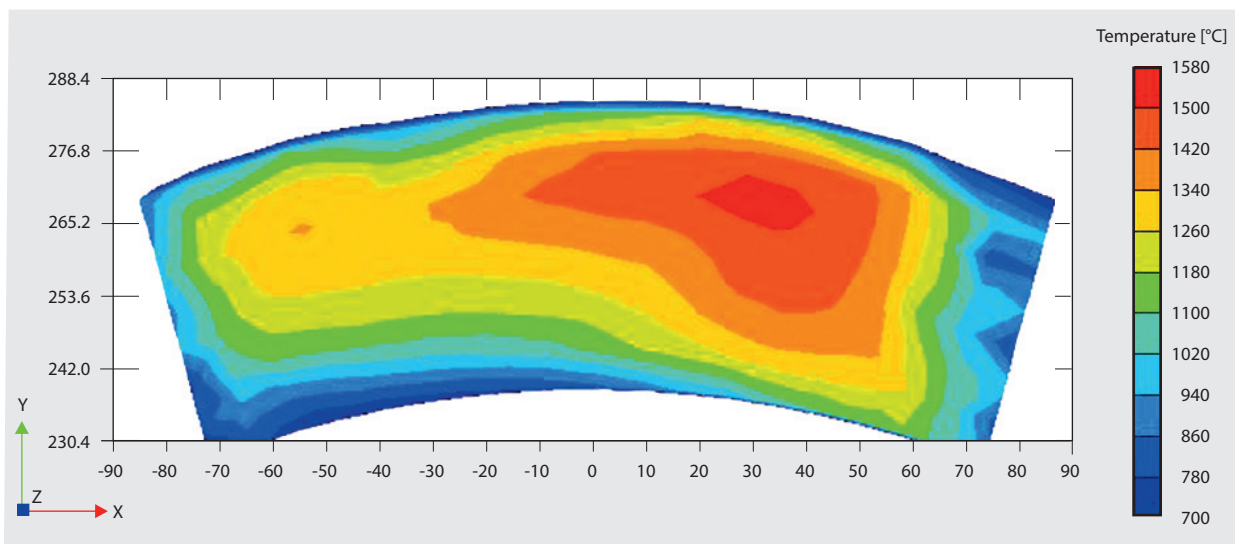


Figure 11
Exit temperature distribution at BDF [°C]

6.2 Test conditions and results

Inlet air pressure was 1220 kPa and temperature was 750 K, and the maximum outlet temperature reached 1800 K. The fuel flow at the rig tests of BDF and diesel could be carefully controlled so that the exit temperature of the combustor was nearly equal to each other to evaluate the difference of emission at the same operating condition of the gas turbine. Figures 10 and 11 present the exit temperature distributions of diesel and BDF combustion tests, showing that the exit temperature distributions are fairly similar to each other.

The fuel-to-air ratio was 2.01 % for petroleum diesel fuel and 2.22 % for BDF, implying that around 10 % additional fuel mass flow is needed for BDF to achieve the same exit temperature due to the smaller net heat release per unit

mass of BDF compared with the usual diesel fuel. The similarity of the exit temperature distribution implies that the effect of the fuel change from diesel to BDF on turbine blades and nozzles is small and that the output of the turbine will be nearly the same if the mass flow of BDF is 10 % more than that of the diesel fuel.

Figures 12 and 13 present the distribution of NO_x and CO concentrations on the exit surface of the combustor along the circumferential direction ranging from -18 degree to +18 degree. The NO_x emission of BDF is lower than that of diesel, though the difference is small. CO emission of BDF also tends to be lower. THC (Total Hydrocarbon) concentration was measured as well, but was negligibly small in both cases.

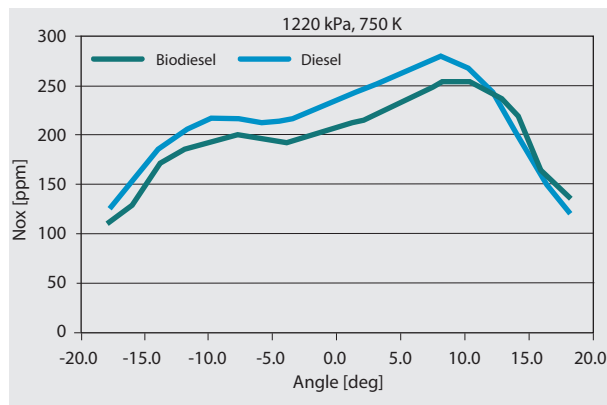


Figure 12
NOx concentration at combustor exit surface

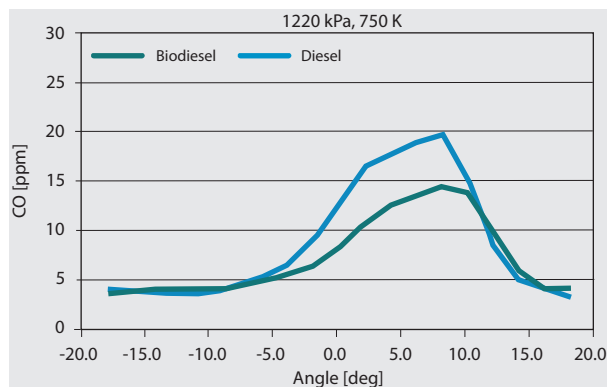


Figure 13
CO concentration at combustor exit surface

Soot concentration, mg of soot per unit m^3 of exhaust gas, was measured with AVL 415S filter type smoke meter only when the gas sample probe was located at the central position (0 degree) with various values of air/fuel ratio of diesel ($\text{AFR}_{\text{diesel}}$) and that of BDF (AFR_{BDF}). The result is shown in Figure 14. It should be noted again that 10 % more fuel is needed for BDF compared to diesel fuel as is explained above, therefore, it is reasonable to make the horizontal axis AFR^* , where $\text{AFR}^* = \text{AFR}_{\text{diesel}}$ for diesel combustion, while $\text{AFR}^* = \text{AFR}_{\text{BDF}} \times 1.1$ for BDF combustion to compare exhaust soot concentration of diesel and BDF at the same operating condition. The soot emission of BDF has been clearly lower than diesel. The common petroleum diesel fuel contains 15 to 20 % of aromatics, while the chemical analysis of the BDF showed that the aromatics are not contained, which is considered to have a favourable effect on the suppression of PM (Particulate Matter) formation through the combustion process of BDF. Ignition and blow out characteristics of BDF have been excellent at the rig test though they have not yet been surveyed over the whole operating condition.

The inspection of the combustor test model after the BDF combustion test showed that some brown tar was attached around the lip of the fuel atomizer, which has been not observed after the diesel combustion test. This might degrade the atomization of BDF causing instability and

inefficiency of combustion after a long time use; however, such tendencies could not be observed during the combustion rig test.

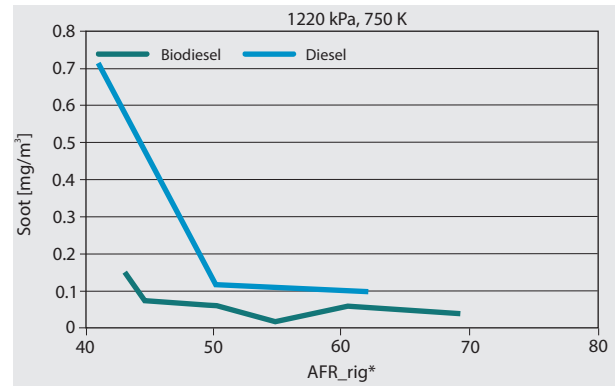


Figure 14
Soot concentration at combustor exit surface

6.3 Summary of the combustion test experiences

A combustion rig test of a 20 MW gas turbine combustor at high load was performed with two different fuels, a biodiesel fuel (BDF) and a usual petroleum diesel fuel, showing that

- (1) Combustor exit temperature distributions were fairly similar to each other when 10 % additional mass flow of BDF was supplied compared with diesel fuel implying that the effect of the fuel change from diesel to BDF on turbine blades and nozzles is small and that the output of the turbine will be nearly the same if the mass flow of BDF is 10 % higher than that of the diesel fuel. The possibility of major design change of the gas turbine cannot be identified with the introduction of BDF.
- (2) Both of NOx and CO emissions of BDF were nearly equal or slightly lower than those of diesel fuel. Soot emission of BDF was smaller than that of diesel, which is considered to be caused by the lack of aromatics content of BDF.

As long as the above results are considered, BDF is considered to be a promising alternative fuel for gas turbines, producing cleaner exhaust gas compared with diesel fuel. Further research on the performance at medium to low power settings, ignition and blow off, and the degradation of seals for fuel passages and so on should be performed to make BDF permanently used for gas turbines without serious troubles.

7 Concluding remarks

This study has searched for the possibility of widening the applicability of BDF to promote its production and consumption. Special focus has been paid to its application to gas turbine engines. The study on the availability of the feedstock and the economical aspect of BDF has showed that even though both the price and production totals tend to

fluctuate due to weather and market factors, collecting more waste cooking oil can be one of the solutions for feedstock in future. This might be categorized as the recycling of wasted energy, but the total amount of this feedstock should not be neglected as it could be a major feedstock for BDF. Today, the recycling rate of waste cooking oil is low because effective systems for collecting have not been fully constructed, not even in large cities. This situation could be improved by up to 70 % through an efficient collection system and an adequate public support.

From the viewpoint of environmental protection and technical feasibility, a combustion rig test of a 20 MW gas turbine combustor at high load was performed with petroleum diesel fuel and BDF, showing that BDF is considered to be a promising option to alternative fuel for gas turbines, producing cleaner exhaust gas.

The combination of a compact gas turbine and a simple chemical process system of refining waste cooking oil to BDF could be one of the best energy supply systems in small towns, which can also be applicable to a local community in large cities all over the world, leading to an increased awareness and understanding of the importance of environmental protection at a global level.

Acknowledgements for the Hungarian parts (producing biomass, processing bio-liquids, statistics, and climate and environment protection)

Research is supported by the project "Complex assessment of climate change impacts - preparing international R&D projects in the University of West Hungary (TÁMOP-4.2.2.D-15/1/KONV-2015-0023)". The project has been supported by the European Union, co-financed by the European Social Fund.

References

- ab&cd innovation (2014) Innovations [online]. To be found at <http://www.abandcd.com/Innovations.913.0.html?&no_cache=1&L=1> [quoted 06.08.2015]
- BP (2014) BP statistical review of world energy : june 2014 [online]. To be found at <<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf>> [quoted 06.08.2015]
- Budiman A, Rachmansyah D, Marliska ED, Nugrahanto I (2013) What happen to biofuel [online]. To be found at <<http://www.manajemenenergi.org/2013/12/artikel-khusus-05-what-happen-to-biofuel.html>> [quoted 06.08.2015]
- CARD Center for Agricultural and Rural Development (2015) Historical biodiesel operating margins [online]. To be found at <http://www.card.iastate.edu/research/bio/tools/hist_bio_gm.aspx> [quoted 06.08.2015]
- Carriquiry M, Babcock AB (2008) A billion gallons of biodiesel : who benefits? Iowa Ag Review 14(1):6-8
- Cazzola P, Morrison G, Kaneko H, Cuenot F, Ghandi A, Fulton L (2013) Production costs of alternative transportation fuels : influence of crude oil price and technology maturity [online]. To be found at <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/FeaturedInsights_AlternativeFuel_FINAL.pdf> [quoted 06.08.2015]
- Chhetri AB, Watts CK, Islam MR (2008) Waste cooking oil as an alternate feedstock for biodiesel production. Energies 1:3-18
- CNBC Consumer News and Business Channel (2011) Oil will be gone in 50 years [online]. To be found at <<http://www.cnn.com/id/42224813>> [quoted 06.08.2015]
- CNN (2014) Top 20 most polluted cities in the world [online]. To be found at <<http://edition.cnn.com/2014/05/08/world/asia/india-pollution-who/>> [quoted 06.08.2015]
- Diya'uddeen BH, Abdul Aziz AR, Daud WMAW, Chakrabarti MH (2012) Performance evaluation of biodiesel from used domestic waste oils : a review. Trans IChemE, Part B 90:164-179
- EBTP European Biofuels Platform (2015) Biofuels policy and legislation [online]. To be found at <<http://biofuelstp.eu/biofuels-legislation.html>> [quoted 06.08.2015]
- Ecoprog (2011) The market for gas power plants in Europe [online]. To be found at <<http://www.ecoprog.com/en/publications/energy-industry/gas-power-plants.htm>> [quoted 06.08.2015]
- EIA US Energy Information Administration (2015a) Europe Brent spot price FOB [online]. To be found at <<http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=p&f=m>> [quoted 06.08.2015]
- EIA US Energy Information Administration (2015b) Short-term energy outlook [online]. To be found at <<http://www.eia.gov/forecasts/steo/data.cfm>> [quoted 06.08.2015]
- EPA Environmental Protection Agency (2002) A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions : draft technical report [online]. To be found at <<http://www.epa.gov/oms/models/analysis/biodsl/p02001.pdf>> [quoted 06.08.2015]
- EPA Environmental Protection Agency (2010) Renewable Fuel Standards Program Regulatory Impact Analysis [online]. To be found at <<http://www.epa.gov/otaq/renewablefuels/420r10006.pdf>> [quoted 30.03.2015]
- GAIN Global Agricultural Information Network (2013) China - peoples republic of : biofuels annual [online]. To be found at <http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Biofuels%20Annual_Beijing_China%20-%20Peoples%20Republic%20of_9-9-2013.pdf> [quoted 06.08.2015]
- GAIN Global Agricultural Information Network (2014) EU-28 : EU biofuels annual 2014 [online]. To be found at <http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Biofuels%20Annual_The%20Hague_EU-28_7-3-2014.pdf> [quoted 06.08.2015]
- GF Green Feature (2011) No more guilt : a company's journey towards driving a greener future [online]. To be found at <http://thegreencab.co.za/wp-content/uploads/2011/03/Biofuel_SG_Sept-Oct_09.pdf> [quoted 06.08.2015]
- Haight B (2012) Rise of the recip : 36th power generation order survey [online]. To be found at <http://www.diesलगasturbine.com/images/custom-data/2835_2.pdf> [quoted 10.08.2015]
- HE Hajrá Egészség (2014) Ne a lefolyóba öntse! [online]. To be found at <<http://hajraegeszseg.hu/cikk/2014-01-10/ne-a-lefolyoba-ontse>> [quoted 06.08.2015]
- IM Index mundi (2015) Commodity prices, soybean oil [online]. To be found at <<http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=soybean-oil&commodity=diesel>> [quoted 10.08.2015]
- JFS Japan for Sustainability (2011) Recycled cooking oil used for delivering relief supplies from Taiwan [online]. To be found at <http://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id031041.html> [quoted 10.08.2015]
- Kasteren JMN, Nisworo AP (2007) A process model to estimate the cost of industrial scale biodiesel production from waste cooking oil by supercritical transesterification. Resour Conserv Recycl 50(4):442-458
- KSH Központi Statisztikai Hivatal (2012) A fontosabb szántóföldi növények betakarított területe, összes termése és termésátlaga (1990-) [online]. To be found at <https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_omn007.html> [quoted 13.08.2015]
- Mehta SP, Anand K (2009) Estimation of a lower heating value of vegetable oil and biodiesel fuel. Am Chem Soc 23(8):3893-3898
- MSZO Magyar Szó online (2013) Az amerikai olajpala felboríthatja a világgazdasági rendet [online]. To be found at <http://www.magyar szo.com/hu/2124/gazdasag_ipar/102611/Az-amerikai-olajpala-felbor%3C%ADthatja-a-vil%3C%A1ggazdas%3C%A1gi-rendet.htm> [quoted 10.08.2015]
- Predojevic ZJ (2008) The production of biodiesel from waste frying oils : a comparison of different purification steps. Fuel 87:3522-3528

- Rapier R (2014) Global biofuels status update [online]. To be found at <<http://www.energytrendsinsider.com/2014/08/28/global-biofuels-status-update/>> [quoted 10.08.2015]
- Sebi C (2012) Decrease of Japanese power consumption to adapt to the fading nuclear activity [online]. To be found at <<http://www.leonardo-energy.org/blog/decrease-japanese-power-consumption-adapt-fading-nuclear-activity>> [quoted 10.08.2015]
- Shi H, Zhang H (2014) Waste oil and fat feedstocks for biodiesel production. *Adv Petroleum Explor Develop* 8(1):31-36
- Sontakke M (2015) The must-know dynamics of the global power industry [online]. To be found at <<http://marketrealist.com/2015/01/must-know-dynamics-global-power-industry/>> [quoted 10.08.2015]
- Spöttle M, Alberici S, Toop G, Peters D, Gamba L, Ping S, Steen H, Bellefleur D (2013) Low ILUC potential of wastes and residues for biofuels [online]. To be found at <<http://www.ecofys.com/files/files/ecofys-2013-low-iluc-potential-of-wastes-and-residues.pdf>> [quoted 10.08.2015]
- Voegele E (2015) Report highlights China's growth in biodiesel, ethanol production. [online]. To be found at <<http://biodieselmagazine.com/articles/289998/report-highlights-chinas-growth-in-biodiesel-ethanol-production>> [quoted 10.08.2015]
- Wang W (2012) Biodiesel : from lab to industry. *Asia Pacific Biotech* 16(5):27-29
- Wikipedia (2014a) Reserves-to-production ratio [online]. To be found at <http://en.wikipedia.org/wiki/Reserves-to-production_ratio> [quoted 10.08.2015]
- Wikipedia (2014b) Peaking power plant [online]. To be found at <http://en.wikipedia.org/wiki/Peaking_power_plant> [quoted 10.08.2015]
- Wikipedia (2015) List of oil spills [online]. To be found at <http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_oil_spills> [quoted 10.08.2015]
- Worldometers (2015) Energia [online]. To be found at <<http://www.worldometers.info/hu/>> [quoted 10.08.2015]

Particle size distribution of airborne micro-organisms in the environment – a review

Marcus Clauß*

Abstract

To obtain insight into the particle size distributions of airborne micro-organisms in different environments, a literature search was conducted. More than 190 publications containing relevant data including sampling systems, sampling sites, measuring parameters, sample size and concentrations were included. The size distribution of airborne particles carrying micro-organisms is a well-investigated subject in the range of aerodynamic diameters (AD) of 0.65 µm to 12 µm for many micro-organism groups and environments. It depends primarily on the sampling location and the type of source as well as the method of aerosolisation. Highest median shares of large bacteria-laden particles were found in livestock husbandry and in waste management. Sampling height above ground, air humidity, temperature and solar radiation may also influence particle size. For moulds, the median size distributions in air largely represent the size ranges of their spores. There is little knowledge about particles > 12 µm AD and the actual number of micro-organisms in different particle size classes. Few studies suggest that most micro-organisms are in particle size fractions > 10 µm AD. Future investigations should use sampling systems with high inlet efficiencies for particles > 20 µm AD, and allow sampling in a liquid to separate micro-organisms from aggregates. These systems should rather sample the health and environmentally relevant particle size fractions PM 2.5, PM 4, PM 10 and the total dust to allow for a more precise derivation of health and environmental effects.

Keywords: *bio-aerosols, particle size distribution, size-selective bio-aerosol sampler*

Zusammenfassung

Partikelgrößenverteilung von luftgetragenen Mikroorganismen in der Umwelt – Ein Review

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über den Wissensstand zur Partikelgrößenverteilung von luftgetragenen Mikroorganismen in der Umwelt. Dazu wurden mehr als 190 Publikationen, die relevante Daten zu eingesetzten Sammelsystemen, Sammelort, Messparametern, Probenanzahl und gefundenen Konzentrationen beinhalteten, in die Auswertung mit einbezogen. Die Größenverteilung von Mikroorganismen-tragenden Partikeln ist im Bereich von 0,65 bis 12 µm aerodynamischer Durchmesser für viele Umweltbereiche und Mikroorganismengruppen gut untersucht. Sie scheint primär abhängig vom Umweltbereich (Sammelort) zu sein und hier vermutlich von der Art der Quellen der luftgetragenen Partikel sowie der Art und Weise der Aerosolisierung. Besonders bei den Schimmelpilzen repräsentieren die gefundenen Verhältnisse auch die Größenverteilungen der Sporen der untersuchten Arten wieder, da Schimmelpilzsporen im Gegensatz zu Bakterien in der Luft weitgehend vereinzelt vorkommen. Wissensdefizite gibt es aufgrund der bisher eingesetzten Sammelsysteme im Bereich > 12 µm AD. Einige Studien deuten darauf hin, dass sich, abhängig vom Umweltbereich, ein Großteil der Mikroorganismen in der Partikelfractionen > 10 µm befindet. In Zukunft sollten daher verstärkt Sammelsysteme eingesetzt werden, mit denen nicht nur die Anzahl Mikroorganismen-tragender Partikel, sondern die Anzahl aller Mikroorganismen in den gesundheitlich relevanten Partikelgrößenfraktionen PM_{2,5}, PM₄, PM₁₀ und Gesamtstaub erfasst werden kann.

Schlüsselwörter: *Bioaerosole, Partikelgrößenverteilung, größen-selective Bioaerosolsammler*

* Thünen Institute of Agricultural Technology, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany

1 Introduction

The exposure to airborne micro-organisms can affect health negatively (Gregory, 1961; Fernstrom and Goldblatt, 2013). This is also generally depending on the particle size (Cheng, 2003; Cho et al., 2005; Miller et al., 1988; Ogden and Birkett, 1975; Sturm, 2012; Thomas et al., 2008). When inhaled, for example, penetration depth is highly depending on particle size: large bio-aerosol particles get already stuck in the nose or mouth whereas small particles can get deep into the lungs. Especially waste management industries or livestock production facilities can be a source of huge amounts of different airborne micro-organisms which are emitting also into the environment (VDI 4250/3, 2014). Therefore approval processes for construction or expansion of such facilities often include the assessment of environmental and health effects (e. g. for Germany: VDI 4250/1, 2014; TA-Luft, 2002). In this context the dispersal of airborne micro-organisms as well as their immission in residential areas is often calculated and predicted with computer models (VDI 4251/3, 2015). For these calculations it is commonly assumed that the size of the microbial particles is below 2.5 µm (Burrows et al., 2009; VDI 4251/3, 2015; TA-Luft, 2002). However, calculated and measured concentrations in agriculture can differ considerably (Seedorf et al., 2005; Springorum et al., 2014). One reason for such disagreements can be the underlying theoretical particle size.

To improve the prediction of dispersion models and the environmental health assessment on the one hand and to get an insight on the particle size distribution of airborne micro-organisms in other relevant environments, e. g. living spaces, public buildings, offices, hospitals or outdoor air, on the other hand, a literature search to this topic was conducted. The results may help regional authorities, environmental auditors and engineering consultants to assess possible risks and to identify lacks of knowledge and need for further investigations.

1.1 Airborne micro-organisms and their aerosolization

Above the land surface in a natural environment, airborne dust consists of up to about 25 % of biological particles (Matthias-Maser and Jaenicke, 1994; Matthias-Maser and Jaenicke, 2000; Jones and Harrison, 2004). In urban and agriculturally-dominated areas the percentage is usually higher (Matthias-Maser and Jaenicke, 1995). Shares of up to 90 % could be found in waste management industries or livestock production, (Aengst, 1984). Airborne biological particles as a whole are also denoted as bio-aerosols. They are a complex mixture consisting of different components, from simple organic molecules with dimensions in the nanometer range, through to viruses, bacteria, bacteria spores, mould spores and hyphae and pollen with diameters of 100 µm and more, as well as animal and plant debris of different sizes. These components can get into the airborne state as single particles or in aggregates. In 1884, Hesse already revealed experimentally that airborne bacteria occur mainly in

“colonies”; whereas mould spores could be found detached (Hesse, 1884; Hesse, 1888). He also even discussed whether it was expedient to determine the count of bacteria in a given volume of air, or just the number of bacteria-laden particles. Both approaches have been applied to different extents in the studies in the following 130 years.

The fact that airborne bacteria occur mainly in aggregates, and, in contrast, mould spores rather as single cells, can be explained by their mode of life. Natural habitats of most micro-organisms are soil, water, plants and animals and their residues. In these habitats they often form large colonies in complex communities consisting of many different species. Bacteria may rather accidentally get into the airborne state, mainly as large fragments of these colonies together with surrounding matrix. Aerosolization takes place, e. g., through wind (Fulton, 1966; Jones and Harrison, 2004), by excretion of faeces, loss of skin scales (Lewis et al., 1969; Clauß et al., 2013a), breathing, speech, coughing and sneezing (Duguid, 1946; Loudon and Roberts, 1967; Papineni and Rosenthal, 1997; Nicas et al., 2005; Yang et al., 2007; Gralton et al., 2011) or by spray (Blanchard and Syzdek, 1972). The dissemination strategies of most of the streptomycetes and actinomycetes, as well as moulds, include aerial distribution. Some species even have mechanisms for an active release of spores into the air (Ingold, 1984; Meredith, 1973). This also includes the strategy to produce large amounts of single spores to increase the chance for successful dissemination. Pasanen et al. (1989) and Heikkilä et al. (1988) found ratios of 2:1 for single spores and small spore aggregates in the airborne state of different moulds and even 5:1 for actinomycetes.

1.2 Particle size definitions

The shape and size of most of bacteria, yeasts and mould spores are well known from several microscopic studies. An overview is given by, e. g., De Hoog et al. (2000), Bergey et al. (1974), and Winkle et al. (1979). However natural bio-aerosol particles often consist of different components and are assembled irregularly. Therefore the specification of particle dimensions, such as length, height, and width as well as density, are more difficult than for an accurately definable geometric body like a spherical mould spore or bacterial rod. Some approximations are used in practice such as the geometric equivalent diameter which is obtained by determining the diameter of a sphere having the same geometric properties (surface, volume or projected area) as the irregularly-shaped particle. The terms “petri ratio size” (Bourdillon et al., 1948; Kethley et al., 1963) and “settling velocity” (Kethley et al., 1963; Wells, 1955) still can be found in earlier literature. Both measurements refer to the number of micro-organisms that settle on a petri dish in a given time. Here, the behavior of particles in the air, for which size and shape and also the density are relevant, is indirectly included. The density for mould spores varies between 0.56 to 1.44 g/cm³ (Gregory, 1961) and for bacteria it can be assumed to be in the same range. The density of a particle is also included in the measurement “aerodynamic diameter” (AD).

The AD of an irregular particle is defined as the diameter of the spherical particle with a density of (1 g/cm^3) and the same settling velocity in air of standard pressure and temperature as the irregular particle (Hinds, 1999). The AD affects sedimentation and deposition in the environment and thereby the distance of transport via air (Hinds, 1999); the probability and location of deposition in the respiratory tract, and therefore potential health effects (Cheng, 2003; Cho et al., 2005; Miller et al., 1988; Ogden and Birkett, 1975; Sturm, 2012; Thomas et al., 2008); resuspension (Lighthart et al., 1993); the efficiency of air cleaning systems (Batel, 1972), and the tenacity of airborne micro-organisms within the particles (Kundsin, 1968; Lighthart and Shaffer, 1997; May and Druett, 1968).

The number of micro-organisms per volume of air is normally given as concentration number in units such as cells/ m^3 . Environmental science and health scientists often use mass concentration for the characterization of airborne particles, defined as the mass of particulate matter per volume with units such as $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Hinds, 1999). A reference of micro-organisms-to-mass is not common. But whenever airborne micro-organisms are separated from an air stream by mass inertia, e. g., in an impactor, this also refers to a mass-based cut-off curve. A median cut-off diameter (d_{50}) derives from the progression of the cut-off curve, at which exactly half of the particles of this size incorporate into the weighting. In practice that means that particles with a larger aerodynamic diameter than the d_{50} are deposited with an efficiency of more than 50 % in this stage. The cut-off curves of the different size-selective sampling systems vary depending on when and for which field of application they were developed. In occupational health, the cut-off characteristic of the human respiratory tract is commonly used as the basis for size-selective sampling systems for airborne particles, whereas in environmental science a definite cut is made between the particle size fractions (steep cut-off curve).

For the characterization of airborne dust and in the field of occupational health, e.g., in the DIN EN 481 (1993), the particle size fractions are defined as follows: The "Total Airborne Particles" are all particles surrounded by air in a given volume of air; the "Inhalable Fraction" ($d_{50} = 100 \mu\text{m}$) is the mass fraction of total airborne particles which is inhaled through the nose and mouth; the "Thoracic Fraction" ($d_{50} = 10 \mu\text{m}$) is the mass fraction of inhaled particles penetrating beyond the larynx, and the "Respirable Fraction" ($d_{50} = 4 \mu\text{m}$) is the mass fraction of inhaled particles penetrating to the unciliated airways. The "Respirable Fraction" was formerly denoted as "Fine Particles" or "Fine Dust" (Orenstein, 1960), with a different progression of the cut-off curve and a d_{50} of $5 \mu\text{m}$. Today this term is uncommon and not defined any more. In addition the DIN ISO 7708 (1996) gives a "Respirable Fraction" referred to "Risk Groups" with a d_{50} of $2.5 \mu\text{m}$. In the field of environmental science the definition of the "Total Suspended Particles" or "Suspended Particulate Matter" respectively, is nearly equal to the one used in occupational health, according to, e.g., VDI 2463/1 (1999) only with an upper particle size of about $30 \mu\text{m}$ without a rigid upper separation limit. The particle mass (PM) fractions PM10 and PM2.5 each have their names from the cut-off diameter and are defined

as particles that pass through a size-selective inlet with a 50 % efficiency cut-off at $10 \mu\text{m}$ or $2.5 \mu\text{m}$ diameter respectively (DIN EN 12341, 1999; US EPA, 2009). PM10 and PM2.5 roughly correspond to the "Thoracic Fraction" and the "Respirable Fraction" referred to "Risk Groups".

Despite the high importance of airborne micro-organisms for occupational health the progression of the cut-off curves of size-selective sampling systems for micro-organisms is mainly oriented to the environmental sciences. However, only a few systems have appropriate cut-off diameters according to the referred definitions (see also Table 1). Therefore information about the number of micro-organisms in these defined particle classes is rare in literature.

1.3 Factors influencing particle size

Irrespective of the kind of source and the method of aerosolization of airborne micro-organisms some other factors may directly and indirectly influence the ascertainable particle size. Neither the AD nor the mass of a biological particle in the airborne state are fix values. Size, form and density are subject to fluctuations depending directly on air humidity. A significant increase of the size of some airborne bacteria and mould spores was found when the relative humidity (RH) increased, especially between 90 % RH and 100 % RH (Ko et al., 2000; Madelin and Johnson, 1992; Reponen et al., 1996). In contrast, dry conditions may lead to disintegration of airborne particles by decreasing bonding forces and increasing tensions (Jones and Harrison, 2004). Also the size of freshly aerosolized liquid droplets decreases within seconds due to evaporation (Xie et al., 2007). The influence of the season on the size distribution of airborne micro-organisms is not clear but there are some indications for an indirect correlation. Wang et al. (2010), Awad et al. (2013) and Lin and Li (1996) could not find any influence of the season but later authors found an influence of the time of day. The mean size of the particles seemed to be larger at night, possibly due to the higher RH at night. Che et al. (1992), who conducted measurements distributed over 4 years, found influences of the time of day as well as of the season. Especially at noon and in summer, more micro-organisms were found in the larger particle size fractions ($> 7 \mu\text{m}$). The reason for this finding may be the solar ultraviolet radiation and its direct influence on the tenacity of the micro-organisms. Micro-organisms which become airborne as single cells or in small aggregates are harmed much more by radiation than micro-organisms within large particles or cell aggregates. Therefore, at noon in summer only those micro-organisms which were protected against unfavourable environmental conditions in the larger particles were still detectable by cultivation methods. This assumption is confirmed by the finding that mould spores, which are much more robust against ultraviolet radiation than bacteria (Clauß, 2006), show even distributions in the particle size classes in summer and winter and during the day and at night (Che et al., 1992). Also the height above ground at which the sampling takes place has an influence on the particle size distribution due to sedimentation, especially of the larger particles. Wright et al. (1969) investigated

the particle size distribution of airborne bacteria at heights from 10 to 150 m and the higher the sampling point was the fewer larger particles were found. It should be highlighted at this point that besides these exceptions mentioned, most bio-aerosol samplings were understandably conducted in the daytime, and the measurement systems were placed between 0.75 m and the mean human breathing height at 1.5 m. The choice of the size-selective sampling system, as well as the subsequent analysis, always has an influence on the results.

1.4 Size selective bio-aerosol samplers

Since the 1940s, an increasing number of systems have been developed for the size selective sampling of airborne micro-organisms in different stages (e.g., May, 1945; Wells, 1947). As already mentioned in Chapter 3, each of these stages has a defined d_{50} and particles with a greater AD are deposited with an efficiency of more than 50 % in this stage. The cut-off diameters and cut-off curves of the stages of the different systems are generally well validated. However, comparatively little is known about the inlet efficiencies of most of the

Table 1

Size selective sampling systems that were used for the sampling of airborne micro-organisms in the environment

Sampler	No. of Stages [n]	Flow rate [L/min]	Inlet d_{50} [μm]	Cutpoint of the Single Stages d_{50} [μm]	Reference
Impaction on Nutrient Plates					
Andersen Sampler	2	28.3	12	8.0; 0.95	Turner and Hill, 1975
Custom-designed Particle-sizing Slit Sampler	2	20	n/a	3.0; n/a	Dutkiewicz and Kwapiszewski, 1975
Size-grading Slit Sampler	4	566	28	18.2; 9.6; 4.2; 0.9	Lidwell, 1959
Andersen Sampler	6	28.3	12	7.2; 4.8; 3.2; 2.1; 1.0; 0.6	Andersen, 1958
Modified Andersen Sampler	7	28.3	19	11.2; 7.5; 5.4; 3.5; 2.0; 0.97; 0.6	May, 1964
Andersen Sampler	8	28.3	n/a	11.0; 7.0; 4.7; 3.3; 2.1; 1.0; 0.7; 0.4	Curtis et al., 1975
Impaction On Filter Or Solid Surfaces					
Personal Spectrometer (PERSPEC)	1	2	n/a	omitted	Prodi et al., 1988
Membrane Filter + Cyclon Pre-impactor	2	2	n/a	4.0; n/a	Predicala et al., 2002
Static Size-selective Bioaerosol Sampler (SSBAS)	2	18.5	14	7.2; 2.4	Kauppinen et al., 1989
Free Wing Impactor + Two-stage Impactor	1 + 2	- n/a	> 150 n/a	9.0 1.9; 0.11	Jaenicke and Junge, 1967 Jaenicke and Blifford, 1974
Two-stage Bio-aerosol Cyclone (BC)	2 + 1	3.5	n/a	1.8; 1.0; <i>depending on afterfilter</i>	Lee and Liao, 2014
Model BC 221	2 + 1	2	n/a	2.6; 1.6; <i>depending on afterfilter</i>	Lindsley et al., 2006
Model BC 251	2 + 1	10	n/a	2.1; 0.41; <i>depending on afterfilter</i>	Lecours et al., 2012
Personal Size-selective Bioaerosol Sampler	3	2	n/a	10.0; 4.5; 0.8	Mark and Vincent, 1986 Kenny et al., 1999
Modified High Volume Cascade Impactor (HVCI)	4	850	n/a	10.0; 2.4; 0.9; 0.2	Demokritou et al., 2002 Sillanpää et al., 2003 Sippula et al., 2013
May-Casella-impactor	4	17.5	50	14.5; 4.0; 2.5; n/a	May, 1945
Modified May-Casella-impactor	4	11.9	n/a	13.0; 4.0; 1.7; n/a	Lippmann, 1959
	4	11.9	n/a	6.4; 2.0; 0.9; 0.4	Fisar et al., 1990
Marple Personal Cascade Impactor	8	2	n/a	20.0; 15.0; 10.0; 6.0; 3.5; 2.0; 1.0; 0.61	Macher and Hansson, 1987
Andersen Sampler MK I	8	28.3	20	11.0; 7.0; 4.7; 3.3; 2.1; 1.1; 0.7; 0.4	Vaughan, 1989
Andersen Sampler MK II *(with Pre-impactor)	8 + 1*	28.3	20	10.0*; 9.0; 5.8; 4.7; 3.3; 2.1; 1.1; 0.7; 0.4	Vaughan, 1989
Micro-orifice Uniform Deposit Impactor (MOUDI)	10	30	18	10; 5.6; 3.2; 1.8; 1.0; 0.56; 0.32; 0.18; 0.1; 0.056	Marple et al., 1991
Sampling In Liquids					
Multi-stage Liquid Impinger	3	50	>20	6.0; 3.0; 0.8	May, 1966

samplers. This is especially true for particles $> 10 \mu\text{m AD}$ and for the sampling at unfavourable flow conditions or wind regimes (Vaughan, 1989; Yao and Mainelis, 2006). In this regard, the six-stage Andersen sampler is thoroughly evaluated. McFarland (1977) found 0 % inlet efficiency for particles with an AD of $15 \mu\text{m}$ for an upright impactor g and a wind speed of 4.6 m/s . The inlet efficiency increase with lower wind speeds was negligible. Wedding et al. (1977) found efficiencies between 2 % ($15 \mu\text{m AD}$) and 67 % ($5 \mu\text{m AD}$) with internal wall losses of 41 % and 10 % respectively. Excluding some exceptions, it can be assumed that most of the systems are not capable of collecting particles $> 20 \mu\text{m}$. This limitation has not posed a problem so far because an upper size limit for natural aerosols of 20 to $30 \mu\text{m AD}$ is commonly agreed upon due to particle diffusion and sedimentation. This cannot be confirmed though. Rather Jaenicke and Junge (1967) found particles up to $150 \mu\text{m}$ in natural ambient air with their “Free Wing Impactor”. Also in ambient air as well as in the exhaust air of pig houses, Fisar et al. (1990) and Clauß et al. (2011a, b) found bio-aerosol particles with sizes up to $100 \mu\text{m}$ equivalent diameter that furthermore carried hundreds of micro-organisms.

The most frequently used sampling systems are those impacting airborne micro-organisms directly on nutrient media. Sampling of airborne micro-organisms on solid surfaces or filter or sampling in a liquid is only rarely conducted. An overview of the different size-selective sampling systems, which were used for the sampling of airborne micro-organisms, is given in Table 1.

1.4.1 Impaction on nutrient plates

The two-stage Andersen sampler (Turner and Hill, 1975) is one of the most frequently used sampling systems impacting airborne micro-organisms directly on nutrient media. There are 200 round nozzles in both stages. The nozzles in the second stage have a smaller diameter which account for size separation. The airborne particles are deposited on nutrient media in static petri dishes. In contrast, the “custom-designed particle-sizing slit sampler” uses two parallel systems both with slit nozzles for the impaction of airborne particles onto rotating nutrient plates (Dutkiewicz and Kwapiszewski, 1975). One system is equipped with a pre-impactor for the collection of the small particle fraction. The four-stage “size-grading slit sampler” (Lidwell, 1959) has two more stages. At every stage a circular slit nozzle is positioned off-center above a rotating glass petri dish. The air passes into the next stage through a hole in the middle of the petri dish. The standard for size-selective sampling systems for airborne micro-organisms and the most commonly used worldwide is the six-stage Andersen sampler (Andersen, 1958). In its original version every single stage had 400 round nozzles. May (1964) recommended a modified version with 200 nozzles for the first and second stage to reduce particle losses. To increase the inlet efficiency from $d_{50} = 12 \mu\text{m AD}$ to $d_{50} = 19 \mu\text{m AD}$ Lidwell (1965) recommended an additional stage connected upstream. This modified system is not well-established though. There were several other technical and

procedural modifications. To increase the inlet efficiency at unfavourable wind regimes, Burge et al. (1977) mounted a vane on the sampler to align the inlet to wind direction. Some authors used the six-stage Andersen sampler and pooled different stages in the results (e.g., Butera et al., 1991; Lembke et al., 1981; Lis et al., 2008; Predicala et al., 2002). Sometimes only single stages of the sampler were loaded with nutrient plates (Solomon, 1970). King and McFarland (2012) covered one half of the nutrient media with a filter to obtain the number of particles carrying micro-organisms and additionally the total number of micro-organisms in the different particle size fractions. Moschandreas et al. (1996) filled the petri dishes with water instead of nutrient media to count collected cells under a fluorescence microscope after staining with acridine orange. In its current version, the six-stage Andersen sampler has a higher collection efficiency compared to many other sampling systems (Gillespie et al., 1981; Jensen et al., 1992). There is also an eight-stage version of the Andersen sampler available (Curtis et al., 1978).

1.4.2 Impaction on filter or solid surfaces

In contrast to the direct impaction on nutrient plates, sampling of airborne micro-organisms on solid surfaces or filters is only rarely conducted, probably due to the risk of dehydration of the micro-organisms on these surfaces and the resulting lower biological sampling efficiency. Therefore, this sampling method is mainly used in combination with molecular biological or microscopic methods. Most of these sampling systems were originally developed for the collection of dust. There are many systems available using different techniques for size separation and particle collection. Relatively simply constructed is the “Personal Spectrometer” (PERSPEC) (Prodi et al., 1988; Prodi et al., 1991; Prodi et al., 1992). In only one stage is re-circulating particle-free air flanked by the sample air sucked through a round nozzle onto a membrane filter. Size separation takes place by deposition of larger particles in the central region of the filter and smaller particles in the boundary areas. Predicala et al. (2002) sampled airborne micro-organisms on membrane filters, too. For size-separation they used a cyclone as pre-impactor. The “Static Size Selective Bio-aerosol Sampler” (SSBAS) developed by Kauppinen et al. (1989) and tested by Rantio-Lehtimäki (1989) consists of a pre-impactor to retain water droplets and insects and a two-stage virtual impactor for size separation. The “Personal Size Selective Bio-aerosol Sampler” is based upon an IOM-f dust sampling head (Kenny et al., 1998; Kenny et al., 1999; Mark and Vincent, 1986) and separates airborne particles by means of two size-selective polyurethane foams in front of a polycarbonate after-filter. A remarkable system is the “Free Wing Impactor” (Jaenicke and Junge, 1967). Instead of sucking the probe air through the sampling system, an impactor plate attached to a rotating cantilever moves through the probe air. With this technique even particles with $AD > 150 \mu\text{m}$ can be sampled. Some authors (Matthias-Maser and Jaenicke, 1994; Matthias-Maser and Jaenicke, 1995; Matthias-Maser and Jaenicke, 2000) used this system in combination with a two-stage impactor

(Jaenicke and Blifford, 1974; Marple, 1970) for outdoor sampling. The two-stage bio-aerosol cyclone developed at the "National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)", consists mainly of two centrifuge tubes acting as parts of two in-line cyclones, as well as a back-up filter. Different designs and modifications of the system exist (Blachere et al., 2009; Lee und Liao, 2014; Lindsley et al., 2006). To date has mainly been used for the sampling of airborne viruses (Blachere et al., 2007; Blachere et al., 2009; Blachere et al., 2011; Cao et al., 2011; Noti et al., 2012; Verreault et al., 2008), but some authors also used it for the sampling of micro-organisms (Chen et al., 2004; Lecours et al., 2012; Yamamoto et al., 2011). Another system is the modified "High Volume Cascade Impactor" (HVCII), a four-stage slit impactor that collects airborne micro-organisms on polyurethane foams and in the last stage on a filter (Demokritou et al., 2002). The "May-Casella-Impactor" developed by May (1945) and distributed by Casella, is a four-stage system for collection of micro-organisms on glass slides in which the impactor stages are displaced by 90° each. Since 1959, a revised version is also available (Lippmann, 1959). The "Marple Personal Cascade Impactor" is an eight-stage system modified by Macher and Hansson (1987) in such a manner that a thin layer of gelatine can be used as sampling medium. There is also an eight-stage Andersen sampler in the MKI version available, for the sampling of particles onto solid surfaces and in the version MKII with additional pre-impactor ($d_{50} = 10 \mu\text{m AD}$). At least the "Micro-orifice Uniform Deposit Impactor" (MOUDI) (Marple et al., 1991) is a system with a variable number of stages. With up to 2000 micro-nozzles per stage especially small particles are impacted uniformly onto rotating sampling media. The system is mainly used for the collection of nano-particles and organic carbon compounds (e. g., Chen et al., 2011; Eiguren-Fernandez et al., 2003; McMurry and Zhang, 1989), but a ten-stage system was also used for the collection of endotoxins and bacteria (Kujundzic et al., 2006).

1.4.3 Sampling in liquids

The sampling of airborne micro-organisms in a liquid is preferable to impaction on solid surfaces or deposition on filters because of the higher biological sampling efficiency. There are only a few size-selective sampling systems using this method. May and Druett (1953) developed a pre-impinger serving as pre-separator for a standard impinger. May (1966) has further developed the system to a multi-stage impinger. Originally it was intended for the sampling of airborne micro-organisms, but could not become established for this purpose, probably due to its complex design. However, the multi-stage impinger is now the reference system for the evaluation of medical inhalers (Asking and Olsson, 1997; Mitchell and Nagel, 2003) and has also been used for the sampling of airborne viruses (Donaldson et al., 1977; Verreault et al., 2008).

1.5 Micro-organism analysis methods

The quantitative and qualitative analysis of airborne micro-organisms is conducted mostly by cultivation. If airborne

particles carrying micro-organisms are impacted directly on nutrient plates, each particle gives rise to a single colony irrespective of the number of viable units it may have carried. Therefore, the method gives the number of cultivable micro-organism laden particles (MLP) in a selected size fraction. On the nutrient medium directly below the single nozzles the impacted micro-organisms often lie closely side by side. The single colonies often grow into each other and merge together so that they cannot be discriminated when counting. However, this error can be minimized by the "Positive-Hole Correction" (Andersen, 1958; Macher, 1989). If micro-organisms are sampled on solid surfaces or filters and are eluted in a liquid afterwards, the collected cell aggregates may disintegrate to a large extent within the liquid separating the cells. Also by sampling into a liquid medium directly, followed by plating out of the whole or part of the fluid, bacterial aggregates are supposed to break up, partially or completely, and give rise to a higher count than that obtained by sampling directly on to a solid medium. Hence with this method, giving the number of colony forming units (cfu) after cultivation, the count of all micro-organisms in a selected particle size fraction can be obtained theoretically.

In recent years the application of molecular methods, which give the number of more or less specific gene copies in a selected particle size fraction (Lecours et al., 2012; Lee and Liao, 2014; Quian et al., 2012; Schafer et al., 2003; Sippula et al., 2013; Yamamoto et al., 2011), increased. It has to be considered that the number of gene copies may not equal the number of micro-organisms because genes may also occur disengaged in the dust or attached to cell debris or exist in several copies in the same cell. Scanning electron microscope analysis (Heikkilä et al., 1988; Tyrell et al., 2009), light microscopy (Fisar et al., 1990; Kujundzic et al., 2006; Tilley et al., 2001) or fluorescence microscopy (Clauß et al., 2011a; Clauß et al., 2011b; Hara et al., 2011) were also conducted to measure the size of airborne particles and to count the cells of bacteria, yeasts and moulds that are included in the particles. With these methods neither the density of the particles nor the capability for cultivation of the micro-organisms are taken into consideration. However these studies give insight in the internal structure of bio-aerosols and the distribution of micro-organisms on airborne particles themselves, as well as the distribution in selected particle size classes.

2 Material and Method

An extensive literature search was conducted on the size distribution of airborne micro-organisms in the environment. The online database Medline (PubMed) and the search engine Google Scholar were searched for publications containing the keywords *bio-aerosols*, *particle size distribution*, *airborne micro-organisms* using the Boolean operators AND or OR. The found publications were screened for supporting additional keywords and search terms, e. g., the different sampling systems, for an extended enquiry on the used search engines. Search terms and keywords were also translated to German, French and Spanish. Additionally an author

search in PubMed for other publications from the found authors as well as a control of the cited literature for further studies was conducted. After an abstract screening of the found studies laboratory experiments and studies investigating only the size distributions of biological particles by bio-aerosol fluorescence spectrometers were excluded. The remaining 197 publications available were summarized to the relevant data such as sampling system, measuring parameter, sampling site, sampling height above ground, concentrations and sample size. Not considered were the season and the time of day because of the differing conclusions of some studies (see Chapter 4). In the publications the size distribution data were presented mainly in figures or tables as median or arithmetic mean of concentrations or percentages of micro-organisms in different size classes. To compare the data they were converted to the median percentage of micro-organisms in the different particle size classes for each sampling system. Distributions that were normalized to the different widths of the particle size classes were back-calculated (TSI, 2012). Despite different sample sizes, every data row presented in the publications was weighted equally because it was assumed that every dataset was representative itself. In this regard one publication was excluded subsequently due to its congruency with another publication of the same author, based on an identical dataset. For the analysis it was generally distinguished between studies investigating the number of micro-organism-laden particles or the number of micro-organisms (cfu, cell count or gene copy) in a selected particle size fraction.

3 Results

3.1 Size distribution of airborne particles carrying micro-organisms

The size distribution of micro-organism-laden particles in the environment was investigated worldwide, mostly in ambient air and in living spaces (e. g., Bovallius et al., 1978b; Chen et al., 2008; Hu et al., 1994a; Fang et al., 2005; Hu et al., 1994b). Despite the environmental and (occupational) medical relevance fewer studies were conducted in waste management sites (e. g. Heo et al., 2010), sewage works or wastewater spray irrigation sites (e. g. Brandi et al., 2000; Bausum et al., 1982) or in hospitals (Noble et al., 1963a). Some measurements took also place in such exotic places as a war vessel (Wright et al., 1968), a research ship (Pósfai et al., 2003) or in a subterranean sanatorium (Frączek and Grzyb, 2010). In majority of investigations the six-stage Andersen sampler was used and therefore most data is available for this sampling system.

Figure 1 shows the size distribution of airborne particles carrying cultivable mesophilic bacteria in different environments obtained with the six-stage Andersen sampler. The box and whiskers plots represent the summarized results of different studies and include different numbers of medians or arithmetic means. Attention should be paid to the unequal widths of the size classes of the six-stage Andersen sampler and to the fact that, due to its inlet efficiency, only particles < 12 µm AD were sampled.

Although large variations can be found there are clear differences among the investigated environments. In ambient air only 15 % of the bacteria-laden particles are < 2.1 µm AD and more than 25 % are > 7.2 µm AD (medians). Lighthart (1997) presented similar results in his review article but with 40 % particles > 7 µm. In livestock husbandry and in waste management more than 90 % of the particles are > 2.1 µm AD, in the latter even 45 % are > 7.2 µm AD. The reason could be the combination of large area sources for airborne micro-organisms (soil, high animal numbers, waste) together with a generally high activity (wind, animal activity, compost shifting) leading to aerosolisation of a higher percentage of larger particles. A generally high activity is also found in public buildings as well as in public areas of hospitals. However, there is a lack of sources for airborne micro-organisms because these areas normally have easy to clean surfaces and effective air cleaning systems. Probably for this reason most of the bacteria-laden particles were found between 1.1 µm AD and 2.1 µm AD in these environments. Clauß et al. (2013a) found only a slight increase of the concentration of particles carrying bacteria in the air during the opening hours of an international trade fair, depending on the number of visitors and mainly by skin scales and small liquid droplets. The investigated exhibition hall also had large air filter systems. In the food and feedstuff industry the size distribution is similar to the one for public buildings and offices, probably for the same reasons. In contrast, in the median of the living spaces 25 % of the bacteria-laden particles are > 7.2 µm AD, probably due to additional sources for airborne micro-organisms like carpets, plants, domestic animals or damp walls and mouldy wallpapers. Reponen et al. (1992) found a short-period increase in size of airborne particles carrying micro-organisms caused by vacuum cleaning and potting plants, accompanied by increasing concentrations of *Penicillium* species. In sewage works, the size of most of the bacteria-laden particles is between 2.1 µm AD and 3.3 µm AD. Probably the wastewater processing generates many small droplets carrying bacteria. At least the size distribution of bacteria-laden particles in operating theatres follows no clear pattern. The concentration found in this area is so low that no clear trend can be deduced. These low concentrations are probably due to complex air ventilation and filter systems and high hygienic standards.

In general it should be also considered that there may be differences regarding the size distributions of particles carrying micro-organisms within a type of environment and even within the same facility. For example Bovallius et al. (1978a) investigated ambient air and found different size distributions of bacteria-laden particles above the Swedish mainland (37.8 % > 7.2 µm AD) compared to the coast (48.9 % > 7.2 µm AD). Brandi et al. (2000) examined the size distribution of bacteria-laden particles in a newly build sewage plant and found that 35.4 % of the particles were between 0.65 µm AD and 2.1 µm AD at the beginning but only 20.2 % after 25 days. This shows that due to various circumstances such as progressing biofilm formation or differing air humidity (s. a. chapter 4) particle size distribution can be influenced considerably within one environment.

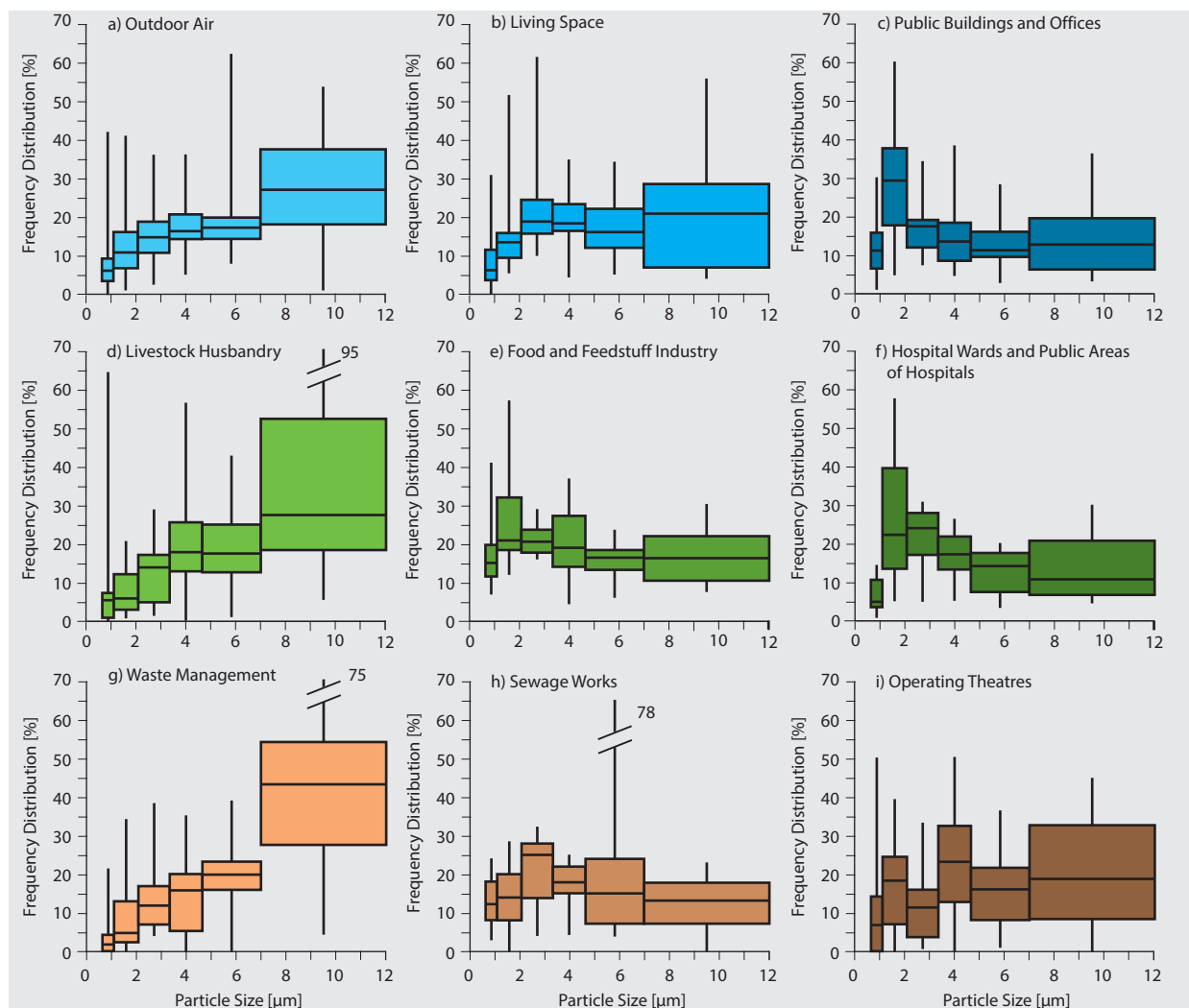


Figure 1

Size distribution of airborne particles carrying culturable mesophilic bacteria in different environments (a-i). Data basis [n = number of data rows, number of individual measurements]: a) Bovallius et al., 1978a; Chen et al., 2012; Fang et al., 2008; Glysson et al., 1974; Gołofit-Szymczak and Górny, 2010; Kim et al., 2009; Li et al., 2011; Lighthart and Shaffer, 1995; Moschandreas et al., 2003; Nasir et al., 2012, 2013; Nasir and Colbeck, 2012; Raisi et al., 2010, 2013; Rajasekar and Balasubramanian, 2011; Roobsuaydee et al., 2010; Rosas et al., 1994; Shilpa et al., 2013; Tsai and Liu, 2009; Wright et al., 1969; Wu and Yao, 2011; Xu and Yao, 2013 [n = 69, 4368]. b) Colbeck and Nasir, 2009; Fang et al., 2013; Moschandreas et al., 2003; Nasir et al., 2012; Nasir and Colbeck, 2010, 2012; Simard et al., 1983; Wu and Yao, 2011; Xu et al., 2013; Xu and Yao, 2013 [n = 37, 1753]. c) Grigorevski-Lima et al., 2006; Gołofit-Szymczak and Górny, 2010; King and McFarland, 2012; Meklin et al., 2002; Roobsuaydee et al., 2010; Rajasekar and Balasubramanian, 2011; Shilpa et al., 2013; Wang et al., 2010; Wu and Yao, 2011; Xu and Yao, 2013 [n = 22, 1183]. d) Aarnink et al., 2012; Adell et al., 2011a; b; Chai et al., 2001; Chinivasagam and Blackall, 2005; Lenhart et al., 1982; Liu and Ma, 2010; Sowiak et al., 2011; Siggers et al., 2011; Zhao, 2011; Zheng et al., 2013 [n = 26, 155]. e) Kim et al., 2009; Tsai and Liu, 2009 [n = 3, 15]. f) Coggins et al., 2012; Nasir et al., 2013; Pastuszka et al., 2005 [n = 6, 67]. g) Byeon et al., 2008; Glysson et al., 1974; Rahkonen et al., 1990; Zhang et al., 2009, 2012 [n = 43, 385]. h) Kim et al., 2012; Laitinen et al., 1994; Li et al., 2013; Zhao, 2011 [n = 13, 109]. i) Nasir et al., 2013; Pankhurst et al., 2012; Pastuszka et al., 2005 [n = 11, 75].

The size distributions of airborne particles carrying fungi are totally different from those carrying bacteria (Figure 2). In almost all areas most of the particles are between 1.0 µm AD and 3.2 µm AD. Probably the particle size distributions are representing the size distribution of the predominant mould species at the sampling location, because mould spores are occurring as single spores in more than 65 % (Heikkilä et al., 1988; Pasanen et al., 1989). However, according to Kanaani et

al. (2009), the particle size distributions also depend on the wind, the method of aerosolisation, and on the environment. Vijay et al. (1999) stated that the size of mould spores in ambient air is mostly between 2 µm and 20 µm, Reponen et al. (1994) found spore sizes up to 10 µm in indoor air. However, in this review the calculated median size for fungi-laden particles in living spaces is between 3.2 µm AD and 4.8 µm AD and for that higher than in ambient air. A possible reason

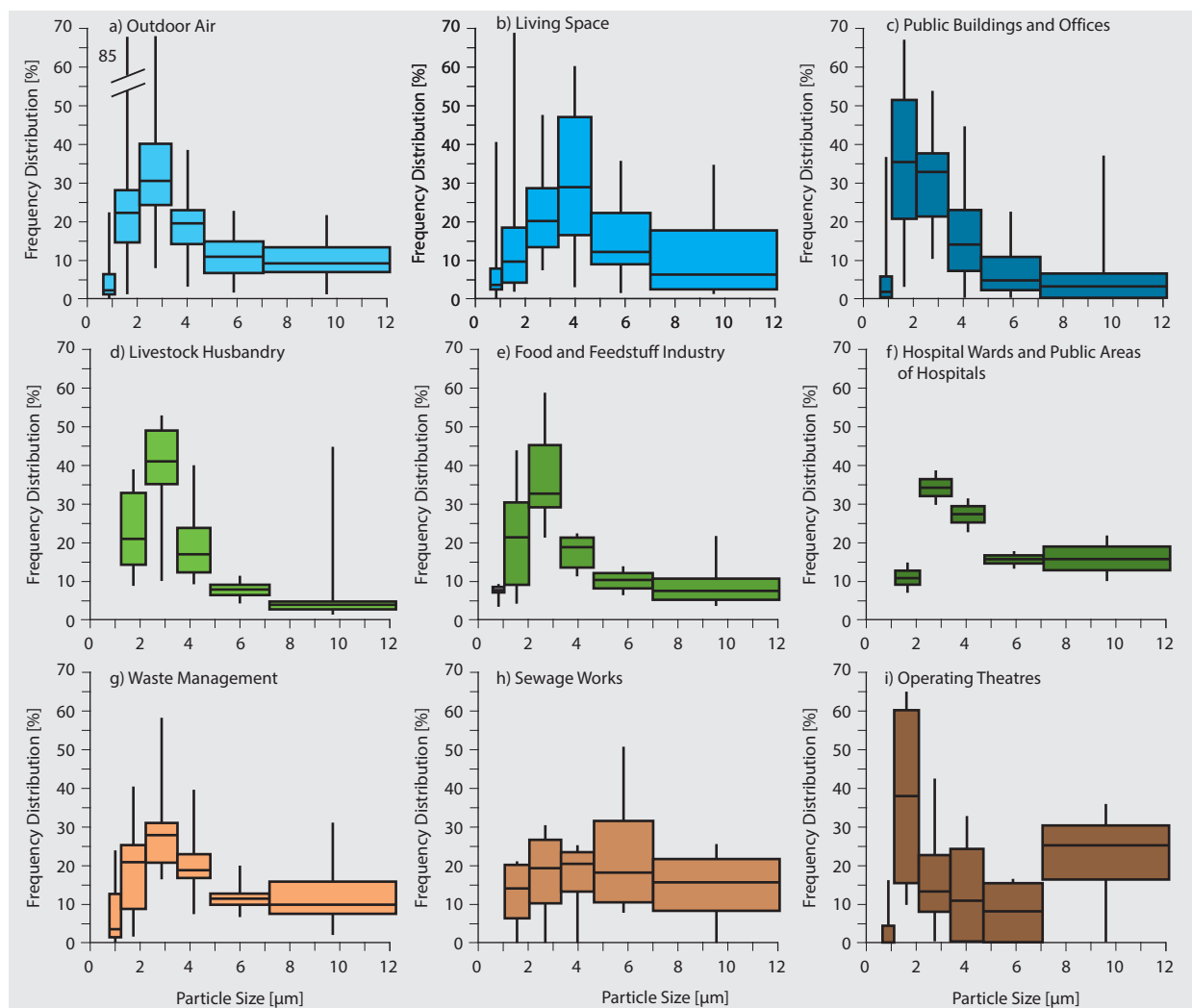


Figure 2

Size distribution of airborne particles carrying culturable mesophilic fungi in different environments (a to i). Data basis [n = number of data rows, number of individual measurements]: a) Fang et al., 2008; Gołofit-Szymczak and Górny, 2010; Kim et al., 2009; Lin and Li, 1996; Li et al., 2011; Nasir et al., 2012, 2013; Nasir and Colbeck, 2012; Rajasekar and Balasubramanian, 2011; Raisi et al., 2013; Roobsuaydee et al., 2010; Rozej et al., 2011; Shilpa et al., 2013; Tsai and Liu, 2009; Wang et al., 2010; Wu and Yao, 2011; Xu et al., 2013; Xu and Yao, 2013 [n = 47, 1406]. b) Fang et al., 2013; Hyvärinen et al., 2001; Nasir et al., 2012; Nasir and Colbeck, 2010, 2012; Reponen et al., 1992; Xu and Yao, 2013 [n = 32, 219]. c) Gołofit-Szymczak and Górny, 2010; Grigorevski-Lima et al., 2006; Meklin et al., 2002; Rahkonen et al., 1990; Rajasekar and Balasubramanian, 2011; Roobsuaydee et al., 2010; Rozej et al., 2011; Shilpa et al., 2013; Wang et al., 2010; Wu and Yao, 2011; Xu and Yao, 2013 [n = 32, 1520]. d) Chien et al., 2011; Liu and Ma, 2010; Siggers et al., 2011 [n = 10, 23]. e) Abdel Hameed et al., 2007; Kim et al., 2009; Tsai und Liu, 2009 [n = 6, 24]. f) Coggins et al., 2012; Nasir et al., 2013 [n = 2, 55]. g) Reinthaler et al., 1997; Zhang et al., 2009, 2012 [n = 12, 248]. h) Kim et al., 2012; Li et al., 2013 [n = 4, 77]. i) Nasir et al., 2013 [n = 4, 64].

could be that many of the studies that investigated the size distribution of fungi indoors were conducted in buildings with obvious mould problems. In this regard Reponen et al. (1994) found larger mould-laden particles in mouldy houses than in houses without such a problem. The distribution of particles carrying fungi is comparatively even in waste management. Especially the different biological materials as sources for airborne fungi and the high activity in this environment could lead to aerosolisation of many different species with different spore sizes. Similarly the even more equal distribution in sewage plants is still unexplained;

presumably the data basis is too low. For comprehensible reasons in operating theatres the concentrations of fungi-laden particles are also very low but with a peak between 1.0 μm AD and 2.1 μm AD. So it can be supposed that especially the large fungi particles were eliminated from the air by the filter systems.

In summary differences can be found in the median size distributions of airborne particles carrying bacteria or fungi among the different environments. Between 0.65 μm AD and 12 μm AD the size of bacteria-laden particles mainly seems to be dependent on the kind of source and the mechanism

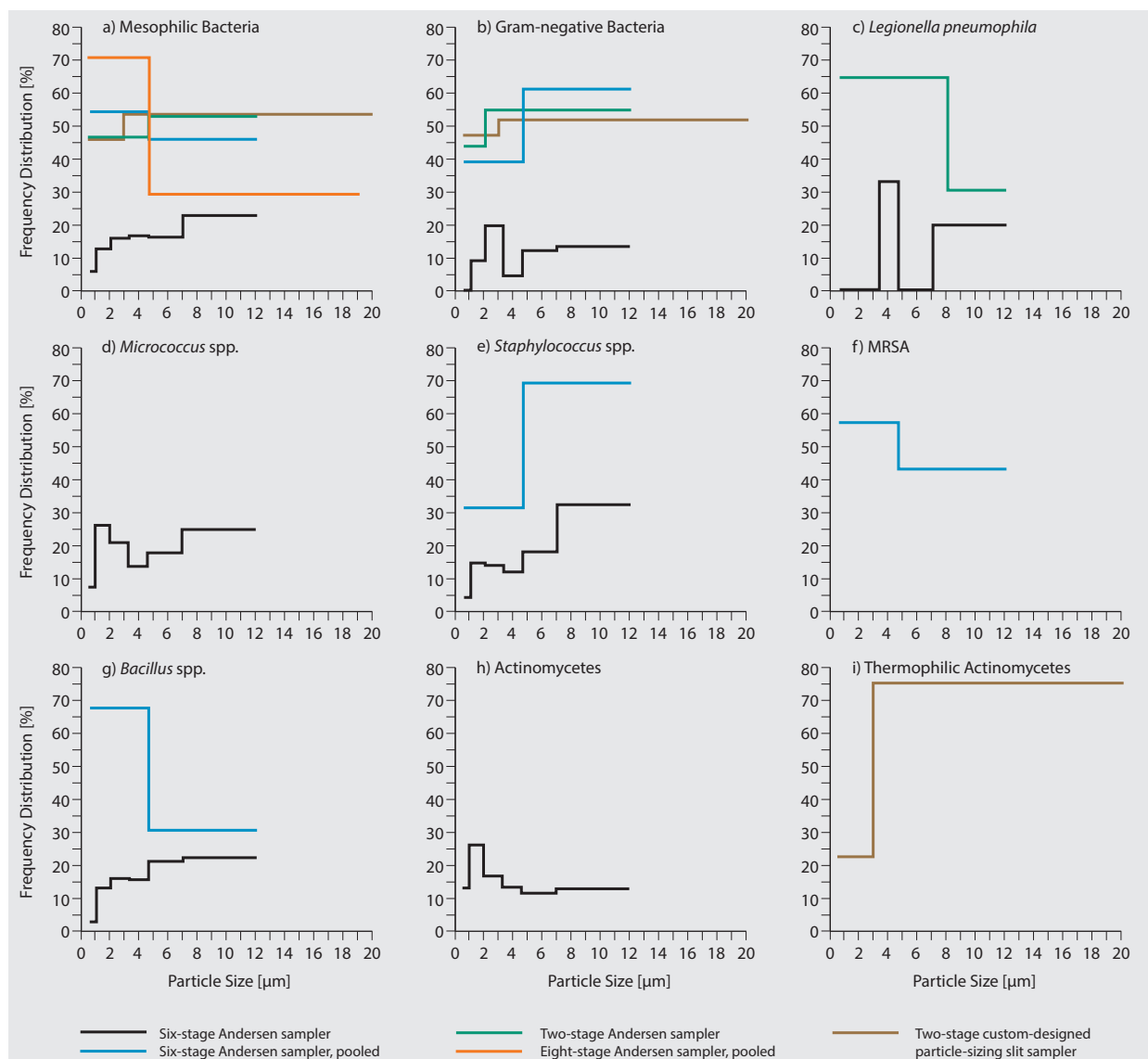


Figure 3

Size distribution of airborne particles carrying selected groups of bacteria (a to i). Data basis [n = number of data rows, number of individual measurements]: Six-stage Andersen sampler: a) see figure 1 [n = 242, 8164]. b) Lenhart et al., 1982; Lundholm, 1982; Nasir et al., 2012, 2013 [n = 17, 83]. c) Bollin et al., 1985 [n = 3, 3]. d) Górny et al., 1999; Kim et al., 2006, 2010; Kim and Kim, 2007 [n = 12, 193]. e) Coggins et al., 2012; Górny et al., 1999; Kim et al., 2006, 2010; Kim and Kim, 2007; Moschandreas et al., 2003 [n = 18, 2080]. g) Górny et al., 1999; Kim et al., 2006, 2010; Kim and Kim, 2007 [n = 12, 193]. h) Fang et al., 2008; Grigorevski-Lima et al., 2006; Li et al., 2012, 2013; Raisi et al., 2013; Zhang et al., 2009 [n = 13, 1060]. Six-stage Andersen sampler, pooled: a) Butera et al., 1991; Cormier et al., 1990; Ferguson, 2012; Kim and Kim, 2007; Lembke et al., 1981; Lis et al., 2008; Predicala et al., 2002 [n = 89, 399]. b) Chen et al., 2012; Clark et al., 1983; Cormier et al., 1990; Rosas et al., 2001 [n = 13, 92]. e) Chen et al., 2012 [n = 3, 3]. f) Ferguson, 2012 [n = 8, 24]. g) Chen et al., 2012 [n = 3, 3]. Two-stage slit sampler: a) Dutkiewicz et al., 1994, 2000, 2001a, b, 2002; Krysinska-Traczyk et al., 2002, 2004; Prazmo et al., 2003a, b [n = 103, 1290]. b) Dutkiewicz et al., 1994, 2002; Krysinska-Traczyk et al., 2004; Prazmo et al., 2003a [n = 50, 404]. i) Dutkiewicz et al., 1994, 2001a, b, 2002; Krysinska-Traczyk et al., 2004; Prazmo et al., 2003a, b [n = 79, 1114]. Two-stage Andersen sampler: a) Alvarado et al., 2009; Awad et al., 2013; Curtis et al., 1978; Jones and Cookson, 1983; Lester, 2008; Mota et al., 2008a; Zhu et al., 2003a, b [n = 65, 1095]. b) Lester, 2008 [n = 4, 67]. c) Bollin et al., 1985 [n = 5, 5]. Eight-stage Andersen sampler, pooled: a) Curtis et al., 1975; 1978 [n = 56, 112].

of aerosolisation, whereas the size of fungi-laden particles mainly seems to be dependent on the cell or spore size of the predominant species. There is a lack of information for particles > 12 µm AD, due to limitations of the size selective sampling systems that were used.

3.2 Size distribution of airborne particles carrying selected groups of micro-organisms

This chapter subsumes the study results for the size distribution of airborne particles carrying selected micro-organisms independent from the environment or the source. Especially

groups or species that are of environmental or hygienic relevance, or for which a lot of data are available, were chosen for the compilation. Figure 3 shows the size distribution of airborne particles carrying selected groups of bacteria. Here, also attention should be paid to the unequal size class widths of the different sampling systems.

There are differences regarding the median particle size distributions between the different bacteria as well as among the sampling systems. Some of these results seem to be contradictory. For example with the pooled two- or eight-stage Andersen sampler more particles carrying mesophilic bacteria were found with $< 4.8 \mu\text{m AD}$, whereas with the two- and six-stage Andersen sampler and with the two-stage slit sampler more particles were found in the larger particle classes. Also for Gram-negative bacteria the results obtained with three two-stage systems differ from the results obtained with the six-stage Andersen sampler. With the latter a peak at $1.0 \mu\text{m AD}$ and $2.1 \mu\text{m AD}$ was detected whereas with the other systems most Gram-negative bacteria were found in the larger particle size classes. The size distributions presented for *Legionella pneumophila* are not reliable due to a lack of data. The median size distribution of particles carrying *Micrococcus luteus* is in accordance with the finding that these species often form small aggregates of only a few cells. *Staphylococcus spp.* seems to appear mainly in larger aggregates, whereas MRSA were found on particles of $< 4.8 \mu\text{m AD}$. The curves presented for particles carrying *Bacillus spp.* are inconsistent. In the air especially the resistant endospores of this group should be expected. The size of such endospores normally ranges between $0.8 \mu\text{m}$ to $1.0 \mu\text{m}$, which at least is in accordance with the results of Chen et al. (2012). However,

the median size distribution obtained with the six-stage Andersen sampler indicates that spores of *Bacillus spp.* may also exist in larger aggregates in the airborne state. The size distribution of particles carrying the likewise spore-forming actinomycetes shows a peak between $1.0 \mu\text{m AD}$ and $2.1 \mu\text{m AD}$. This could be an indication for single airborne spores of this size range. In contrast 75 % of particles carrying thermophilic actinomycetes found with the two-stage slit sampler were in the size fraction $> 3.0 \mu\text{m AD}$.

In summary, most of the presented median size distributions of particles carrying different selected bacteria groups or species have to be scrutinized. The differences among the different groups as well as among the results of the different sampling systems may be due to the different sampling locations. Most bacteria occur in aggregates in the airborne state and their sizes are presumably dependent on the source and the method of aerosolisation and not on the group or species itself.

Table 2 and 3 specify further investigations of the size distribution of airborne particles carrying selected bacteria groups or species that were not mentioned before, in which different sampling systems were used. There is also a trend that the size distribution is mainly dependent on the sampling location. Similar to Figure 1, higher median percentages of bacteria-laden particles were found in livestock husbandry, ambient air and waste management followed by public buildings and offices than were found in the other areas.

Figure 4 shows the median size distribution of airborne particles carrying a selected fungi group or species. Here there are also differences regarding the median particle size distributions among the different fungi as well as among the

Table 2

Study results on the size distribution of airborne particles carrying other selected groups of bacteria when the six-stage Andersen sampler was used for sampling.

Microorganism	Sampling Location	Median % per Stage						Reference
Six-stage Andersen Sampler, Stage:		6	5	4	3	2	1	
Particle Sizes In Each Stage [μm]:		0.6 - 1.0	1.0 - 2.1	2.1 - 3.2	3.2 - 4.8	4.8 - 7.2	7.2 - 12.0	
<i>Aeromonas spp.</i>	Living Space	17	17	16	21	18	20	Górny et al., 1999
α-Hemolytic Bacteria	Waste Incinerator Plant	7	7	18	12	13	44	Glysson et al., 1974
β-Hemolytic Bacteria	Waste Incinerator Plant	31	31	12	9	5	0	Glysson et al., 1974
Coliform Bacteria	Outdoor Air	1	1	2	5	36	55	Rosas et al., 1994
<i>Corynebacterium spp.</i>	Nursing	25	25	13	11	21	23	Kim and Kim, 2007
<i>Enterobacteriaceae</i>	Pig House	6	6	9	12	13	49	Siggers et al., 2011
<i>Enterobacteriaceae</i>	Poultry Slaughterhouse	0	0	4	5	14	75	Lenhart et al., 1982
<i>Escherichia coli</i>	Waste Incinerator Plant	0	0	0	100	0	0	Glysson et al., 1974
Facultative Anaerobic Bacteria	Living Space	8	8	13	18	24	36	Hambraeus and Benediktsdottir, 1980
Marine Bacteria	Coastal Outdoor Air	11	11	17	20	18	33	Li et al., 2011
<i>Nocardia spp.</i>	Living Space	53	53	20	0	13	0	Górny et al., 1999
<i>Pseudomonas spp.</i>	Living Space	15	15	19	21	18	28	Górny et al., 1999
<i>Staphylococcus aureus</i>	Hen House	35	23	37	4	2	0	Chai et al., 2001
Strictly Anaerobic Bacteria	Living Space	7	7	6	25	32	25	Hambraeus and Benediktsdottir, 1980

Table 3

Study results on the size distribution of airborne particles carrying other selected groups of bacteria when systems other than the six-stage Andersen sampler were used for sampling.

Microorganism	Sampling Location	Median % per Stage				Reference
Custom-designed Particle-sizing Slit Sampler, Stage:		2	1			
Particle Sizes In Each Stage [µm]:		< 3.0	> 3.0			
<i>Lactobacillus spp.</i>	Herb Processing Plant	0	100			Dutkiewitz et al., 2001b
Size-grading Slit Sampler, Stage:		1	2	3	4	
Particle Sizes In Each Stage [µm]:		0.9 - 4.2	4.2 - 9.6	9,6 - 18.2	18.2 - 28	
<i>Streptococcus spp.</i>	Office	Median ø 10.0 - 12.4 µm				Noble et al., 1963a
<i>Streptococcus salivarius</i>	Office	Median ø 11.0 - 14.4 µm				Noble et al., 1963a
β-Hemolytic Streptococci	Office	Median ø 11.7 - 12.5 µm				Noble et al., 1963a
<i>Enterococcus spp.</i>	Office	Median ø 10.8 - 11.0 µm				Noble et al., 1963a
<i>Staphylococcus aureus</i>	Hospital Ward	Median ø 13.3 - 15.7 µm				Noble et al., 1963a
<i>Bacillus spp.</i>	Outdoor Air	Median ø 3.0 µm				Noble et al., 1963a
<i>Clostridium welchii</i>	Outdoor Air/Hospital	Median ø 11.0 - 17.2 µm				Noble et al., 1963a
<i>Clostridium welchii</i>	Outdoor Air/Hospital	14	19	30	36	Noble, 1961
Six-stage Andersen Sampler, Pooled, Stages:		6 – 3	2,1			
Particle Sizes In Each Stage [µm]:		0.6 - 4.8.	4.8 - 12			
<i>Bacillus cereus</i>	Outdoor Air	23	77			Chen et al., 2012
<i>Bacillus subtilis</i>	Outdoor Air	95	5			Chen et al., 2012
<i>Enterobacter cloacae</i>	Outdoor Air	91	9			Chen et al., 2012
<i>Faenia rectivirgula</i>	Pig Houses	0	100			Cormier et al., 1990
<i>Klebsiella pneumonia</i>	Outdoor Air	83	17			Chen et al., 2012
<i>Micrococcus luteus</i>	Outdoor Air	100	0			Chen et al., 2012
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Outdoor Air	100	0			Chen et al., 2012
<i>Pseudomonas putida</i>	Outdoor Air	57	43			Chen et al., 2012
<i>Serratia marcescens</i>	Outdoor Air	92	8			Chen et al., 2012
<i>Staphylococcus capitis</i>	Outdoor Air	100	0			Chen et al., 2012
<i>Staphylococcus epidermidis</i>	Outdoor Air	87	13			Chen et al., 2012
<i>Staphylococcus hominis</i>	Outdoor Air	17	83			Chen et al., 2012
<i>Staphylococcus lugdunensis</i>	Outdoor Air	74	26			Chen et al., 2012
<i>Staphylococcus saprophyticus</i>	Outdoor Air	83	17			Chen et al., 2012
<i>Staphylococcus simulans</i>	Outdoor Air	65	35			Chen et al., 2012
<i>Staphylococcus warneri</i>	Outdoor Air	90	10			Chen et al., 2012
<i>Streptococcus mitis</i>	Outdoor Air					Chen et al., 2012
Eight-stage Andersen Sampler, Pooled, Stages:		7 - 3	2 - 0			
Particle Sizes In Each Stage [µm]:		0.4 - 4.7	> 4.7			
Coliform Bacteria	Pig Houses	91	9			Curtis et al., 1975
<i>Staphylococcus spp.</i>	Pig Houses	79	21			Curtis et al., 1975
<i>Streptococcus spp.</i>	Pig Houses	79	21			Curtis et al., 1975

sampling systems. In contrast to bacteria-laden particles, the size distribution of particles carrying different selected moulds mainly describes the size distribution of their spores. For example, the average diameter of *Aspergillus fumigatus* spores is 2.5 µm to 3.0 µm (Madsen et al., 2009). With the different sampling systems the highest percentages were found exactly in this range. This is also true for *Penicillium spp.*, *Cladosporium spp.* and *Cryptococcus neoformans*.

Sometimes there are also apparent differences among the sampling systems. The median particle size distribution of *Aspergillus spp.* shows a peak at 2.1 µm AD to 3.2 µm AD for measurements in different environments with the six-stage Andersen sampler, analogue to the average spore size of *Aspergillus* species. With the pooled six-stage Andersen sampler higher median percentages were found for *Aspergillus*-laden particles > 4.8 µm AD. However, this distribution

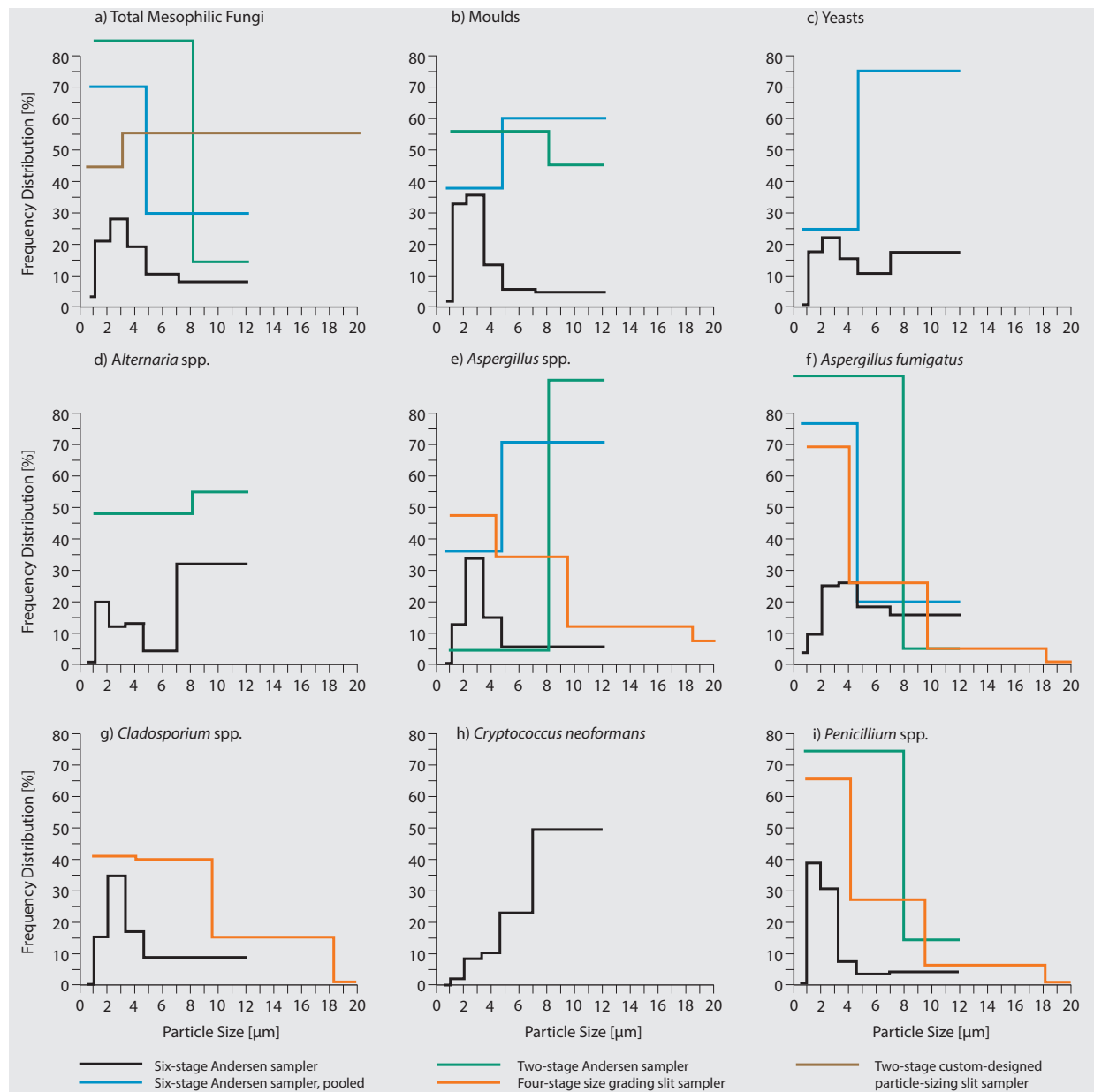


Figure 4

Size distribution of airborne particles carrying selected groups of fungi (a-i). Data basis [n = number of data rows, number of individual measurements]: Six-stage Andersen Sampler: a) see figure 2 [n = 43, 1324]. b) Colbeck and Nasir, 2009; Raisi et al., 2010; Reponen et al., 1994; Sowiak et al., 2011; Yu et al., 2013; Zuraimi et al., 2009 [n = 38, 2526]. c) Górny et al., 1999; Lin and Li, 1996; Reponen, 1995 [n = 17, 132]. d) Fang et al., 2008, 2013; Kim et al., 2006, 2010; Lin and Li, 1996; Sayer et al., 1969 [n = 18, 1128]. e) Abdel Hameed et al., 2007; Deacon et al., 2009; Fang et al., 2008, 2013; Górny et al., 1999; Kim et al., 2006, 2010; Kim and Kim, 2007; Lin and Li, 1996; Marchisio et al., 1989; Millner et al., 1980; Reponen, 1995; Sayer et al., 1969; Zuraimi et al., 2009 [n = 41, 2583]. f) Deacon et al., 2009; Millner et al., 1980 [n = 2, 33]. g) Fang et al., 2008, 2013; Kim et al., 2006, 2010; Kim and Kim, 2007; Lin and Li, 1996; Marchisio et al., 1989; Reponen, 1995; Zuraimi et al., 2009 [n = 31, 2394]. h) Powell et al., 1972; Ruiz and Bulmer, 1981 [n = 7, 12]. i) Fang et al., 2008, 2013; Górny et al., 1999; Kim and Kim, 2007; Kim et al., 2006, 2010; Lin and Li, 1996; Marchisio et al., 1989; Reponen, 1995; Sayer et al., 1969; Zuraimi et al., 2009 [n = 40, 2584]. Six-stage Andersen sampler, pooled: a) Chen et al., 2012; Kim and Kim, 2007; Lis et al., 2008 [n = 11, 93]. b) Cormier et al., 1990; Rosas et al., 2001 [n = 6, 26]. c) Cormier et al., 1990 [n = 4, 24]. e) Cormier et al., 1990 [n = 4, 24]. f) Clark et al., 1983 [n = 7, 68]. Two-stage custom-designed particle-sizing slit sampler: a) Dutkiewicz et al., 1994, 2001a, b, 2002; Krysinska-Traczyk et al., 2002, 2004; Prazmo et al., 2003a, b [n = 93, 1254]; Two-stage Andersen sampler: a) Alvarado et al., 2009; Awad et al., 2013; Mota et al., 2008a, b [n = 23, 924]. b) Lester, 2008 [n = 4, 67]. d) Mota et al., 2008b; Rosas et al., 1997 [n = 10, 509]. e) Jones and Cookson, 1983; Mota et al., 2008b; Rosas et al., 1997 [n = 11, 541]; f) Jones and Cookson, 1983 [n = 1, 94]. i) Lacey, 1973; Rosas et al., 1997 [n = 6, 328]. Four-stage particle-sizing slit sampler: e, f, g, i) Noble et al., 1963b n = 1, 7].

Table 4

Study results on the size distribution of airborne particles carrying other selected groups of fungi when the six-stage Andersen sampler was used for sampling.

Microorganism	Sampling Location	Median % per Stage						Reference
Six-stage Andersen Sampler, Stage:		6	5	4	3	2	1	
Particle Sizes In Each Stage [µm]:		0.6 - 1.0	1.0 - 2.1	2.1 - 3.2	3.2 - 4.8	4.8 - 7.2	7.2 - 12.0	
<i>Alternaria alternata</i>	Outdoor Air	0	0	0	11	33	56	Marchisio et al., 1989
<i>Aspergillus niger</i>	Outdoor Air	0	0	33	67	0	0	Marchisio et al., 1989
<i>Aspergillus versicolor</i>	Outdoor Air	0	0	43	57	0	0	Marchisio et al., 1989
<i>Aspergillus flavus</i>	Corn Dust	0	2	24	38	21	15	Hill et al., 1984
<i>Balcomycetidae</i>	Outdoor Air	19	15	15	7	9	34	Marchisio et al., 1989
<i>Bothrytis cinerea</i>	Outdoor Air	38	38	13	13	0	0	Marchisio et al., 1989
<i>Blastomycetidae</i>	Outdoor Air	19	15	15	8	9	34	Marchisio et al., 1989
<i>Candida albicans</i>	Indoor and Outdoor Air	0	20	0	20	40	20	Sayer et al., 1969
<i>Chaetonium indicum</i>	Outdoor Air	0	0	0	7	14	79	Marchisio et al., 1989
<i>Cladosporium cladosporoides</i>	Outdoor Air	4	17	34	25	19	1	Marchisio et al., 1989
<i>Cladosporium herbarum</i>	Outdoor Air	17	5	78	0	0	0	Marchisio et al., 1989
<i>Diplospora</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	0	0	9	4	44	44	Sayer et al., 1969
<i>Emericella nidulans</i>	Outdoor Air	57	0	22	22	0	0	Marchisio et al., 1989
<i>Epicoccum</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	0	0	0	0	8	92	Sayer et al., 1969
<i>Eurotium amstelodami</i>	Outdoor Air	15	23	31	15	0	15	Marchisio et al., 1989
<i>Fusarium moniliforme</i>	Corn Field	18	2	16	22	12	30	Ooka and Kommendahl, 1977
<i>Fusarium</i> spp.	Outdoor Air	0	13	16	29	20	13	Lin and Li, 1996
<i>Geotrichum</i> spp.	Kindergarden	0	46	34	8	3	1	Zuraimi et al., 2009
<i>Gliocladium</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	5	3	17	60	15	0	Sayer et al., 1969
<i>Hemispora</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	1	30	47	11	6	5	Sayer et al., 1969
<i>Hormonema</i> spp.	Outdoor Air	30	20	10	0	20	20	Marchisio et al., 1989
<i>Hormodendrum</i> spp.	Outdoor Air	0	0	6	26	37	29	Sayer et al., 1969
<i>Marine Fungi</i>	Coastal Outdoor Air	1	14	43	22	11	9	Li et al., 2011
<i>Monilia sitophila</i>	Indoor and Outdoor Air	0	0	0	0	100	0	Sayer et al., 1969
<i>Monotropa</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	0	0	0	4	53	43	Sayer et al., 1969
<i>Nigrospora</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	0	0	0	0	0	100	Sayer et al., 1969
<i>Oospora</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	0	40	0	60	0	0	Sayer et al., 1969
<i>Paecilomyces</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	0	0	9	26	65	0	Sayer et al., 1969
<i>Paecilomyces varioti</i>	Outdoor Air	13	13	20	53	0	0	Marchisio et al., 1989
<i>Penicillium italicum</i>	Outdoor Air	0	36	43	21	0	0	Marchisio et al., 1989
<i>Penicillium purpurogenum</i>	Outdoor Air	0	25	0	12	25	37	Marchisio et al., 1989
<i>Penicillium verrucosum</i>	Outdoor Air	0	5	14	73	0	9	Marchisio et al., 1989
<i>Pullularia</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	0	0	28	27	22	23	Sayer et al., 1969
<i>Rhinocladiella mansonii</i>	Outdoor Air	50	14	5	9	14	9	Marchisio et al., 1989
<i>Rhizopus</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	1,7	0	1,7	42	43	12	Sayer et al., 1969
<i>Rhodotulura</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	0	0	22	33	22	22	Sayer et al., 1969
<i>Sacharomyces</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	0	9	6	10	19	57	Sayer et al., 1969
<i>Scytalidium</i> spp.	Outdoor Air	66	24	7	2	0	0	Marchisio et al., 1989
<i>Sepedonium</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	0	0	25	0	25	50	Sayer et al., 1969
<i>Stemphilium</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	0	0	1	4	18	78	Sayer et al., 1969
<i>Streptomyces</i> spp.	Indoor and Outdoor Air	25	0	0	0	50	25	Sayer et al., 1969
<i>Trichophyton</i> spp.	Outdoor Air	0	0	0	17	39	40	Lin and Li, 1996
<i>Ustilago zeae</i>	Indoor and Outdoor Air	0	84	12	0	4	0	Sayer et al., 1969

Table 5

Study results on the size distribution of airborne particles carrying other selected groups of fungi when systems other than the six-stage Andersen sampler were used for sampling.

Microorganism	Sampling Location	Median % per Stage		Reference		
Two-stage Andersen Sampler, Stage:		2	1			
Particle Sizes In Each Stage [µm]:		0.95 - 8.0	8.0 - 12			
<i>Aphanocladium spp.</i>	Cork Factory	95	5	Lacey, 1973		
<i>Bipolaris spp.</i>	Indoor and Outdoor Air	48	52	Mota et al., 2008b		
<i>Cercospora spp.</i>	Indoor and Outdoor Air	50	50	Mota et al., 2008b		
<i>Monila spp.</i>	Cork Factory	10	90	Lacey, 1973		
<i>Mucor spp.</i>	Cork Factory	16	84	Lacey, 1973		
<i>Phoma spp.</i>	Indoor and Outdoor Air	36	64	Mota et al., 2008b		
<i>Rhizopus spp.</i>	Indoor and Outdoor Air	43	57	Mota et al., 2008b		
<i>Stachybothrys spp.</i>	Indoor and Outdoor Air	50	50	Mota et al., 2008b		
<i>Stemphylium spp.</i>	Indoor and Outdoor Air	49	51	Mota et al., 2008b		
<i>Thermophilic moulds</i>	Outdoor Air	91	9	Jones and Cookson, 1983		
Size-grading Slit Sampler, Stage:		1	2	3	4	
Particle Sizes In Each Stage [µm]:		0.9 - 4.2	4.2 - 9.6	9.6 - 18.2	18.2 - 28	
<i>Aspergillus niger</i>	Hospital Ward	33	47	16	4	Noble et al., 1963b
<i>Didymocladium spp.</i>	Hospital Ward	5	32	49	15	Noble et al., 1963b
<i>Monilia sitophila</i>	Hospital Ward	3	50	39	8	Noble et al., 1963b
<i>Paecilomyces spp.</i>	Hospital Ward	55	35	6	4	Noble et al., 1963b
<i>Rhizopus spp.</i>	Hospital Ward	26	39	31	4	Noble et al., 1963b
<i>Rhodoturula spp.</i>	Hospital Ward	57	38	5	0	Noble et al., 1963b
<i>Syncephalastrum spp.</i>	Hospital Ward	24	47	26	3	Noble et al., 1963b

represents only few measurements in pig houses conducted by Cormier et al. (1990). Because of the high dust concentrations in pig houses there is a higher probability that mould spores are attached to larger particles. This finding shows that, as for bacteria, the sampling location also has an influence on the particle size distribution of mould spores.

Tables 4 and 5 specify further investigations of the size distribution of airborne particles carrying different groups or species of fungi that were not mentioned before, in which different sampling systems were used. Here, as before, the size distribution of particles carrying different fungi mainly describes by trend the size distribution of their spores. Also an influence of the sampling location or rather of the source or the method of aerosolisation is shown. For example in Table 4 the median size of airborne particles carrying different *Aspergillus* species with similar spore size (Marchisio et al., 1989) are differently distributed in ambient air compared to corn dust (Hill et al., 1984).

3.3 Number distribution of airborne micro-organisms in different particle size fractions

The previous two chapters deal only with the size distribution of airborne particles that carry different micro-organisms, independent of the actual number of micro-

organisms on such a particle. King und McFarland (2012) showed that there may be large differences in this regard. In each stage of a six-stage Andersen sampler they covered half of the nutrient plates with a filter to get the number of all bacteria corresponding to the number of bacteria-laden particles by eluting the filter after sampling in a liquid followed by cultivation. With this method they found ten times more bacteria than bacteria-laden particles in the air of classrooms. Assuming the densest sphere packing, and a cell size of 1 µm, a bacteria aggregate of 5 µm diameter may theoretically consist of 100 bacteria cells, a 10 µm aggregate even of 650 cells.

In contrast to the large number of studies dealing with the size distribution of airborne particles carrying micro-organisms, studies on the number distribution of airborne micro-organisms in different particle size fractions are rare. Table 6 shows the mean percentages of colony forming units of different airborne micro-organisms in different particle size fractions according to Predicala et al. (2002). In a pig house most airborne bacteria were found in the particle size fraction > 4.0 µm AD, especially even about 80 % to 90 % for bacteria groups that include pathogens such as staphylococci or *Listeria*.

Clauß et al. (2011a) used a fluorescence microscopic method to investigate the number and size of bacteria-laden

Table 6

Mean percentages of colony forming units of different airborne micro-organisms in selected particle size fractions

Microorganism	Sampling Location	Median % per Stage		Reference
Membrane Filter + Cyclon Pre-impactor, Stage:		2	1	
Particle Sizes In Each Stage [µm]:		< 4.0	> 4.0	
Mesophilic Bacteria	Pig Houses	16	84	Predicala et al., 2002
<i>Staphylococcus spp.</i>	Pig Houses	12	88	Predicala et al., 2002
<i>Pseudomonas spp.</i>	Pig Houses	35	65	Predicala et al., 2002
<i>Bacillus spp.</i>	Pig Houses	13	87	Predicala et al., 2002
<i>Listeria spp.</i>	Pig Houses	18	82	Predicala et al., 2002
<i>Enterococcus spp.</i>	Pig Houses	7	93	Predicala et al., 2002
<i>Nocardia spp.</i>	Pig Houses	26	74	Predicala et al., 2002
<i>Lactobacillus spp.</i>	Pig Houses	54	46	Predicala et al., 2002
<i>Penicillium spp.</i>	Pig Houses	73	27	Predicala et al., 2002

particles as well as the number of cells on each of these particles in raw gas and clean gas of a three-stage biological air cleaning system in pig houses (Table 7). Of about 2000 investigated bacteria-laden particles in raw gas, only 40 % were < 10 µm. Most bacteria cells were found on particles between 80 µm and 100 µm. In clean gas more than 90 % of bacteria-laden particles were < 10 µm and none > 40 µm. Most bacteria cells were found on particles between 10 µm and 20 µm. Also in ambient air (urban, rural and forest areas) most bacteria cells can be found between 10 µm and 40 µm (Clauß et al., 2013b). Fisar et al. (1990) investigated the size distribution of cells of bacteria and yeasts and mould spores in urban ambient air by size-selective sampling and cell count analysis in the different impactor stages by light microscopy. Most bacteria cells could be found in the size class < 0.9 µm AD, most fungi between 0.9 µm AD and 2.0 µm AD. No information was given for size classes > 6.4 µm AD. Vestlund (2009) investigated the size distribution of micro-

organisms in composting facilities by sampling on filters and particle size analysis by scanning electron microscopy. He distinguished between “large cells” (fungi) and “small cells” (bacteria) and found that the small cells existed to 1 % to 70 % in aggregates with sizes of 1 µm to 5 µm subject to the sampling location, and most of the large cells in aggregates of 4 µm to 5 µm.

Recently an increasing number of studies investigated the distribution of airborne gene copies specific for diverse groups of micro-organisms in different particle size classes (Table 8). Lee and Liao (2014), Lecours et al. (2012) and Yamamoto et al. (2011) often found more than 90 % of the gene copies of different micro-organisms in the size range > 2 µm AD in different environments. Sippula et al. (2013) found 52 % to 93 % of gene copies in the size fraction > 2.4 µm AD in indoor and outdoor air. Quian et al. (2012) and Yamamoto et al. (2012) used an eight-stage Andersen sampler and found most gene copies of bacteria and moulds in particles

Table 7

Mean percentages of cell counts of different airborne bacteria, yeasts and moulds in selected particle size fractions

Microorganism	Sampling Location	Median % per Stage								Reference
Fluorescence Microscopic Method		0 - 5	6 - 10	11 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100	101 - 200	
Particle Size [µm]:										
Bacteria	Pig House Raw Gas	1	2	9	23	19	12	27	7	Clauß et al., 2011a
Bacteria	Pig House Clean Gas	6	34	59	1	0	0	0	0	Clauß et al., 2011a
Bacteria	Outdoor Air	13	16	22	27	13	2	7	n/a	Clauß et al., 2013b
May-Casella Impactor, Stage:		4		3		2		1		
Particle Sizes In Each Stage [µm]:		0.4 - 0.9		0.9 - 2.0		2.0 - 6.4		> 6.4		
Bacteria	Outdoor Air	54		28		18		n/a		Fisar et al., 1990
Yeasts	Outdoor Air	33		56		11		n/a		Fisar et al., 1990
Moulds	Outdoor Air	22		43		35		n/a		Fisar et al., 1990
Ten-stage MOUDI, Stages:		10 - 7	6	5	4	3 - 1				
Particle Sizes In Each Stage [µm]:		0.056 - 0.56	0.56 - 1.0	1.0 - 1.8	1.8 - 3.2	3.2 - 18.0				
Bacteria	Living Space	35	19	28	13	n/a				Kujundzic et al., 2006

Table 8

Study results on the number distribution of specific gene copies of different airborne micro-organisms in selected particle size fractions

Micro-organism	Sampling Location	Median % per Stage							Reference
Two-Stage Bio-Aerosol Cyclone, Stage:		3*	2	1					
Particle Sizes In Each Stage [µm]: *(afterfilter)		< 1.0	1.0 - 1.8	> 1.8					
<i>Moulds</i>	Agriculture	0	10	89					Lee and Liao, 2014
Two-Stage Bio-Aerosol Cyclone Modell BC251, Stage:		3*	2	1					
Particle Sizes In Each Stage [µm]: *(afterfilter)		0.4 - 0.41	0.41 - 2.1	> 2.1					
Bacteria	Cattle Farming	0	9	91					Lecours et al., 2012
Archaeobacteria	Cattle Farming	0	2	98					Lecours et al., 2012
Two-Stage Bio-Aerosol Cyclone Model BC221, Stage:		3*	2	1					
Particle Sizes In Each Stage [µm]: *(afterfilter)		< 1.6	1.6 - 2.6	> 2.6					
<i>Alternaria alternata</i>	Outdoor Air	0	1	99					Yamamoto et al., 2011
<i>Cladosporium cladosporoides</i>	Outdoor Air	1	0	99					Yamamoto et al., 2011
<i>Epicoccum nigrum</i>	Outdoor Air	0	1	99					Yamamoto et al., 2011
<i>Penicillium chrysogenum</i>	Outdoor Air	0	1	99					Yamamoto et al., 2011
Harvard High-Volume Cascade Impactor, Stages:		4	3	2+1					
Particle Sizes In Each Stage [µm]:		0.2 - 0.9	0.9 - 2.4	> 2.4					
Total Bacteria	Indoor and Outdoor Air	1	23	77					Sippula et al., 2013
<i>Cladosporium cladosporoides</i>	Indoor and Outdoor Air	0	7	93					Sippula et al., 2013
<i>Mycobacterium spp.</i>	Indoor and Outdoor Air	0	9	90					Sippula et al., 2013
<i>Penicillium/Aspergillus spp.</i>	Indoor and Outdoor Air	0	25	75					Sippula et al., 2013
<i>Streptomyces spp.</i>	Indoor and Outdoor Air	0	45	52					Sippula et al., 2013
Eight-Stage Andersen-Sampler MKII, Stages:		7+6	5	4	3	2	1	0	
Particle Sizes In Each Stage [µm]: *(pre-separator Cut-off)		0.4 - 1.1	1.1 - 2.1	2.1 - 3.3	3.3 - 4.7	4.7 - 5.6	5.6 - 9.0	9.0 -10*	
Bacteria	Indoor and Outdoor Air	2	5	25	25	25	10		Quian et al., 2012
Fungi	Indoor and Outdoor Air	2	5	23	37	23	13		Quian et al., 2012
<i>Aspergillus fumigatus/ Neosartorya fischeri</i>	Outdoor Air (20 m)	n/a	n/a	7	22	12	6	2	Yamamoto et al., 2012
<i>Penicillium spp</i>	Outdoor Air (20 m)	n/a	n/a	15	62	8	15	0	Yamamoto et al., 2012
<i>Aspergillus/Penicillium</i>	Outdoor Air (20 m)	n/a	n/a	18	44	25	11	2	Yamamoto et al., 2012
<i>Cladosporium cladosporoides</i>	Outdoor Air (20 m)	n/a	n/a	11	42	21	21	5	Yamamoto et al., 2012
<i>Alternaria alternata</i>	Outdoor Air (20 m)	n/a	n/a	0	0	5	30	66	Yamamoto et al., 2012
<i>Epicoccum nigrum</i>	Outdoor Air (20 m)	n/a	n/a	0	0	6	32	61	Yamamoto et al., 2012
Ten-Stage MOUDI, Stages:		10 - 1							
Particle Sizes In Each Stage [µm]:		0.056 - 18.0							
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Whirlpools	All Stages Positive							Schafer et al., 2003

measuring between 3.3 µm AD and 10 µm AD. Once more this is for the moulds in the range of their spore sizes. Schafer et al. (2003) found in the air above whirlpools gene copies of *Mycobacterium tuberculosis* in the size range of 0.056 µm AD to 10 µm AD. This is an indication for gene copies existing in the airborne state independent from intact cells because the cell size of the rod-shaped bacterium is about 0.5 µm x 2.0 µm.

Finally two general points should be kept in mind: The different stages of all size selective sampling systems with their defined cut-points do not mean an insuperable

obstacle for larger particles. Depending on the mass-based cut-off curves, also larger particles reach the final stages of the sampling systems and may influence the results. For example Madsen et al. (2009) found considerable amounts of culturable moulds in the PM₁ dust fraction sampled by a triplex-cyclone. The second point, and important in regard to the possible health effects of biological particles, is that besides pathogenic micro-organisms with cell sizes of rarely < 0.5 µm, also other harmful cell components such as allergens from moulds (Cho et al., 2005; Górny et al., 2002; Madsen et al., 2009; Reponen et al., 2007) or endotoxins

(Attwood et al., 1986; Kujundzic et al., 2006; Monn und Becker, 1999; Olenchock et al., 1982) can be found, especially in smaller particle size classes.

4 Conclusion and outlook

The size distribution of airborne particles carrying culturable micro-organisms in the range of 0.65 µm AD to 12 µm AD has been well investigated for many micro-organism groups and environments depending on the available size selective sampling systems. It depends primarily on the sampling location, or rather the environment, and here presumably on the kind of source for airborne micro-organisms and the method of aerosolisation. Also sampling height above ground, air humidity, temperature and solar radiation may have an influence. For moulds the found median size distributions in air largely represent the size ranges of spores of the detected groups or species. There is a lack of information for particles > 12 µm AD and especially > 20 µm AD, due to limitations of the size selective sampling systems that were used. There is also little knowledge concerning the actual number of micro-organisms (cfu and cell count) in the different particles size classes. A few studies suggest that depending on the environment most micro-organisms are in the particle size fraction > 10 µm. In future investigations preferably size selective sampling systems should be used that have high inlet efficiencies for particles > 20 µm AD and that allow sampling in a liquid to separate micro-organisms from aggregates. In addition, these systems should sample rather the medical and environmental relevant particle size fractions PM 2.5, PM 4, PM 10 and the total dust.

References

- Aarnink AJA, Roest HJJ, Cambra-Lopez M, Zhao Y, Mosquera J, Ogink NWM (2012) Emissions and concentrations of dust and pathogens from goat houses. In: ASABE (ed) Ninth International Livestock Environment Symposium 2012: Valencia, Spain, 8-12 July 2012. Red Hook NY: Curran, pp 1-7
- Abdel Hameed AA, Abdulazim A, Mostafa M, Kamel EG (2007) Evaluation of fungal and bacterial aerosols in cotton dust in a spin factory in El-Minia City and its relation to pulmonary function changes among workers. *Egypt J Medic Microbiol* 16(2):351-363
- Adell E, Moset V, Zhao Y, Cerisuelo A, Cambra-López M (2011a) Concentración, distribución espacial y por tamaño de bacterias aerobias mesófilas en el aire de granjas de broilers. *ITEA* 107(2):77-93
- Adell E, Moset V, Zhao Y, Cerisuelo A, Cambra-López M (2011b) Concentración de bacterias aerobias mesófilas y material particulado en el aire de granjas de broilers. In: XIV Jornadas sobre Producción Animal: 17 y 18 de mayo de 2011, Zaragoza: tomo I. Zaragoza: AIDA, pp 82-84
- Aengst C (1984) Zur Zusammensetzung des Staubes in einem Schweinestall. Hannover: TiHo, 57 p
- Alvarado CS, Gandara A, Flores C, Perez HR, Green CF, Hurd WW, Gibbs SG (2009) Seasonal changes in airborne fungi and bacteria at a dairy cattle concentrated animal feeding operation in the southwest United States. *J Environ Health* 71(9):40-44
- Andersen A (1958) Andersen sampler for the collection, sizing and evaluation of viable airborne particles. *J Bacteriol* 76:471-484
- Asking L, Olsson B (1997) Calibration at different flow rates of a multistage liquid impinger. *Aerosol Sci Technol* 27(1):39-49
- Attwood P, Versloot P, Heederik D, de Wit R, Boleij JSM (1986) Assessment of dust and endotoxin levels in the working environment of Dutch pig farmers: a preliminary study. *Ann Occup Hyg* 30:201-208
- Awad AH, Gibbs SG, Tarwater PM, Casillas ME, Green CF (2013) Seasonal evaluation of fine and coarse culturable bacterial aerosols from residences within a rural and an urban city in Egypt. *Int J Environ Health Res* 23(4):269-280
- Batel W (1972) *Entstaubungstechnik: Grundlagen, Verfahren, Meßwesen*. Berlin: Springer, 276 p
- Bausum HT, Schaub SA, Kenyon KF, Small MJ (1982) Comparison of coliphage and bacterial aerosols at a wastewater spray irrigation site. *Appl Environ Microbiol* 43(1):28-38
- Bergey DH, Buchanan RE, Gibbons NE (1974) *Bergey's manual of determinative bacteriology*. Baltimore: Williams & Wilkins, 1246 p
- Blachere FM, Lindsley WG, Slaven JE, Green BJ, Anderson SE, Chen BT, Beezhold DH (2007) Bioaerosol sampling for the detection of aerosolized influenza virus. *Influenza Other Respir Viruses* 1(3):113-120
- Blachere FM, Lindsley WG, Pearce TA, Anderson SE, Fisher M, Khakoo R, Meade BJ, Lander O, Davis S, Thewlis RE, Celik I, Chen BT, Beezhold DH (2009) Measurement of airborne influenza virus in a hospital emergency department. *Clin Infect Dis* 48:438-440
- Blachere FM, Cao G, Lindsley WG, Noti JD, Beezhold DH (2011) Enhanced detection of infectious airborne influenza virus. *J Virol Methods* 176:120-124
- Blanchard DC, Syzdek LD (1972) Concentration of bacteria in jet-drops from bursting bubbles. *J Geophys Res* 77(5):1229-1232
- Bollin GE, Plouffe JF, Para MF, Hackman B (1985) Aerosols containing *Legionella pneumophila* generated by shower heads and hot-water faucets. *Appl Environ Microbiol* 50(5):1128-1131
- Bourdillon RB, Lidwell OM, Lovelock JE (1948) *Studies in air hygiene*. London: HMSO, 356 p, Spec Rep Ser / Medical Res Council 262
- Bovallius A, Bucht B, Roffey R, Anäs P (1978a) Three-year investigation of the natural airborne bacterial flora at four localities in Sweden. *Appl Environ Microbiol* 35(5):847-852
- Bovallius A, Bucht B, Roffey R, Anäs P (1978b) Long-range air transmission of bacteria. *Appl Environ Microbiol* 35(6):1231-1232
- Brandi G, Sisti M, Amagliani G (2000) Evaluation of the environmental impact of microbial aerosols generated by wastewater treatment plants utilizing different aeration systems. *J Appl Microbiol* 88(5):845-852
- Burge HP, Boise JR, Rutherford JA, Solomon WR (1977) Comparative recoveries of airborne fungus spores by viable and non-viable modes of volumetric collection. *Mycopathologia* 61(1):27-33
- Burrows SM, Butler T, Jöckel P, Tost H, Kerkweg A, Pöschl U, Lawrence MG (2009) Bacteria in the global atmosphere: part 2: Modeling of emissions and transport between different ecosystems. *Atmos Chem Phys* 9:9281-9297
- Butera M, Smith JH, Morrison WD, Hacker RR, Kains FA, Ogilvie JR (1991) Concentration of respirable dust and bioaerosols and identification of certain microbial types in a hog-growing facility. *Can J Anim Sci* 71(2):271-277
- Byeon JH, Park CW, Yoon KY, Park JH, Hwang J (2008) Size distributions of total airborne particles and bioaerosols in a municipal composting facility. *Bioresour Technol* 99(11):5150-5154
- Cao G, Noti JD, Blachere FM, Lindsley WG, Beezhold DH (2011) Development of an improved methodology to detect infectious airborne influenza virus using the NIOSH bioaerosol sampler. *J Environ Monit* 13(12):3321-3328
- Chai T, Zhao Y, Liu H, Liu W, Huang Y, Yin M, Li W (2001) Studies on the concentration and aerodynamic diameters of microbiological aerosol in the poultry house. *Chinese J Vet Med* 37(3):9-11 [in Chinese]
- Che F, Hu Q, Meng L, Li J (1992) Particle diameter of the airborne micro-organisms over Beijing and Tianjin area. *Aerobiologia* 8(2):297-300
- Chen BT, Feather GA, Maynard A, Rao CY (2004) Development of a personal sampler for collecting fungal spores. *Aerosol Sci Technol* 38(9):926-937
- Chen XY, Bi XH, Sheng GY, Fu JZ, Li B (2008) Bacterium aerosol grain-size distribution characteristics indoor and outdoor Guangzhou ordinary residential district room. *China Tropical Med* 2:201-203 [in Chinese]
- Chen SC, Tsai CJ, Chen HD, Huang CY, Roam GD (2011) The influence of relative humidity on nanoparticle concentration and particle mass distribution measurements by the MOUDI. *Aerosol Sci Technol* 45(5):596-603

- Chen X, Ran P, Ho K, Lu W, Li B, Gu Z, Song C, Wang J (2012) Concentrations and size distributions of airborne microorganisms in Guangzhou during summer. *Aerosol Air Quality Res* 12(6):1336-1344
- Cheng YS (2003) Aerosol deposition in the extrathoracic region. *Aerosol Sci Technol* 37(8):659-671
- Chien YC, Chen CJ, Lin T-H, Chen SH, Chien YC (2011) Characteristics of microbial aerosols released from chicken and swine feces. *J Air Waste Management Assoc* 61(8):882-889
- Chinivasagam HN, Blackall PJ (2005) Investigation and application of methods for enumerating heterotrophs and *Escherichia coli* in the air within piggy sheds. *J Appl Microbiol* 98(5):1137-1145
- Cho S-H, Seo S-C, Schmechel D, Grinshpun SA, Reponen T (2005) Aerodynamic characteristics and respiratory deposition of fungal fragments. *Atmos Environ* 39(39):5454-5465
- Clark S, Rylander R, Larsson L (1983) Airborne bacteria, endotoxin and fungi in dust in poultry and swine confinement buildings. *Am Ind Hyg Assoc J* 44(7):537-541
- Clauß M (2006) Higher effectiveness of photoinactivation of bacterial spores, UV resistant bacteria and mold spores with 222 nm compared to 254 nm wavelength. *Acta Hydrochim Hydrobiol* 34:525-532
- Clauß M, Springorum AC, Hartung J (2011a) Microscopic analysis of size, structure and amount of particulate bio-aerosols directly sampled from raw and clean gas of an exhaust air bio-washer in a pig fattening unit. In: Köfer J, Schobesberger H (eds) XVth International Congress 2011 : animal hygiene and sustainable livestock production ; innovations in hygiene, nutrition and housing for healthy food from healthy animals : vol. 2. Brno : ISAH, pp 789-791
- Clauß M, Springorum AC, Hartung J (2011b) Size and composition of airborne bacteria aggregates collected in animal house air. In: Köfer J, Schobesberger H (eds) XVth International Congress 2011 : animal hygiene and sustainable livestock production ; innovations in hygiene, nutrition and housing for healthy food from healthy animals : vol. 2. Brno : ISAH, pp 797-799
- Clauß M, Hoppe A, Hartung J (2013a) Fluorescence microscopic investigation of airborne particles and micro-organisms in an exhibition hall during an international trade fair. *Gefahrstoffe-Reinhaltung Luft* 73(5):220-226
- Clauß M, Springorum AC, Hartung J (2013b) Jahresverlauf der Hintergrundkonzentrationen verschiedener Gruppen luftgetragener Mikroorganismen in einem urbanen, einem Agrar- und einem Forstgebiet in Norddeutschland. *Gefahrstoffe-Reinhaltung Luft* 73(9):375-380
- Coggins MA, Hogan VJ, Kelly M, Fleming G, Roberts N, Tynan T, Thorne PS (2012) Workplace exposure to bioaerosols in podiatry clinics. *Ann Occup Hyg* 56(6):746-753
- Colbeck I, Nasir ZA (2009) Concentration and size distribution of bioaerosols in different residential categories [online]. To be found at <<http://www.gaef.de/eac2009/EAC2009abstracts/T10%20Particle-lung-interaction/T10A04.pdf>> [quoted 03.09.2015]
- Cormier Y, Tremblay G, Meriaux A, Brochu G, Lavoie J (1990) Airborne microbial contents in two types of swine confinement buildings in Quebec. *Am Ind Hyg Assoc J* 51(6):304-309
- Curtis SE, Drummond JG, Grunloh DJ, Lynch PB, Jensen AH (1975) Relative and qualitative aspects of aerial bacteria and dust in swine houses. *J Anim Sci* 41(5):1512-1520
- Curtis SE, Balsbaugh RK, Drummond JG (1978) Comparison of Andersen eight-stage and two-stage viable air samplers. *Appl Environ Microbiol* 35(1):208-209
- Deacon LJ, Pankhurst LJ, Drew GH, Hayes ET, Jackson S, Longhurst PJ, Longhurst JWS, Liu J, Pollard SJ, Tyrrel SF (2009) Particle size distribution of airborne *Aspergillus fumigatus* spores emitted from compost using membrane filtration. *Atmos Environ* 43(35):5698-5701
- De Hoog GS, Cuaro GJ, Gene J, Figueras MJ (2000) Atlas of clinical fungi. Utrecht : Centraalbureau Schimmelcultures, 1126 p
- Demokritou P, Kavouras IG, Ferguson ST, Koutrakis P (2002) Development of a high volume cascade impactor for toxicological and chemical characterization studies. *Aerosol Sci Technol* 36:925-933
- DIN EN 481 (1993) Workplace atmosphere : size fraction definitions for measurement of airborne particles. Berlin : Beuth, 7 p, DIN-EN-Normen 00481
- DIN EN 12341 (1999) Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM10 or PM25 mass concentration of suspended particulate matter. Berlin : Beuth
- DIN ISO 7708 (1996) Luftbeschaffenheit – Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme. Berlin : Beuth
- Donaldson AI, Pringle NP, Ferris NP (1977) The inactivation of lipid-containing viruses in a multistage liquid impinger (May sampler). *FEMS Microbiol Letters* 2(1):35-37
- Duguid JP (1946) The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. *J Hyg* 44(6):471-479
- Dutkiewicz J, Kwapiszewski C (1975) Nowy aparat do badania mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza. *Ochr Powietrza* 9(2):37-42
- Dutkiewicz J, Pomorski ZJH, Sitkowska J, Krysińska-Traczyk E, Skórska C, Prazmo Z, Cholewa G, Wójtowicz H (1994) Airborne microorganisms and endotoxin in animal houses. *Grana* 33(2):85-90
- Dutkiewicz J, Krysińska-Traczyk E, Skórska C, Sitkowska J, Prazmo Z, Urbanowicz B (2000) Exposure of agricultural workers to airborne microorganisms and endotoxin during handling of various vegetable products. *Aerobiologia* 16(2):193-198
- Dutkiewicz J, Krysińska-Traczyk E, Prazmo Z, Skórska C, Sitkowska J (2001a) Exposure to airborne microorganisms in Polish sawmills. *Ann Agric Environ Med* 8(1):71-80
- Dutkiewicz J, Krysińska-Traczyk E, Skórska C, Sitkowska J, Prazmo Z, Golec M (2001b) Exposure to airborne microorganisms and endotoxin in herb processing plants. *Ann Agric Environ Med* 8(2):201-211
- Dutkiewicz J, Krysińska-Traczyk E, Skórska C, Cholewa G, Sitkowska J (2002) Exposure to airborne microorganisms and endotoxin in a potato processing plant. *Ann Agric Environ Med* 9(2):225-235
- Eiguren-Fernandez A, Miguel AH, Jaques PA, Sioutas C (2003) Evaluation of a Denuder-MOUDI-PUF sampling system to measure the size distribution of semi-volatile polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere. *Aerosol Sci Technol* 37(3):201-209
- Fang ZG, Ouyang ZY, Hu LF, Wang XK, Lin XQ (2005) Study on median diameters and size distributions of airborne microbes in three functional regions in Beijing. *Acta Ecol Sinica* 25(12):3220-3224 [in Chinese]
- Fang Z, Ouyang Z, Zheng H, Wang X (2008) Concentration and size distribution of culturable airborne microorganisms in outdoor environments in Beijing, China. *Aerosol Sci Technol* 42(5):325-334
- Fang ZG, Sun P, Ouyang ZY, Liu P, Sun L, Wang XY (2013) Studies on the size distribution of airborne microbes at home in Beijing. *Huan Jing Ke Xue* 34(7):2526-2532 [in Chinese]
- Ferguson DD (2012) Assessment and mitigation of airborne transmission of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in animal feeding operations and the outdoor environment. Iowa City : Univ Iowa
- Fernstrom A, Goldblatt M (2013) Aerobiology and its role in the transmission of infectious diseases. *J Pathogens* 2013(6):1-13
- Fisar Z, Hysek J, Binek B (1990) Quantification of airborne microorganisms and investigation of their interactions with non-living particles. *Int J Biometeorol* 34:189-193
- Frączek T, Grzyb J (2010) Analyses of bacterial aerosol occurring in health resorts in Bochnia and Szczawnica. *Ecol Chem Eng* 17(1):55-64
- Fulton JD (1966) Microorganisms of the upper atmosphere : V. Relationship between frontal activity and the micropopulation at altitude. *Appl Microbiol* 14:245-250
- Gillespie VL, Clark CS, Bjornson HS, Samuels SJ, Holland JW (1981) A comparison of two-stage and six-stage Andersen impactors for viable aerosols. *Am Ind Hyg Ass J* 42(12):858-864
- Glysson EA, Schleyer CA, Leonard D (1974) The microbiological quality of the air in an incinerator environment [online]. To be found at <<http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/nawtec/1974-National-Incinerator-Conference/1974-National-Incinerator-Conference-07.pdf>> [quoted 07.09.2015]
- Gołofit-Szymczak M, Górny RL (2010) Bacterial and fungal aerosols in air-conditioned office buildings in Warsaw, Poland-the winter season. *Int J Occup Saf Ergon* 16(4):465-476
- Górny RL, Dutkiewicz J, Krysińska-Traczyk E (1999) Size distribution of bacterial and fungal bioaerosols in indoor air. *Ann Agric Environ Med* 6(2):105-113

- Górny RL, Reponen T, Willeke K, Schmechel D, Robine E, Boissier M, Grinshpun SA (2002) Fungal fragments as indoor air biocontaminants. *Appl Environ Microbiol* 68(7):3522-3531
- Gralton J, Tovey E, McLaws ML, Rawlinson WD (2011) The role of particle size in aerosolised pathogen transmission : a review. *J Infect* 62(1):1-13
- Gregory PH (1961) The microbiology of the atmosphere. London : Hill, 251 p
- Grigorevski-Lima AL, Silva-Filho RG, Linhares LF, Coelho RRR (2006) Occurrence of actinomycetes in indoor air in Rio de Janeiro, Brazil. *Build Environ* 41(11):1540-1543
- Hambraeus A, Benediktsdottir E (1980) Airborne non-sporeforming anaerobic bacteria. *J Hyg* 84:181-189
- Hara K, Zhang D, Yamada M, Matsusaki H, Arizono K (2011) A detection of airborne particles carrying viable bacteria in an urban atmosphere of Japan. *Asian J Atmos Environ* 5(3):152-156
- Hesse W (1884) Ueber Abscheidung der Mikroorganismen aus der Luft. *Dtsch Med Wochenschr* 2:17-20
- Hesse W (1888) Bemerkungen zur quantitativen Bestimmung der Mikroorganismen in der Luft. *Z Hygiene* 4(1):19-21
- Heikkilä P, Salmi T, Kotimaa M (1988) Identification and counting of fungal spores by scanning electron microscopy. *Scand J Work Environ Health* 14(1):66-67
- Heo Y, Park J, Lim S-I, Hur HG, Kim D, Park K (2010) Size-resolved culturable airborne bacteria sampled in rice field, sanitary landfill, and waste incineration sites. *J Environ Monit* 12(8):1619-1624
- Hill RA, Wilson DM, Burg WR, Shotwell OL (1984) Viable fungi in corn dust. *Appl Environ Microbiol* 47(1):84-87
- Hinds WC (1999) Aerosol technology. New York : Wiley, 424 p
- Hu QX, Xu XZ, Chen ML (1994a) Study on airborne microbes : median diameters and size distributions of airborne bacteria. *Environ Mon China* 19(6):37-39 [in Chinese]
- Hu Q, Xu X, Tong Y, Che F, Cai Z, Lu Z, Wen Q, He Y (1994b) Study on atmospheric microbes in Shengyang : IV Size distribution and count median diameter (CMD) of airborne fungous particles. *Environ Mon China* 19(6):37-39 [in Chinese]
- Hyvärinen A, Vahteristo M, Meklin T, Jantunen M, Nevalainen A, Moschandreas D (2001) Temporal and spatial variation of fungal concentrations in indoor air. *Aerosol Sci Technol* 35(2):688-695
- Ingold CT (1984) The biology of fungi. London : Hutchinson, 150 p
- Jaenicke R, Junge C (1967) Studien zur oberen Grenzgröße des natürlichen Aerosols. *Beitr Phys Atmos* 40:129-143
- Jaenicke R, Blifford IH (1974) The influence of aerosol characteristics on the calibration of impactors. *J Aerosol Sci* 5:457-464
- Jensen PA, Todd WF, Davis GN, Scarpino PV (1992) Evaluation of eight bioaerosol samplers challenged with aerosols of free bacteria. *Am Ind Hyg Assoc J* 53(10):660-667
- Jones BL, Cookson JT (1983) Natural atmospheric microbial conditions in a typical suburban area. *Appl Environ Microbiol* 45(3):919-934
- Jones AM, Harrison RM (2004) The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations : a review. *Sci Total Environ* 326(1-3):151-180
- Kanaani H, Hargreaves M, Ristovski Z, Morawska L (2009) Fungal spore fragmentation as a function of airflow rates and fungal generation methods. *Atmos Environ* 43(24):3725-3735
- Kauppinen E, Jäppinen A, Hillamo R, Rautio-Lehtimäki A, Koivikko A (1989) A static particle size selective bioaerosol sampler for the ambient atmosphere. *J Aerosol Sci* 20(7):829-838
- Kenny LC, Stancliffe JD, Crook B, Stagg S, Griffiths WD, Stewart IW, Fitter SJ (1998) The adaptation of existing personal inhalable aerosol samplers for bioaerosol sampling. *Am Ind Hyg Assoc J* 59:831-841
- Kenny LC, Bowry A, Crook B, Stancliffe JD (1999) Field testing of a personal size-selective bioaerosol sampler. *Ann Occup Hyg* 43(6):393-404
- Kethley T, Cown WB, Fincher EL (1963) Adequate expression for average particle size of microbiological aerosols. *Appl Microbiol* 11:188-189
- Kim KY, Kim CN (2007) Airborne microbiological characteristics in public buildings of Korea. *Build Environ* 42(2007):2188-2196
- Kim KY, Lee CR, Kim CN, Won JU, Roh J (2006) Size-based characteristics of airborne bacteria and fungi distributed in the general hospital. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 16(2):101-109
- Kim KY, Kim HT, Kim D, Nakajima J, Higuchi T (2009) Distribution characteristics of airborne bacteria and fungi in the feedstuff-manufacturing factories. *J Hazard Mater* 169(1-3):1054-1060
- Kim KY, Kim YS, Kim D (2010) Distribution characteristics of airborne bacteria and fungi in the general hospitals of Korea. *Ind Health* 48(2):236-243
- Kim KY, Ko HJ, Kim D (2012) Assessment of airborne microorganisms in a swine wastewater treatment plant. *Environ Eng Res* 17(4):211-216
- King MD, McFarland AR (2012) Use of an Andersen bioaerosol sampler to simultaneously provide culturable particle and culturable organism size distributions. *Aerosol Sci Technol* 46(8):852-861
- Ko G, First MW, Burge HA (2000) Influence of relative humidity on particle size and UV sensitivity of *Serratia marcescens* and *Mycobacterium bovis* BCG aerosols. *Tubercle Lung Dis* 80(4/5):217-228
- Krysińska-Traczyk E, Skórska C, Cholewa G, Sitkowska J, Milanowski J, Dutkiewicz J (2002) Exposure to airborne microorganisms in furniture factories. *Ann Agric Environ Med* 9(1):85-90
- Krysińska-Traczyk E, Skórska C, Prazmo Z, Sitkowska J, Cholewa G, Dutkiewicz J (2004) Exposure to airborne microorganisms, dust and endotoxin during flax scutching on farms. *Ann Agric Environ Med* 11(2):309-317
- Kujundzic E, Hernandez M, Miller SL (2006) Particle size distributions and concentrations of airborne endotoxin using novel collection methods in homes during the winter and summer seasons. *Indoor Air* 16(3):216-226
- Kundsinn RB (1968) Aerosols of mycoplasmas, L forms and bacteria : comparison of particle size, viability, and lethality of ultraviolet radiation. *Appl Microbiol* 16(1):143-146
- Lacey J (1973) The air spora of a Portuguese cork factory. *Ann Occup Hyg* 16(3):223-230
- Laitinen S, Kangas J, Kotimaa M, Liesivuori J, Martikainen PJ, Nevalainen A, Sarantila R, Husman K (1994) Workers' exposure to airborne bacteria and endotoxins at industrial wastewater treatment plants. *Am Ind Hyg Assoc J* 55(11):1055-1060
- Lecours PB, Veillette M, Marsolais D, Duchaine C (2012) Characterization of bioaerosols from dairy barns : reconstructing the puzzle of occupational respiratory diseases by using molecular approaches. *Appl Environ Microbiol* 78(9):3242-3248
- Lee SA, Liao CH (2014) Size-selective assessment of agricultural workers' personal exposure to airborne fungi and fungal fragments. *Sci Total Environ* 466-467:725-732
- Lembke L, Kniseley RN, Craig R, van Nostrand RC, Hale MD (1981) Precision of the all-glass impinger and the Andersen microbial impactor for air sampling in solid-waste handling facilities. *Appl Environ Microbiol* 42(2):222-225
- Lenhart SW, Olenchok SA, Cole EC (1982) Viable sampling for airborne bacteria in a poultry processing plant. *J Toxicol Environ Health* 10(4-5):613-619
- Lester BR (2008) Comparison of occupational and environmental exposures at Colorado dairies. Fort Collins : Colorado State Univ, pp 29-53
- Lewis HE, Foster AR, Mullan BJ, Cox RN, Clark RP (1969) Aerodynamics of the human microenvironment. *Lancet* 293(7609):1273-1277
- Li M, Qi J, Zhang H, Huang S, Li L, Gao D (2011) Concentration and size distribution of bioaerosols in an outdoor environment in the Qingdao coastal region. *Sci Total Environ* 409(19):3812-3819
- Li Y, Qiu X, Li M, Ma Z, Niu T, Feng Y (2012) Concentration and size distribution of airborne actinomycetes in a municipal wastewater treatment plant. *Pol J Environ Stud* 21(5):1305-1311
- Li Y, Yang L, Meng Q, Qiu X, Feng Y (2013) Emission characteristics of microbial aerosols in a municipal sewage treatment plant in Xi'an, China. *Aerosol Air Quality Res* 13(1):343-349
- Lidwell OM (1959) Impaction sampler for size grading air-borne bacteria-carrying particles. *J Sci Instrum* 36(1):3
- Lidwell OM (1965) A modification of the Andersen sampler for use in occupied environments. *J Appl Bact* 28(2):280-282
- Lighthart B, Shaffer BT, Marthi B, Ganio LM (1993) Artificial wind-gust liberation of microbial bioaerosols previously deposited on plants. *Aerobiologia* 9:189-196
- Lighthart B, Shaffer BT (1995) Viable bacterial aerosol particle size distributions in the midsummer atmosphere at an isolated location in the high desert chaparral. *Aerobiologia* 11(1):19-25

- Lighthart B, Shaffer BT (1997) Increased airborne bacterial survival as a function of particle content and size. *Aerosol Sci Technol* 27(3):439-446
- Lighthart B (1997) The ecology of bacteria in the alfresco atmosphere. *FEMS Microbiol Ecol* 23(4):263-274
- Lin WH, Li CS (1996) Size characteristics of fungus allergens in the subtropical climate. *Aerosol Sci Technol* 25(2):93-100
- Lindsley WG, Schmechel D, Chen BT (2006) A two-stage cyclone using micro-centrifuge tubes for personal bioaerosol sampling. *J Environ Monit* 8(11):1136-1142
- Lippmann M (1959) Review of cascade impactors for particle size analysis and a new calibration for the Casella cascade impactor. *Am Ind Hyg Assoc J* 20:406-416
- Lis DO, Mainelis G, Górný RL (2008) Microbial air contamination in farm-houses : quantitative aspects. *CLEAN Soil Air Water* 36(7):551-555
- Liu JW, Ma W-L (2010) Characteristics of microbial aerosol pollution in pig houses. *Anim Hus Feed Sci* 2(6/7):41-44
- Loudon RG, Roberts RM (1967) Droplet expulsion from the respiratory tract. *Am Rev Respir Dis* 95(3):435-442
- Lundholm IM (1982) Comparison of methods for quantitative determinations of airborne bacteria and evaluation of total viable counts. *Appl Environ Microbiol* 44(1):179-183
- Macher JM, Hansson H-C (1987) Personal size-separating impactor for sampling microbiological aerosols. *Am Ind Hyg Assoc J* 48(7):652-655
- Macher JM (1989) Positive-hole correction of multiple-jet impactors for collecting viable microorganisms. *Am Ind Hyg Assoc J* 50(11):561-568
- Madelin TM, Johnson HE (1992) Fungal and actinomycete spore aerosols measured at different humidities with an aerodynamic particle sizer. *J Appl Bacteriol* 72(5):400-409
- Madsen AM, Schlünssen V, Olsen T, Sigsgaard T, Avci H (2009) Airborne fungal and bacterial components in PM1 dust from biofuel plants. *Ann Occup Hyg* 53(7):749-757
- Marchisio VF, Caramiello R, Mariuzza L (1989) Outdoor airborne fungi : sampling strategies. *Aerobiologia* 5(2):145-153
- Mark D, Vincent JH (1986) A new personal sampler for airborne total dust in workplaces. *Ann Occup Hyg* 30(1):89-102
- Marple VA (1970) A fundamental study of inertial impactors. *Ann Arbor : Univ Minnesota*
- Marple VA, Rubow KL, Behm SM (1991) A microorifice uniform deposit impactor (MOUDI) : description, calibration, and use. *Aerosol Sci Technol* 14:434-446
- Matthias-Maser S, Jaenicke R (1994) Examination of atmospheric bioaerosol particles with radii > 02 µm. *J Aerosol Sci* 25(8):1605-1613
- Matthias-Maser S, Jaenicke R (1995) The size distribution of primary biological aerosol particles with radii > 02 µm in an urban/rural influenced region. *Atmos Res* 39(4):279-286
- Matthias-Maser S, Jaenicke R (2000) The size distribution of primary biological aerosol particles in the multiphase atmosphere. *Aerobiologia* 16(2):207-210
- May KR (1945) The cascade impactor : an instrument for sampling coarse aerosols. *J Sci Instrum* 22:187
- May KR (1964) Calibration of a modified Andersen bacterial aerosol sampler. *Appl Microbiol* 12(1):37-43
- May KR (1966) Multistage liquid impinge. *Bacteriol Rev* 30(3):559-570
- May KR, Druett HA (1953) The Pre-Impinger : a selective aerosol sampler. *Br J Ind Med* 10(3):142-151
- May KR, Druett HA (1968) A microthread technique for studying the viability of microbes in a simulated airborne state. *J Gen Microbiol* 51:353-367
- McFarland AR (1977) Wind tunnel evaluation of a modified Andersen impactor and an all weather sampler inlet. *Atmos Environ* 11(6):535-539
- McMurry PH, Zhang XQ (1989) Size distributions of ambient organic and elemental carbon. *Aerosol Sci Technol* 10(2):430-437
- Meklin T, Reponen T, Toivola M, Koponen V, Husman T, Hyvärinen A, Nevalainen A (2002) Size distributions of airborne microbes in moisture-damaged and reference school buildings of two construction types. *Atmos Environ* 36(39-40):6031-6039
- Meredith DS (1973) Significance of spore release and dispersal mechanisms in plant disease epidemiology. *Ann Rev Phytopathol* 11:313-342
- Millner PD, Bassett DA, Marsh PB (1980) Dispersal of *Aspergillus fumigatus* from sewage sludge compost piles subjected to mechanical agitation in open air. *Appl Environ Microbiol* 39(5):1000-1009
- Miller FJ, Martonen TB, Menache MG, Graham RC, Spektor DM, Lippmann M (1988) Influence of breathing mode and activity level on the regional deposition of inhaled particles and implications for regulatory standards. *Inhaled particles. Ann Occup Hyg* 32:3-10
- Mitchell JP, Nagel MW (2003) Cascade impactors for the size characterization of aerosols from medical inhalers : their uses and limitations. *J Aerosol Med* 16(4):341-377
- Monn C, Becker S (1999) Cytotoxicity and induction of proinflammatory cytokines from human monocytes exposed to fine (PM25) and coarse particles (PM10-25) in outdoor and indoor air. *Toxicol Appl Pharmacol* 155:245-252
- Moschandreas D, Cha D, Qian J (1996) Measurement of indoor bioaerosol levels by a direct counting method. *J Environ Eng* 122(5):374-378
- Moschandreas DJ, Pagilla KR, Storino LV (2003) Time and space uniformity of indoor bacteria concentrations in Chicago area residences. *Aerosol Sci Technol* 37(11):899-906
- Mota LC, Gibbs SG, Green CF, Payan F, Tarwater PM, Ortiz M, Nasir ZA, Colbeck I (2008a) Characterization of seasonal indoor and outdoor bioaerosols in the arid environment of El Paso, Texas. *J Environ Health* 70(10):48-53
- Mota LC, Gibb SG, Green CF, Flores CM, Tarwater PM, Ortiz M (2008b) Seasonal fine and coarse culturable fungal constituents and concentrations from indoor and outdoor air samples taken from an arid environment. *J Occup Environ Hyg* 5(8):511-518
- Nasir ZA, Colbeck I (2010) Assessment of bacterial and fungal aerosol in different residential settings. *Water Air Soil Pollut* 211(1-4):367-377
- Nasir ZA, Colbeck I (2012) Winter time concentrations and size distribution of bioaerosols in different residential settings in the UK. *Water Air Soil Pollut* 223:5613-5622
- Nasir ZA, Colbeck I, Sikander S, Shakil A (2012) Bioaerosols in residential micro-environments in low income countries : a case study from Pakistan. *Environ Poll* 168:15-22
- Nasir ZA, Mula V, Stokoe J, Colbeck I, Loeffler M (2013) Evaluation of total concentration and size distribution of bacterial and fungal aerosol in healthcare built environments. *Indoor Build Environ* 24(2):269-279, doi: 10.1177/1420326X13510925
- Nicas M, Nazaroff WW, Hubbard A (2005) Toward understanding the risk of secondary airborne infection : emission of respirable pathogens. *J Occup Environ Hyg* 2(3):143-154
- Noble WC (1961) The size distribution of airborne particles carrying *Clostridium welchii*. *J Path Bact* 81(2):523-526
- Noble WC, Lidwell OM, Kingston D (1963a) The size distribution of airborne particles carrying micro-organisms. *J Hyg* 61(4):385-391
- Noble WC, Clayton YM (1963b) Fungi in the air of hospital wards. *Microbiology* 32(3):397-402
- Noti JD, Lindsley WG, Blachere FM, Cao G, Kashon ML, Thewlis RE, McMillen CM, King WP, Szalajda JV, Beezhold DH (2012) Detection of infectious influenza virus in cough aerosols generated in a simulated patient examination room. *Clin Infect Dis* 54(11):1569-1577
- Ogden TL, Birkett JL (1975) The human head as a dust sampler. *Inhaled Part* 1:93-105
- Olenchok SA, Lenhart SW, Mull JC (1982) Occupational exposure to airborne endotoxins during poultry processing. *J Toxicol Environ Health* 9:339-349
- Ooka JJ, Kommedahl T (1977) Wind and rain dispersal of *Fusarium moniliforme* in corn fields. *Phytopathology* 67:1023-1026
- Orenstein AJ (ed) (1960) Proceedings of the Pneumoconiosis Conference : South African Council for Scientific and Industrial Research ; held at the University of Witwatersrand, Johannesburg, 9th-24th February, 1959. London : Churchill, 632 p
- Pankhurst LJ, Taylor J, Cloutman-Green EA, Hartley JC, Lai KM (2012) Can clean-room particle counters be used as an infection control tool in hospital operating theatres? *Indoor Built Environ* 21(3):381-391
- Papinen RS, Rosenthal FS (1997) The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects. *J Aerosol Med* 10(2):105-116
- Pasanen AL, Kalliokoski P, Pasanen P, Salmi T, Tossavainen A (1989) Fungi carried from farmers' work into farm homes. *Am Ind Hyg Assoc J* 50(12):631-633

- Pastuszka JS, Marchwinska-Wyrwal E, Wlazlo A (2005) Bacterial aerosol in Silesian hospitals : preliminary results. *Polish J Environ Stud* 14:883-890
- Pósfai M, Li J, Anderson JR, Buseck PR (2003) Aerosol bacteria over the Southern Ocean during ACE-1. *Atmos Res* 66(4):231-240
- Powell KE, Dahl BA, Weeks RJ, Tosh FE (1972) Airborne *Cryptococcus neoformans* particles from pigeon excreta compatible with alveolar deposition. *J Infect Dis* 125(4):412-415
- Prazmo Z, Kryszka-Traczyk E, Skorska C, Sitkowska J, Cholewa G, Dutkiewicz J (2003a) Exposure to bioaerosols in a municipal sewage treatment plant. *Ann Agric Environ Med* 10(2):241-248
- Prazmo Z, Dutkiewicz J, Skórska C, Sitkowska J, Cholewa G (2003b) Exposure to airborne Gram-negative bacteria, dust and endotoxin in paper factories. *Ann Agric Environ Med* 10(1):93-100
- Predicala BZ, Urban JE, Maghirang RG, Jerez SB, Goodband RD (2002) Assessment of bioaerosols in swine barns by filtration and impaction. *Curr Microbiol* 44(2):136-140
- Prodi V, Belosi F, Mularoni A (1988) PERSPEC : a personal sampler with size characterization capabilities. *Am Ind Hyg Assoc J* 49:75
- Prodi V, Mandrioli P, Agostini S, Belosi F (1991) Indoor viable particles sampling with size separation. *J Aerosol Sci* 22(1):823-826
- Prodi V, Sala C, Belosi F (1992) PERSPEC, personal size separating sampler : operational experience and comparison with other field devices. *Appl Ind Hyg* 7:368-374
- Qian J, Hospodsky D, Yamamoto N, Nazaroff WW, Peccia J (2012) Size-resolved emission rates of airborne bacteria and fungi in an occupied classroom. *Indoor Air* 22(4):339-351
- Rahkonen P, Ettala M, Laukkanen M, Salkinoja-Salonen M (1990) Airborne microbes and endotoxins in the work environment of two sanitary landfills in Finland. *Aerosol Sci Technol* 13(4):505-513
- Raisi L, Lazaridis M, Katsivela E (2010) Relationship between airborne microbial and particulate matter concentrations in the ambient air at a mediterranean site. *Glob NEST J* 12(1):84-91
- Raisi L, Aleksandropoulou V, Lazaridis M, Katsivela E (2013) Size distribution of viable, cultivable, airborne microbes and their relationship to particulate matter concentrations and meteorological conditions in a Mediterranean site. *Aerobiologia* 29(2):233-248
- Rajasekar A, Balasubramanian R (2011) Assessment of airborne bacteria and fungi in food courts. *Build Environ* 46:2081-2087
- Rantio-Lehtimäki A (1989) Evaluating the penetration of *Cladosporium* spores into the human respiratory system on the basis of aerobiological sampling results. *Allergy* 44(1):18-24
- Reinthal FF, Marth E, Eibel U, Enayat U, Feenstra O, Friedl H, Köck M, Pichler-Semmelrock FP, Pridnig G, Schlacher R (1997) The assessment of airborne microorganisms in large-scale composting facilities and their immediate surroundings. *Aerobiologia* 13:167-175
- Reponen T, Lehtonen M, Raunemaa T (1992) Effect of indoor sources on fungal spore concentrations and size distributions. *J Aerosol Sci* 23(1):663-666
- Reponen T, Hyvärinen A, Ruuskanen J, Raunemaa T, Nevalainen A (1994) Comparison of concentrations and size distributions of fungal spores in buildings with and without mould problems. *J Aerosol Sci* 25(8):1595-1603
- Reponen T (1995) Aerodynamic diameters and respiratory deposition estimates of viable fungal particles in mold problem dwellings. *Aerosol Sci Technol* 22(1):11-23
- Reponen T, Willeke K, Ulevicius V, Reponen A, Grinshpun SA (1996) Effect of relative humidity on the aerodynamic diameter and respiratory deposition of fungal spores. *Atmos Environ* 30(23):3967-3974
- Reponen T, Seo S-C, Grimsley F, Lee T, Crawford C, Grinshpun SA (2007) Fungal fragments in moldy houses : a field study in homes in New Orleans and Southern Ohio. *Atmos Environ* 41(37):8140-8149
- Roosbuaydee R, Junyapoon S, Phensajai M (2010) Distribution of different sized viable airborne particles in air-conditioned public vehicles in Ladkrabang district [online]. To be found at <http://www.science.kmitl.ac.th/downloads/proceeding_2/19%20page107-113.pdf> [quoted 09.09.2015]
- Rosas, I, Yela A, Burgoa CS (1994) Occurrence of airborne enteric bacteria in Mexico City. *Aerobiologia* 10:39-45
- Rosas I, Calderón C, Martínez L, Ulloa M, Lacey J (1997) Indoor and outdoor airborne fungal propagule concentrations in Mexico City. *Aerobiologia* 13(1):23-30
- Rosas I, Calderon C, Salinas E, Martinez I, Alfaro-Moreno E, Milton D K, Osornio-Vargas AR (2001) Animal and worker exposure to dust and biological particles in animal care houses. *Aerobiologia* 17:49-59
- Rozej A, Dudzinska MR, Gaska-Jedruch U (2011) Seasonal variation and size distribution of bioaerosols in an air-conditioned auditorium : a case study. In: Dudzinska MR (ed) *Management of indoor air quality*. Boca Raton : CRC, pp 21-30
- Ruiz A, Bulmer GS (1981) Particle size of airborne *Cryptococcus neoformans* in a tower. *Appl Environ Microbiol* 41(5):1225-1229
- Sayer, WJ, Shean DB, Ghossein J (1969) Estimation of airborne fungal flora by the Andersen sampler versus the gravity settling culture plate 1 Isolation frequency and numbers of colonies. *J Allergy* 44(4):214-227
- Schafer MP, Martinez KF, Mathews ES (2003) Rapid detection and determination of the aerodynamic size range of airborne mycobacteria associated with whirlpools. *Appl Occup Environ Hyg* 18(1):41-50
- Seedorf J, Schulz J, Hartung J (2005) Outdoor measurements of airborne emission of staphylococci from a broiler barn and its predictability by dispersion models. *WIT Transact Ecol Environ* 85:33-42
- Shilpa BS, Pallavi R, Sindu BS, Mahima MR, Sowmya G (2013) Assessment of bio-aerosols in outdoor and indoor environment of schools : a case study. *Int J Em Technol Adv Eng* 3(6):131-137
- Siggers JL, Kirychuk SP, Lemay SP, Willson PJ (2011) Size distribution of particulate and associated endotoxin and bacteria in traditional swine barn rooms and rooms sprinkled with oil. *J Agromedicine* 16(4):271-279
- Sillanpää M, Hillamo R, Mäkelä T, Pennanen AS, Salonen RO (2003) Field and laboratory tests of a high-volume cascade impactor. *J Aerosol Sci* 34:485-500
- Simard C, Trudel M, Paquette G, Payment P (1983) Microbial investigation of the air in an apartment building. *J Hyg* 91:277-286
- Sippula O, Rintala H, Happonen M, Jalava P, Kuusalo K, Virén A, Leskinen A, Markkanen A, Komppala M, Markkanen P, Lehtinen K, Jokiniemi J, Hirvonen M-R (2013) Characterization of chemical and microbial species from size-segregated indoor and outdoor particulate samples. *Aerosol Air Qual Res* 13(4):1212-1230
- Solomon WR (1970) A simplified application of the Andersen sampler to the study of airborne fungus particles. *J Allergy* 45(1):1-13
- Sowiak M, Bródka K, Buczyńska A, Cyprowski M, Kozajda A, Sobala W, Szadkowska-Stańczyk I (2011) An assessment of potential exposure to bio-aerosols among swine farm workers with particular reference to airborne microorganisms in the respirable fraction under various breeding conditions. *Aerobiologia* 28(2):121-133
- Springorum AC, Schulz J, Lung T, Clauß M, Hartung J (2014) Vorhersagbarkeit von Keimimmissionen im Umfeld von Nutztierhaltungen : ein Vergleich von Messungen mit den Prognosen von zwei Ausbreitungsmodellen. *Gefahrstoffe Reinhaltung Luft* 74(9):384-390
- Sturm R (2012) Modeling the deposition of bioaerosols with variable size and shape in the human respiratory tract : a review. *J Adv Res* 3(4):295-304
- TA Luft (2002) Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz : (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24.07.2002. *GMBI* 53(25-27):511-605
- Thomas RJ, Webber D, Sellors W, Collinge A, Frost A, Stagg AJ, Bailey SC, Jayasekera PN, Taylor RR, Eley S, Titball RW (2008) Characterization and deposition of respirable large- and small-particle bioaerosols. *Appl Environ Microbiol* 74(20):6437-6443
- Tilley RI, Eamus D, Ho J (2001) Background bioaerosols and aerosols at two sites in Northern Australia : preliminary measurements. Melbourne : DSTO Aeronaut Marit Res Lab, 18 p
- Tsai M-Y, Liu H-J (2009) Exposure to culturable airborne bioaerosols during noodle manufacturing in central Taiwan. *Sci Total Environ* 407:1536-1546
- TSI Inc (2012) Aerosol statistics lognormal distributions and dN/dlogDp [online]. To be found at <http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/PR-001-RevA_Aerosol-Statistics-AppNote.pdf> [quoted 09.09.2015]
- Turner AG, Hill NF (1975) Calibration of the Andersen 2000 disposable air sampler. *Am Indust Hyg Assoc J* 36:447-451

- Tyrell S, Drew GH, Tamer Vestalund A (2009) Characterisation and dispersal of bioaerosols emitted from composting facilities. Cranfield : Univ
- US EPA – National Center Environ Assessment (2009) Integrated science assessment for particulate matter. Res Triangle Park : US Environ Protect Agency
- Vaughan NP (1989) The Andersen impactor : calibration, wall losses and numerical simulation. *J Aerosol Sci* 20(1):67-90
- VDI 2463/1 (1999) Messen von Partikeln : gravimetrische Bestimmung der Massenkonzentration von Partikeln in der Aussenluft ; Grundlagen. Berlin : Beuth, 43 p
- VDI 4250/1 (2014) Bioaerosole und biologische Agenzien : umweltmedizinische Bewertung von Bioaerosol-Immissionen ; Wirkungen mikrobieller Luftverunreinigungen auf den Menschen. Berlin : Beuth
- VDI 4250/3 (2014) Bioaerosole und biologische Agenzien - Anlagenbezogene umweltmedizinisch relevante Messparameter und grundlegende Beurteilungswerte. Berlin : Beuth
- VDI 4251/3 (2015) Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft : anlagenbezogene Ausbreitungsmodellierung von Bioaerosolen. Berlin : Beuth
- Verreault D, Moineau S, Duchaine C (2008) Methods for sampling of airborne viruses. *Microbiol Mol Biol Rev* 72(3):413-444
- Vijay HM, Thaker AJ, Banerjee B, Kurup VP (1999) Mold allergens. In: Lockey RF, Bukantz SC (eds) Allergens and allergen immunotherapy. New York : Dekker, pp 133-154
- Wang CC, Fang GC, Kuo CH (2010) Bioaerosols as contributors to poor air quality in Taichung City, Taiwan. *Environ Monit Assess* 166(1-4):1-9
- Wedding J, McFarland AR, Cermak JE (1977) Large particle collection characteristics of ambient aerosol samplers. *Environ Sci Technol* 11(4):387-390
- Wells WF (1947) Apparatus for estimating size of bacteria-laden airborne particles. *J Bacteriol* 54(1):51
- Wells WF (1955) Airborne contagion and air hygiene. Cambridge : Harvard Univ Pr, 423 p
- Winkle S, Rohde R, Adam W, Aleksic S, Fischer K, Koch I, Lennartz H, Wehrspann P, Wilcke R, Winkle I, Wokatsch R (1979) Mikrobiologische und serologische Diagnostik mit Berücksichtigung der Pathogenese und Epidemiologie. Jena : Fischer, 335 p
- Wright DN, Vaichulis EMK, Chatyngny MA (1968) Biohazard determination of crowded living-working spaces : airborne bacteria aboard two naval vessels. *Am Ind Hyg Assoc J* 29(6):574-581
- Wright TJ, Greene VW, Paulus HJ (1969) Viable microorganisms in an urban atmosphere. *J Air Pollut Control Assoc* 19(5):337-341
- Wu Y, Yao M (2011) Effects of microwave irradiation on concentration, diversity and gene mutation of culturable airborne microorganisms of inhalable sizes in different environments. *J Aerosol Sci* 42(11):800-810
- Xie X, Li Y, Chwang AT, Ho PL, Seto WH (2007) How far droplets can move in indoor environments : revisiting the Wells evaporation-falling curve. *Indoor Air* 17(3):211-225
- Xu Z, Wie K, Wu Y, Shen F, Chen Q, Li M, Yao M (2013) Enhancing bioaerosol sampling by Andersen impactors using mineral-oil-spread agar plate [online]. To be found at <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0056896>> [quoted 09.09.2015]
- Xu Z, Yao M (2013) Monitoring of bioaerosol inhalation risks in different environments using a six-stage Andersen sampler and the PCR-DGGE method. *Environ Monit Assess* 185:3993-4003
- Yamamoto N, Schmechel D, Chen BT, Lindsley WG, Peccia J (2011) Comparison of quantitative airborne fungi measurements by active and passive sampling methods. *J Aerosol Sci* 42:499-507
- Yamamoto N, Bibby K, Qian J, Hospodsky D, Rismani-Yazdi H, Nazaroff WW, Peccia J (2012) Particle-size distributions and seasonal diversity of allergenic and pathogenic fungi in outdoor air. *ISME J* 6(10):1801-1811
- Yang S, Lee GW, Chen CM, Wu CC, Yu KP (2007) The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects. *J Aerosol Med* 20(4):484-494
- Yao M, Mainelis G (2006) Investigation of cut-off sizes and collection efficiencies of portable microbial samplers. *Aerosol Sci Technol* 40(8):595-606
- Yu J, Hu Q, Xie Z, Kang H, Li M, Li Z, Ye P (2013) Concentration and size distribution of fungi aerosol over oceans along a cruise path during the fourth Chinese arctic research expedition. *Atmosphere* 4:337-348
- Zhang J, Xia L, Du W, Zhang C, Gong X, Ji S, Yu B (2009) An investigation on microbe aerosol size distribution in a waste sanitary landfill site. *Chinese J Environ Eng* 9:1620-1624 [in Chinese]
- Zhang J, Liu J, Ma W, Liu B, Zhao Y, Ji H (2012) Characteristics of microbial aerosol pollution in urban solid waste comprehensive treatment plant. *Chinese J Environ Eng* 8:2825-2829 [in Chinese]
- Zhao Y (2011) Effectiveness of multi-stage scrubbers in reducing emissions of air pollutants from pig houses. *Trans ASABE* 54(1):285-293
- Zheng W, Zhao Y, Xin H, Li B, Gates RS, Zhang Y, Soupir ML (2013) Concentrations and size distributions of airborne particulate matter and bacteria in an experimental aviary laying-hen housing system. In: American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2013 : Kansas City , Missouri, USA, 21-24 July 2013. Red Hook NY : Curran, paper 320
- Zhu H, Phelan PE, Duan T, Raupp GB, Fernando HJS, Che F (2003a) Experimental study of indoor and outdoor airborne bacterial concentrations in Tempe, Arizona, USA. *Aerobiologia* 19(3-4):201-211
- Zhu H, Phelan PE, Duan T, Raupp GB, Fernando HJS (2003b) Characterizations and relationships between outdoor and indoor bioaerosols in an office building. *China Particuology* 1(3):119-123
- Zuraimi MS, Fang L, Tan TK, Chew FT, Tham KW (2009) Airborne fungi in low and high allergic prevalence child care centers. *Atmos Environ* 43(15):2391-2400

Modelling excretion rates of German dairy heifers

Ulrich Dämmgen*, Hans-Dieter Haenel*, Claus Rösemann*, Jim Webb**, Wilfried Brade***, and Ulrich Meyer****

Abstract

A model to derive methane emissions from enteric fermentation as well as volatile solids and faecal and renal nitrogen excretions of dairy heifers was developed. It uses start and final weights of the animals, their daily weight gain and the duration of grazing as input parameters.

The model was applied to typical German diet compositions and feed properties. Emissions from enteric fermentation were obtained that exceed those estimated with the IPCC default methodology.

Keywords: *dairy heifers, model, excretion, methane, volatile solids, nitrogen*

Zusammenfassung

Modellierung der Ausscheidungs-raten deutscher Aufzucht-rinder

Es wurde ein Modell für Aufzucht-rinder entwickelt, mit dessen Hilfe die Methanemissionen aus der Verdauung sowie die Ausscheidungen von organischer Masse ("volatile solids") und Stickstoff mit Kot und Harn berechnet werden können. Das Modell nutzt Anfangs- und Endmassen der Tiere, die tägliche Zunahme sowie die Dauer des Weidegangs als Eingangsgrößen.

Mit in Deutschland üblichen Futterzusammensetzungen und Futterqualitäten wurden typische Emissionen ermittelt. Die Ergebnisse für Methan aus der Verdauung sind deutlich höher als die mit dem IPCC-default-Verfahren erhaltenen Werte.

Schlüsselwörter: *Aufzucht-rinder, Modell, Ausscheidungen, Methan, organische Masse, Stickstoff*

* Johann Heinrich von Thünen Institute (TI), Institute for Climate-Smart Agriculture, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany

** University of Wolverhampton, Faculty of Science and Engineering, MI Building, City Campus e South Wulfruna St, Wolverhampton WV1 LY, United Kingdom

*** University of Veterinary Medicine Hannover (TiHo), Institute for Animal Breeding and Genetics, Bünteweg 17p, 30559 Hannover, Germany; present affiliation: Leibniz Institute for Farm Animal Biology (FBN), Wilhelm-Stahl-Allee 2, 18196 Dummerstorf, Germany

**** Friedrich Loeffler Institute (FLI), Federal Research Institute for Animal Health, Institute of Animal Nutrition, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany

1 Introduction

International and national activities aim at a reduction of the emissions of greenhouse gases (GHG) and air pollutants, in particular ammonia (NH_3), from agricultural sources. In this process, a first step is to quantify excretion by livestock, which presupposes the availability of models that depict the emitting processes and their controlling parameters. A second step is to apply them to current practice and identify potential reduction potentials.

In most countries cattle production is the largest source of agricultural emissions. In Germany methane (CH_4) emissions from heifers alone exceed those of all non-cattle animals. For NH_3 , the raising of heifers contributes about 8 % to the national total (UBA, 2015). Hence, it is considered worthwhile to establish detailed excretion models for dairy and beef heifers that provide the requirements mentioned above. This work deals with the description of dairy heifers for reproduction only, and fills the “gap” between the calf and the dairy cow models described in Dämmgen et al. (2009; 2013), by:

- quantifying the metabolic energy (ME) requirements,
- calculating the feed intake (amounts, dry matter, nitrogen (N), etc.) and
- deriving the excretion rates of enteric CH_4 , volatile solids (VS) as well as faecal and renal N,

and using the variables provided in German statistics (weights, weight gains, grazing times) and German national data for constants wherever possible.

Calculation of VS excretion then allows determination of the emissions of CH_4 from housing, storage and grazing using the information provided in Dämmgen et al. (2011; 2012). Faecal and renal N excretion rates are used to quantify emissions of the relevant N species NH_3 , nitric oxide (NO), nitrous oxide (N_2O) and di-nitrogen (N_2) as a function of housing and manure storage types, manure application technologies and intervals before incorporation of manure in accordance with EMEP (2013). For principles of these calculations see Rösemann et al. (2015), Chapter 4.2 (Emission factors for all cattle).

2 The detailed dairy heifer model

2.1 Raising dairy heifers in Germany – a short overview

In principle, dairy heifers differ from female beef cattle with respect to their daily weight gains (female beef about 800 to 1000 $\text{g animal}^{-1} \text{d}^{-1}$, dairy heifers 700 to 800 $\text{g animal}^{-1} \text{d}^{-1}$ (e.g. GfE, 2001; LfL, 2013; 2014; KTBL, 2014) and hence feed requirements and composition. They are fed and kept different from beef heifers, with a protein rich diet to optimize the development of the reproductive organs. It is quite common to graze dairy heifers for at least part of the year.

When they are about 18 to 21 months old they will be covered, and they will give birth to their calves at the age of 27 to 31 months. Age at first calving, weight gains and final weights have changed considerably in the past two and half decades (Figures 1 to 3). A steady decrease can be observed for months at first calving while weight gains increased. Final weights seem to have stabilized after 2005.

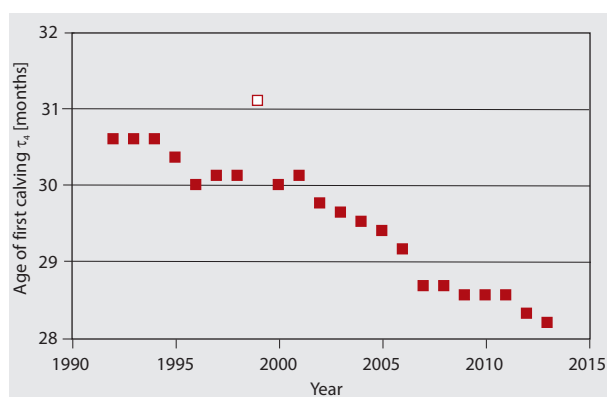


Figure 1

Ages at first calving (τ_4) during the past two decades (national means provided by ADR, 1993 ff, value for 1999 considered as outlier)

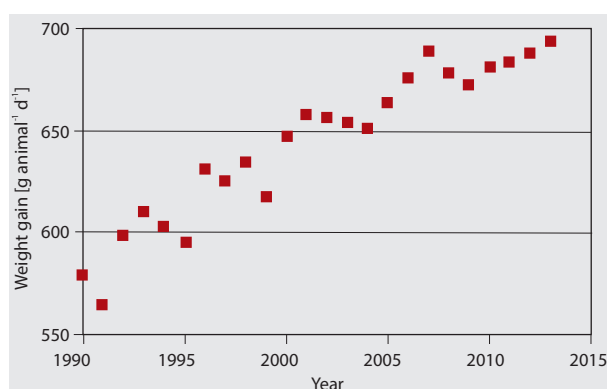


Figure 2

Mean weight gains calculated for German heifers using Equation (1) and official data (see Chapter 3.1)

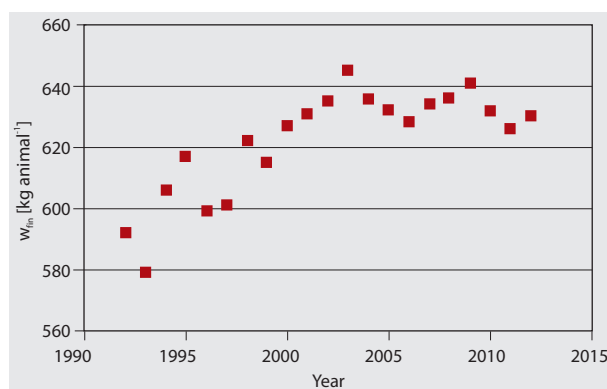


Figure 3

Mean final weights for German heifers (obtained from official data on carcass weights ¹⁾

¹⁾ German statistics provide no information on final live weights of animals. However, carcass weights are listed. As a result of the short productive lifetime of German dairy cows (national average at present is less than 2.8 years; Römer, 2011), almost all female calves have to be used for replacement. Hence we assume that the carcass weights of female cattle older than 1 a provided in the official slaughter statistics apply to dairy heifers. As no other data is available, this weight has to be used to define the transition from heifer to cow. Live weights are derived from carcass weights according to Dämmgen et al. (2010) using the relation $w_4 = a_{\text{carc}} + b_{\text{carc}} \cdot w_{\text{carc}}$, with $a_{\text{carc}} = 221 \text{ kg animal}^{-1}$, $b_{\text{carc}} = 1,46 \text{ kg kg}^{-1}$ and w_{carc} carcass weight (in kg animal^{-1}).

German breeders aim at a constant weight gain over the entire period (Figure 4).

As a rule, dairy heifers are grazed part of the time, preferably in the second summer of their lives. Figure 5 shows the mean shares of grazing times for German heifers (including both dairy and beef heifers).

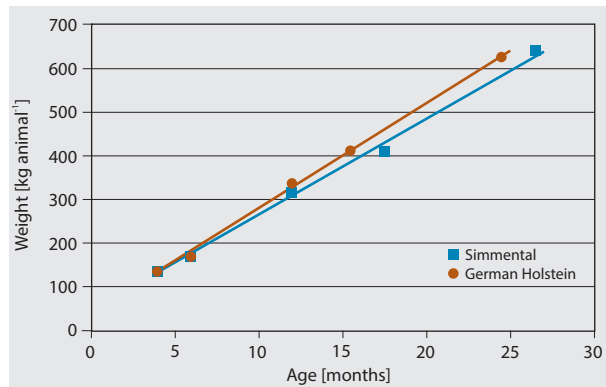


Figure 4
Weights of Simmental and German Holstein heifers as recommended by DLG (2008)

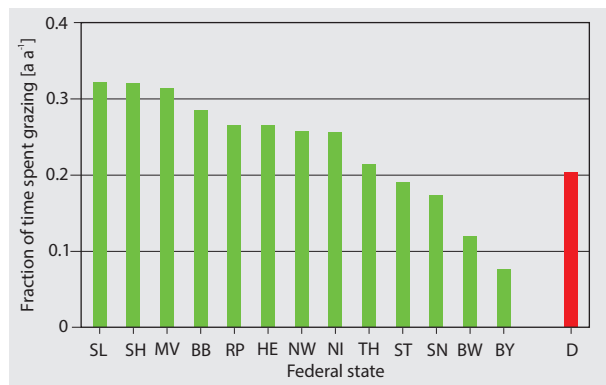


Figure 5
Mean grazing times of heifers for the German federal states and the weighted German mean ²⁾ in 2010 (Data supplied by Statistisches Bundesamt)

Any model that is to reflect the German situation has to treat final weights, weight gains and grazing times as variables.

2.2 Animal weights, weight gains and feeding phases

As shown in Figure 4, it is reasonable to base the heifer model on the assumption of a constant weight gain:

$$\Delta w = \frac{w_4 - w_1}{\tau_4 - \tau_1} \quad (1)$$

where

- Δw mean daily weight gain (in kg animal⁻¹ d⁻¹)
- w_4 final weight of a heifer (in kg animal⁻¹)
- w_1 start weight of a heifer ($w_1 = 125$ kg animal⁻¹)
- τ_4 end of the period the animal is a heifer (in d)
- τ_1 beginning of the period the animal is a heifer ($\tau_1 = 0$ d)

Δw is deduced from statistics. w_1 is the final weight of calves described in Dämmgen et al. (2013), and taken to be constant to reduce the number of variables. This weight is achieved after about 4 months of life when the lifespan of the heifer begins ($\tau_{\text{start}} = \tau_1$). w_4 is the variable weight of first calving at the end of the period the animal is a heifer ($\tau_{\text{fin}} = \tau_4$). At the time being (see Figure 1) τ_{fin} is about 28 months. Hence, the overall lifespan spent as heifer is about two years.

Feeding of heifers varies depending on the age of the animal. To be able to distinguish different feeding phases it is necessary to define intermediate weights w_i

$$w_i = w_1 + (\tau_i - \tau_1) \cdot \Delta w \quad (2)$$

where

- w_i weight of a heifer at a time τ_i (in kg animal⁻¹)
- w_1 start weight of a heifer ($w_1 = 125$ kg animal⁻¹)
- τ_i intermediate time (in d)
- τ_1 beginning of the time as a heifer ($\tau_1 = 0$ d)
- Δw mean daily weight gain (in kg animal⁻¹ d⁻¹)

Figure 6 gives an overview over relevant times, weights, feeding phases as well as durations of grazing periods.

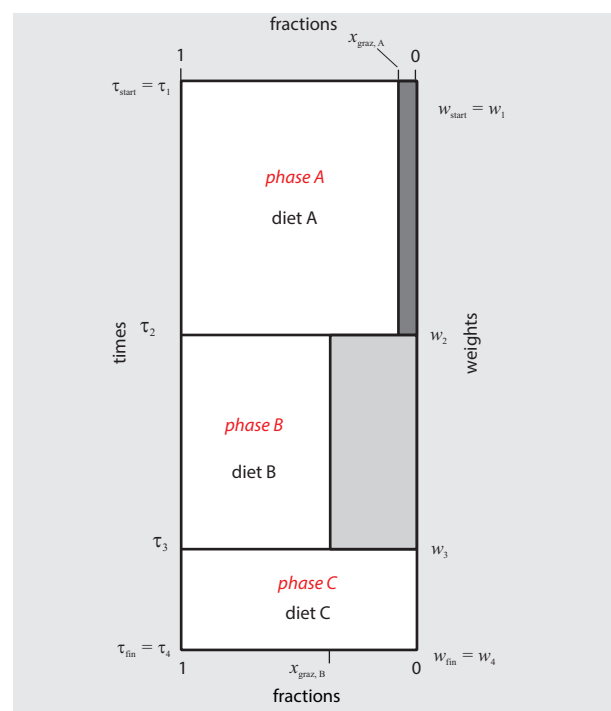


Figure 6
Phases in rearing a heifer – overview over relevant times and weights (shaded areas symbolize grazing, white rectangles housing) (times and weights not to scale)

²⁾ SL: Saarland; SH: Schleswig-Holstein; MV: Mecklenburg-Western Pomerania; BB: Brandenburg; RP: Rhineland-Palatinate; HE: Hesse; NW: North Rhine-Westphalia; NI: Lower Saxony; TH: Thuringia; ST: Saxony-Anhalt; SN: Saxony; BW: Baden-Württemberg; BY: Bavaria; D: German mean. Weighting takes animal numbers into account.

It is customary to change the composition of the diet when the animals' weight is about 400 to 420 kg animal⁻¹ (Weiß et al., 2005; Kirchgeßner et al., 2008; DLG, 2008; Fischer et al., 2011). As can be seen in Figure 4, this is after the first half of the animals' lifespan. In the first half of their time as a heifer (phase A, see Figure 6), their diet (diet A) is richer in energy and protein than in the subsequent phase B (diet B). Towards the end of the pregnancy, the animals require a diet richer in metabolizable energy (ME) and crude protein (CP) contents in order to ensure the foetus is adequately nourished (phase C, diet C).

As phase B requires feed with less ME and CP (diet B), this is the favoured time to graze the animals. As a rule, heifers are grazed at least part of the year in the second half of their time as heifers. Grazing may also occur in phase A. However, grazing may not provide the ME input needed during the final eight weeks before calving (phase C). Here, the animals are housed and fed diet A again, hence diet C = diet A. This allows the rumen microbiome to adjust to the performance requirements of a lactating cow.

From this a *simplified model of feeding phases* is developed using the terms provided in Figure 6.

The duration of phase A is defined by:

$$\Delta t_A = \tau_2 - \tau_1 = x_A \cdot (\tau_4 - \tau_1) \quad (3)$$

with

- Δt_A duration of phase A (in d)
- τ_2 time at the end of phase A, beginning of phase B (in d)
- τ_1 beginning of the period the animal is a heifer, beginning of phase A (in d)
- x_A fraction of time spent in phase A (in a a⁻¹)
- τ_4 end of phase C, end of the period the animal is a heifer (in d)

With the assumptions made above, x_A is half the life span of the heifer ($x_A = \frac{1}{2}$).

The phase model assumes that phase C is taken to last about 2 months, and that the entire period the animal is a heifer is about 24 months. Thus, phase C forms a fraction of one twelfth of the entire period or one sixth of the second year which allows us to define:

$$\Delta t_C = \tau_4 - \tau_3 = x_C \cdot (\tau_4 - \tau_1) = \frac{1}{6}(\tau_4 - \tau_1) \quad (4)$$

and

$$\Delta t_B = \tau_3 - \tau_2 = \frac{5}{6}(\tau_4 - \tau_1) \quad (5)$$

where

- Δt_C duration of phase C (in d)
- Δt_B duration of phase B (in d)
- τ_4 end of phase C, end of the period the animal is a heifer (in d)
- τ_3 end of phase B, beginning of phase C (in d)
- τ_2 end of phase A, beginning of phase B (in d)

In principle, these fractions apply to the period the animal is a heifer (24 months). Due to lack of information it is used to describe *all* heifers irrespective of the actual period before the animal becomes a lactating dairy cow.

Grazing times have to be treated separately as grazing affects the amounts and the properties of the feed.

The *model concept* (see Figure 6) describes grazing times by defining fractions of the duration of phases A and B dedicated to grazing, $x_{\text{graz}, A}$ and $x_{\text{graz}, B}$. Grazing occurs preferably in the second year of the period the animal is a heifer, which is reflected in Figure 6 by $x_{\text{graz}, B}$ being considerably bigger than $x_{\text{graz}, A}$. As mentioned above there is no grazing in phase C.

Official statistics provide time series of grazing times for all heifers including animals raised as beef heifers. However, it is assumed that these time series can be used for dairy heifers, as the share of non-dairy heifers is small in comparison. Unfortunately, the official data do not provide $x_{\text{graz}, A}$ and $x_{\text{graz}, B}$ but the mean number of days annually spent on pasture that can be converted into an overall mean fraction x_{graz} (see Figure 5). The relation between x_{graz} , $x_{\text{graz}, A}$ and $x_{\text{graz}, B}$ is

$$x_{\text{graz}} = \frac{(\tau_2 - \tau_1) \cdot x_{\text{graz}, A} + (\tau_3 - \tau_2) \cdot x_{\text{graz}, B}}{\tau_4 - \tau_1} \quad (6)$$

where

- x_{graz} fraction of time spent grazing provided by statistics (in a a⁻¹)
- $x_{\text{graz}, A}$ share of time spent grazing in phase A (in a a⁻¹)
- $x_{\text{graz}, B}$ share of time spent grazing in phase B (in a a⁻¹)
- τ_1 beginning of the period the animal is a heifer, begin of phase A (in d)
- τ_2 beginning of phase B, end of phase A (in d)
- τ_3 end of phase B, begin of phase C (in d)
- τ_4 end of phase C, end of the period the animal is a heifer (in d)

As this is one equation with two unknowns, additional information and assumptions are needed to derive $x_{\text{graz}, A}$ and $x_{\text{graz}, B}$ from x_{graz} . We use the information that the grazing period for heifers in Germany does not normally exceed half a year and that heifers are grazed preferably in the second year (DLG, 2008; Dawson and Carson, 2005; backed up by expert judgement Martin ³⁾ and Lange ⁴⁾). As a consequence we assign 0.5 a of grazing to the second year and no grazing to the first year in order to derive a characteristic threshold x_{graz}^* of the mean annual grazing time:

$$x_{\text{graz}}^* = \frac{0.5 \text{ a}}{2 \text{ a}} = 0.25 \text{ a a}^{-1} \quad (7)$$

where

- x_{graz}^* overall mean of annual grazing time (in a a⁻¹)

³⁾ Dr. J. Martin, State Research Institute for Agriculture and Fisheries, Mecklenburg-Vorpommern, Institute for Animal Production, Dummerstorf, Researcher in suckling cows and grassland

⁴⁾ Dipl.-Ing. agr. Gerd Lange, Chamber of Agriculture Lower Saxony, Consultant grassland and conservation programmes

As can be seen in Figure 5, there are values of $x_{\text{graz}} > x_{\text{graz}}^*$ and $x_{\text{graz}} \leq x_{\text{graz}}^*$. Hence, we assume that $x_{\text{graz}} > x_{\text{graz}}^*$ is due to additional grazing in the first year of the period the animal is a heifer and that $x_{\text{graz}} \leq x_{\text{graz}}^*$ means grazing only in the second year. For the latter case, $x_{\text{graz}, A} = 0$ and Equation (6) reduces to

$$x_{\text{graz}} = \frac{\tau_3 - \tau_2}{\tau_4 - \tau_1} \cdot x_{\text{graz}, B} \quad (8a)$$

or, after resolving for $x_{\text{graz}, B}$ and taking into account Equation (5),

$$x_{\text{graz}, B} = \frac{\tau_4 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2} \cdot x_{\text{graz}} = \frac{12}{5} \cdot x_{\text{graz}} \quad (8b)$$

where

- x_{graz} fraction of time spent grazing provided by statistics (in a a⁻¹)
- $x_{\text{graz}, B}$ share of time spent grazing in phase B (in a a⁻¹)
- τ_1 begin of the period the animal is a heifer, beginning of phase A (in d)
- τ_2 time at the end of phase A, beginning of phase B (in d)
- τ_3 end of phase B, beginning of phase C (in d)
- τ_4 end of phase C, end of the period the animal is a heifer (in d)

In case of $x_{\text{graz}} > x_{\text{graz}}^*$ we assign the part of x_{graz} exceeding x_{graz}^* to phase A. This modifies Equation (6) to

$$x_{\text{graz}} = \frac{(\tau_2 - \tau_1) \cdot x_{\text{graz}, A}}{\tau_4 - \tau_1} + x_{\text{graz}}^* \quad (9)$$

or, after resolving for $x_{\text{graz}, A}$ and taking into account Equations (3) and (7),

$$x_{\text{graz}, A} = 2 \cdot x_{\text{graz}} - 0.5 \quad (10)$$

where

- $x_{\text{graz}, A}$ share of time spent grazing in phase A (in a a⁻¹)
- x_{graz} fraction of time spent grazing provided by statistics (in a a⁻¹)

2.3 Metabolic energy requirements

2.3.1 Determination of cumulative metabolic energy requirements

The determination of ME requirements is the basic tool for feed intake and excretion calculations. As follows from Chapter 2.2, cumulative ME requirements have to be obtained for the various feeding phases. GfE (2001), supplemented by Kirchgeßner et al. (2008), provide daily ME requirements of housed heifers as a function of actual animal weights and animal weight gains (Table 1). This table does not differentiate between genotypes. Weight gains between 0.6 and 0.7 kg animal⁻¹ d⁻¹ have been common in German animal production (see Figure 2).

Table 1

Metabolic energy requirements of housed heifers (in MJ animal⁻¹ d⁻¹) (GfE, 2001, Table 1.5.3; Kirchgeßner et al., 2008), as a function of animal weights and weight gains.

live weight w (kg animal ⁻¹)	weight gain Δw (kg animal ⁻¹ d ⁻¹)						
	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
150		30.5	32.3	34.1	36.0		
200		37.4	39.6	42.0	44.3	46.6	
250	41.6	43.9	46.7	49.6	52.6	55.8	59.0
300	47.5	50.4	53.6	57.2	60.8	64.6	68.6
350	53.2	56.6	60.5	64.7	69.1	73.7	78.5
400	58.9	62.8	67.3	72.2	77.5	83.2	89.3
450	64.6	69.0	74.2	79.9	86.0	92.7	100.0
500	70.1	75.1	81.0	87.5	94.5	102.0	110.0
550	75.5	81.4	88.0	95.4	103.2	111.6	120.6
600	81.3	87.8	94.9	103.4			

The determination of cumulative ME requirements presuppose the transformation of Table 1 into a steady function and its subsequent integration over time, resulting in Equation (11). For details of its derivation see Appendices 1 and 2.

$$\sum ME_{\text{house}, i} = \frac{1}{\Delta w} \cdot \left[a \cdot (w_m - w_n) + \frac{b}{2} \cdot (w_m^2 - w_n^2) \right] \quad (11)$$

where

- $\sum ME_{\text{house}, i}$ cumulative metabolic energy requirements for housed heifers (without grazing) in phase i (in MJ animal⁻¹)
- Δw daily weight gain (in kg animal⁻¹ d⁻¹)
- a coefficient (in MJ animal⁻¹ d⁻¹, see Equation (12))
- w_m final weight of heifer in phase i (in kg animal⁻¹)
- w_n start weight of heifer in phase i (in kg animal⁻¹)
- b coefficient (in MJ kg⁻¹ d⁻¹, see Equation (13))

with phase dependent weights

i	w_m	w_n
A	w_1	w_2
B	w_2	w_3
C	w_3	w_4

and

$$a = \alpha + \beta \cdot \Delta w + \gamma \cdot \Delta w^2 \quad (12)$$

$$b = \delta + \varepsilon \cdot \Delta w + \zeta \cdot \Delta w^2 \quad (13)$$

with

α constant (in MJ animal⁻¹ d⁻¹)

α constant ($\alpha = 4.7665678$ MJ animal⁻¹ d⁻¹)

β	coefficient ($\beta = 26.7961752 \text{ MJ kg}^{-1}$)
Δw	daily weight gain (in $\text{kg animal}^{-1} \text{ d}^{-1}$)
γ	coefficient ($\gamma = -24.5867088 \text{ MJ animal kg}^{-2} \text{ d}$)
b	coefficient ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$, see Equation (4))
δ	constant ($\delta = 0.097908 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)
ε	coefficient ($\varepsilon = 0.0061962 \text{ MJ animal kg}^{-2} \text{ d}^{-2}$)
ζ	coefficient ($\zeta = 0.1020296 \text{ MJ animal}^2 \text{ kg}^{-3} \text{ d}$)

A comparison of Table 1 and Figure 3 reveals that the data for most final weights in the past two decades have to be obtained from a slight extrapolation, as final weights somewhat exceed $600 \text{ kg animal}^{-1}$.

2.3.2 Metabolic energy requirements for single feeding phases and consideration of grazing

Equation (11) has to be applied to each feeding phase and diet, differentiating between housed and grazed animals. The quantification of the cumulative ME requirements for phases A, B and C, ΣME_A , ΣME_B and ΣME_C , has to take into account that grazing animals need extra energy to obtain their feed. As a rule, this so-called energy expenditure is related to the energy requirements for maintenance. It is strongly dependent on the structure of the terrain and the quality of the pasture (e.g. Di Marco and Aello, 1998; Brosh et al., 2006). For dairy heifers, no experimental data are available for Germany. Moreover, the ME requirements are not split up in ME for maintenance, ME_m , and growth, ME_g . Hence estimates have to rely on experimental data for dairy cows, on national estimates or use international default values. Here, the national estimate provided in DLG (2014) and the IPCC (2006) default value for ME_m were used to derive a surcharge factor for gross energy requirements of 10 %, i. e. $f_{\text{graz}} = 1.1$ (for details see Appendix 3). The following equations are used to calculate ME requirements in the three rearing phases of heifers:

$$\Sigma ME_A = \left[(1 - x_{\text{graz}, A}) + x_{\text{graz}, A} \cdot f_{\text{graz}} \right] \cdot \frac{1}{\Delta w} \cdot \left[a \cdot (w_2 - w_1) + \frac{b}{2} \cdot (w_2^2 - w_1^2) \right] \quad (14)$$

$$\Sigma ME_B = \left[(1 - x_{\text{graz}, B}) + x_{\text{graz}, B} \cdot f_{\text{graz}} \right] \cdot \frac{1}{\Delta w} \cdot \left[a \cdot (w_3 - w_2) + \frac{b}{2} \cdot (w_3^2 - w_2^2) \right] \quad (15)$$

$$\Sigma ME_C = \frac{1}{\Delta w} \cdot \left[a \cdot (w_4 - w_3) + \frac{b}{2} \cdot (w_4^2 - w_3^2) \right] \quad (16)$$

where

ΣME_A	cumulative ME requirements during phase A (in MJ animal^{-1})	a	coefficient (in $\text{MJ animal}^{-1} \text{ d}^{-1}$)
$x_{\text{graz}, A}$	fraction of time spent grazing in phase A (in a^{-1})	w_2	weight of heifer at time τ_2 (in kg animal^{-1})
f_{graz}	factor reflecting increased ME requirements during grazing ($f_{\text{graz}} = 1.1 \text{ kg kg}^{-1}$)	w_1	start weight of heifer (in kg animal^{-1})
Δw	daily weight gain (in $\text{kg animal}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	b	coefficient (in $\text{MJ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)
		etc.	

2.4 Enteric methane emissions

Daily ME requirements allow for the quantification of daily feed intake rates, once the feed properties are known. From the amount of feed constituents taken in, the amounts of CH₄ released from enteric fermentation and the excretion of volatile solids (VS) can be derived.

According to Kirchgessner et al. (1994; 1995), these CH₄ emissions can be obtained from Equation (17). Its applicability for dairy cows was checked in Dämmgen et al. (2012). Equation (17) is then used to derive cumulative emissions (Equation (19)), as M_{CFi} , M_{NFE} , M_{CP} and M_{XF} are linearly related to the daily ME intake,

$$ef_{CH4} = c_{CFi} \cdot M_{CFi} + c_{NFE} \cdot M_{NFE} + c_{CP} \cdot M_{CP} + c_{EE} \cdot M_{EE} + d_{CH4} \quad (17)$$

and

$$EF_{CH4, A} = \frac{\sum ME_A}{\eta_{ME, A}} \cdot (c_{CFi} \cdot x_{CFi, A} + c_{NFE} \cdot x_{NFE, A} + c_{CP} \cdot x_{CP, A} + c_{EE} \cdot x_{EE, A}) + d_{CH4} \cdot (\tau_2 - \tau_1) \quad (18)$$

where

- ef_{CH4} daily CH₄ emission rate (factor) (in kg animal⁻¹ d⁻¹) according to Kirchgessner et al. (1994; 1995)
- c_{CFi} coefficient ($c_{CFi} = 0.079$ kg (kg DM)⁻¹)
- M_{CFi} intake rate of crude fibre (in kg animal⁻¹ d⁻¹)
- c_{NFE} coefficient ($c_{NFE} = 0.010$ kg (kg DM)⁻¹)
- M_{NFE} intake rate of N-free extracts (in kg animal⁻¹ d⁻¹)
- c_{CP} coefficient ($c_{CP} = 0.026$ kg (kg DM)⁻¹)
- M_{CP} intake rate of crude protein (in kg animal⁻¹ d⁻¹)
- c_{EE} coefficient ($c_{EE} = -0.212$ kg (kg DM)⁻¹)
- M_{EE} intake rate of ether extract (crude fat) (in kg animal⁻¹ d⁻¹)
- d_{CH4} constant ($d_{CH4} = 0.063$ kg animal⁻¹ d⁻¹)

and

- $EF_{CH4, A}$ cumulative enteric CH₄ emissions in phase A (in kg animal⁻¹)
- $\sum ME_A$ cumulative ME requirements in phase A including grazing (in MJ animal⁻¹)
- $\eta_{ME, A}$ mean ME content of diets A (in MJ (kg DM)⁻¹)
- $x_{CFi, A}$ mean content of crude fibre in diets A (in kg (kg DM)⁻¹)
- $x_{NFE, A}$ mean content of N-free extracts in diets A (in kg (kg DM)⁻¹)
- $x_{CP, A}$ mean content of crude protein in diets A (in kg (kg DM)⁻¹)
- $x_{EE, A}$ mean content of ether extract (crude fat) in diets A (in kg (kg DM)⁻¹)
- τ_2 end of phase A (in d)
- τ_1 beginning of phase A (in d)

Equivalent equations are used to describe phases B and C. The overall emission of a heifer during its entire life is

$$EF_{CH4} = EF_{CH4, A} + EF_{CH4, B} + EF_{CH4, C} \quad (19)$$

where

- EF_{CH4} cumulative enteric CH₄ emissions during the period as a heifer (in kg animal⁻¹)
- $EF_{CH4, A}$ cumulative enteric CH₄ emissions in phase A (in kg animal⁻¹)
- etc.

2.5 Volatile solids excretion

VS excretion rates are calculated for each phase from feed constituent properties according to Equation (20) (Dämmgen et al., 2011). For phase i, they amount to:

$$VS_i = M_{feed, i} \cdot (1 - X_{ash, feed, i}) \cdot (1 - X_{DOM, i}) = \frac{\sum ME_i}{\eta_{ME, i}} \cdot (1 - X_{ash, feed, i}) \cdot (1 - X_{DOM, i}) \quad (20)$$

where

VS_i	VS excretion rate with faeces during phase i (in kg animal ⁻¹)
$M_{\text{feed}, i}$	feed intake during phase i (dry matter) (in kg animal ⁻¹)
$X_{\text{ash, feed}, i}$	ash content of feed in diet i (in kg kg ⁻¹)
$X_{\text{DOM}, i}$	apparent digestibility of organic matter in diet i (in kg kg ⁻¹)
ΣME_i	cumulative ME requirements in phase i including grazing (in MJ animal ⁻¹)
$\eta_{\text{ME}, i}$	mean ME content of diets i (in MJ kg ⁻¹)

For each phase, the amounts of VS excreted during grazing have to be determined separately, as the methane conversion factors (MCF) for grazing differ from those for house and storage (IPCC, 2006, Table 10.17⁵). However, it remains unknown, which excretions originate from which feed. *This model assumes* therefore that it is adequate to use the fractions $x_{\text{graz}, A}$ and $x_{\text{graz}, B}$ to derive the shares of the faeces excreted during grazing. For phases A and B, this share is obtained according to

$$VS_{\text{graz}, A} = VS_A \cdot x_{\text{graz}, A} \quad (21)$$

$$VS_{\text{graz}, B} = VS_B \cdot x_{\text{graz}, B} \quad (22)$$

where

$VS_{\text{graz}, A}$	VS excretion rate with faeces during phase A during grazing (in kg animal ⁻¹)
VS_A	VS excretion rate with faeces during phase A (in kg animal ⁻¹)
$x_{\text{graz}, A}$	fraction of time spent grazing in phase A (in a a ⁻¹)
etc.	

Grazing is not taken into account for phase C (see Fig. 6).

2.6 Nitrogen excretion rates

Overall N excretion rates of faeces and urine can be derived from the element balance (Equation (23)). The basic relation for heifers immediately before first calving is

$$m_{\text{excr}} = m_{\text{faec}} + m_{\text{ren}} = m_{\text{feed}} - m_g$$

$$= \left(\frac{\Sigma ME_A}{\eta_{\text{ME}, A}} \cdot x_{\text{XP}, A} + \frac{\Sigma ME_B}{\eta_{\text{ME}, B}} \cdot x_{\text{XP}, B} + \frac{\Sigma ME_C}{\eta_{\text{ME}, C}} \cdot x_{\text{XP}, C} \right) \cdot x_{\text{N}, \text{XP}} - m_g \quad (23)$$

with

m_{excr}	overall N excretion (in kg animal ⁻¹)	ΣME_A	cumulative ME requirements in phase A including grazing (see Equation (14) (in MJ animal ⁻¹))
m_{faec}	faecal N excretion (in kg animal ⁻¹)	η_{ME}	mean ME content of diets A (in MJ kg ⁻¹)
m_{ren}	renal N excretion (in kg animal ⁻¹)	$x_{\text{CP}, A}$	mean CP content of diets A (in kg kg ⁻¹)
m_{feed}	N intake with feed (in kg animal ⁻¹)	$x_{\text{N}, \text{CP}}$	N content of crude protein ($x_{\text{N}, \text{CP}} = 1/6.25 \text{ kg kg}^{-1}$)
m_g	N retained in the heifer (in kg animal ⁻¹)	etc.	

⁵ CH₄ emissions from storage are calculated using MCFs and VS excretion rates. MCF for regions with cold climate (applies to Germany) according to IPCC (2006): pasture: 0.01 kg kg⁻¹; straw based systems: 0.02 kg kg⁻¹; slurry based system: 0.10 to 0.25 kg kg⁻¹.

The excretion rates for single phases have to be determined accordingly (for phases B and C by analogy):

$$m_{\text{excr}, A} = m_{\text{faec}, A} + m_{\text{ren}, A} = m_{\text{feed}, A} - m_{\text{g}, A} = \frac{\sum ME_A}{\eta_{\text{ME}, A}} \cdot x_{\text{XP}, A} \cdot x_{\text{N}, \text{XP}} - m_{\text{g}, A} \quad (24)$$

Different emission factors for grazing and manure management (housing, storage, spreading) are used to quantify emissions of NH_3 and N_2O from the manure management systems.⁶ Hence, excretion during grazing has to be determined. Again, *this model assumes* that this can be achieved using the equivalents of Equations (21) and (22) in combination with Equation (24).

$$m_{\text{excr}, A} = m_{\text{excr}, \text{house}, A} + m_{\text{excr}, \text{graz}, A} \quad (25)$$

and

$$m_{\text{excr}, \text{graz}, A} = m_{\text{excr}, A} \cdot x_{\text{graz}, A} \quad (26)$$

$$m_{\text{excr}, \text{graz}, B} = m_{\text{excr}, B} \cdot x_{\text{graz}, B} \quad (27)$$

where

- $m_{\text{excr}, A}$ N excretion rate for phase A (in kg animal⁻¹)
- $m_{\text{excr}, \text{house}, A}$ N excretion rate for phase A during housing (in kg animal⁻¹)
- $m_{\text{excr}, \text{graz}, A}$ N excretion rate for phase A during grazing (in kg animal⁻¹)
- $x_{\text{graz}, A}$ fraction of time spent grazing in phase A (in a⁻¹)
- etc.

2.6.1 N retained

The final weight of the animal, w_4 , is the weight before calving. Hence the amount of N retained in the animal is

$$m_{\text{g}} = (w_4 - w_1) \cdot x_{\text{N}, \text{he}} \quad (28)$$

where

- m_{g} amount of N retained in the animal (in kg animal⁻¹)
- w_4 final weight of the heifer (in kg animal⁻¹)
- w_1 start weight of the heifer (in kg animal⁻¹)
- $x_{\text{N}, \text{he}}$ N content of the heifer (in kg kg⁻¹)

The amounts of N retained are calculated for each single phase.

2.6.2 Faecal N excretion

Daily excretion of faecal N is obtained as described in Poulsen and Kristensen (1998) as a function of both the N and the DM matter intake rates.

⁶ For other cattle (including heifers), the EMEP (2013) partial emission factors for NH_3 can be combined to about 0.5 kg kg⁻¹ for German housed animals and the subsequent manure management, whereas typical losses on pasture amount to 0.06 kg kg⁻¹ (both emission factors related to total ammoniacal nitrogen (TAN) excreted).

$$m_{\text{faec},d} = a_{\text{faec}} \cdot m_{\text{feed},d} + (b_{\text{faec}} \cdot M_{\text{feed},d} + c_{\text{faec}} \cdot M_{\text{feed},d}^2) \cdot x_{\text{N,CP}} \quad (29)$$

where

- $m_{\text{faec},d}$ daily N excretion of faeces (in kg animal⁻¹ d⁻¹)
 a_{faec} constant ($a_{\text{faec}} = 0.04 \text{ kg kg}^{-1}$)
 $m_{\text{feed},d}$ daily N intake of feed (in kg animal⁻¹ d⁻¹)
 b_{faec} constant ($b_{\text{faec}} = 0.02 \text{ kg kg}^{-1}$)
 $M_{\text{feed},d}$ daily dry matter intake (in kg animal⁻¹ d⁻¹)
 c_{faec} constant ($c_{\text{faec}} = 0.0018 \text{ kg}^{-1} \text{ animal d}$)
 $x_{\text{N,CP}}$ N content of crude protein ($x_{\text{N,CP}} = 1/6.25 \text{ kg kg}^{-1}$)

This non-linear equation can be expressed in terms of ME intake and, by analogy to the equation of cumulative ME intake (Equation (11)), be processed to obtain an equation of the cumulative excretion of faecal N (valid for constant Δw only):

$$\sum m_{\text{faec}} = \frac{1}{\Delta w} \cdot \left[p \cdot (w_4 - w_1) + \frac{q}{2} \cdot (w_4^2 - w_1^2) + \frac{r}{3} \cdot (w_4^3 - w_1^3) \right] \quad (30)$$

where

- $\sum m_{\text{faec}}$ cumulative excretion of faecal N of a heifer (in kg animal⁻¹)
 Δw daily weight gain (in kg animal⁻¹ d⁻¹)
 p coefficient (in kg animal⁻¹)
 w_4 final weight of heifer (in kg animal⁻¹)
 w_1 start weight of heifer (in kg animal⁻¹)
 q coefficient (in kg kg⁻¹ animal⁻¹)
 r coefficient (in kg kg⁻² animal⁻¹)

The coefficients p , q and r are defined as follows:

$$p = A \cdot a + B \cdot a^2 \quad (31)$$

$$q = A \cdot b + 2 B \cdot a \cdot b \quad (32)$$

$$r = B \cdot b^2 \quad (33)$$

with a and b as defined by Equations (12) and (13), and

$$A = \frac{a_{\text{faec}} \cdot x_{\text{N,DM}} + b_{\text{faec}} \cdot x_{\text{N,CP}}}{\eta_{\text{ME}}} \quad (34)$$

$$B = \frac{c_{\text{faec}} \cdot x_{\text{N,CP}}}{\eta_{\text{ME}}^2} \quad (35)$$

where

- a_{faec} constant ($a_{\text{faec}} = 0.04 \text{ kg kg}^{-1}$)
 $x_{\text{N,DM}}$ N content of feed dry matter (in kg kg⁻¹)
 b_{faec} constant ($b_{\text{faec}} = 0.02 \text{ kg kg}^{-1}$)
 c_{faec} constant ($c_{\text{faec}} = 0.0018 \text{ kg}^{-1} \text{ animal d}$)
 $x_{\text{N,CP}}$ N content of crude protein ($x_{\text{N,CP}} = 1/6.25 \text{ kg kg}^{-1}$)
 η_{ME} ME content of feed dry matter (in MJ kg⁻¹)

Equation (30) is used to calculate excretion for single feeding phases.

2.6.3 Renal N excretion

For each phase, renal N excretion (so-called total ammoniacal nitrogen, TAN) is obtained from the overall and the faecal N according to

$$m_{\text{TAN,A}} = m_{\text{excr,A}} - m_{\text{faec,A}} \quad (36)$$

where

- $m_{\text{TAN,A}}$ amount of N in urine excreted during phase A (in kg animal⁻¹)
 $m_{\text{excr,A}}$ cumulative amount of N excreted during phase A (in kg animal⁻¹)
 $m_{\text{faec,A}}$ amount of N in faeces excreted during phase A (in kg animal⁻¹)

and similarly for phases B and C.

3 Sensitivity analysis

3.1 Definition of standard heifer input parameters

3.1.1 Animal weights, weight gain and share of grazing – the basic data set

The **start weight** w_1 is given by the final weight of calves. As in Dämmgen et al. (2013) we use 125 kg animal⁻¹. The **final weight**, w_4 , is 625 kg animal⁻¹. The time spent as a heifer is 730 d or 24 months (see Figure 1). Hence, the **weight gain** amounts to 685 g animal⁻¹ d⁻¹. This leads to the following set of times and weights:

	days		kg animal ⁻¹
τ_1	0	w_1	125
τ_2	365	w_2	375
τ_3	669	w_3	583
τ_4	730	w_4	625

Table 2

Composition of diets, contents related to dry matter (for sources see text)

constituent		share	ME content	digestibility of organic matter	contents [kg kg ⁻¹]				
		kg kg ⁻¹	MJ kg ⁻¹	kg kg ⁻¹	crude protein	crude fibre	nutrient free extracts	ether extract	crude ash
diet A (house) (also diet C)	grass silage	0.40	10.0	0.72	0.162	0.245	0.452	0.042	0.099
	maize silage	0.47	10.2	0.73	0.080	0.228	0.582	0.028	0.082
	concentrate *	0.13	12.3	0.83	0.205	0.143	0.554	0.042	0.065
	mineral mixture	0.01	0.0		0.000				
mean			10.3	0.73	0.128	0.221	0.532	0.035	0.086
diet A (grazing)	pasture grass	0.90	10.0	0.72	0.180	0.225	0.430	0.040	0.125
	concentrate	0.10	12.3	0.83	0.205	0.143	0.554	0.042	0.065
	mean		10.2	0.73	0.182	0.216	0.442	0.040	0.119
diet B (house)	grass silage	0.988	10.0	0.72	0.162	0.245	0.452	0.042	0.099
	straw	0.010	6.4	0.45	0.038	0.450	0.425	0.017	0.070
	mineral mixture	0.002	0.0		0.000				
	mean		9.9	0.71	0.161	0.242	0.451	0.042	0.098
diet B (grazing)	pasture grass	1.00	10.0	0.72	0.180	0.225	0.430	0.040	0.125

* standard concentrate MLF 18/3 (Milchleistungsfutter 18/3)

The mean **share of grazing**, x_{graz} , is set to 0.2 a⁻¹ (German mean, see Figure 5).

3.1.2 Nitrogen contents of heifers and calves

Data sets containing N contents of heifers were collated by Janssen (2006). The analysis of these data sets resulted in a correlation between daily weight gains and CP retained that suggests an N content of 0.0244 kg kg⁻¹. This N content is used in the subsequent calculations.⁷⁾

3.1.3 Diet composition and feed properties

Information on diet composition, in particular on ME and CP contents as well as dry matter intake rates, were provided in Warzecha et al. (2002); Weiß et al. (2005); Kirchgeßner et al. (2008). Gross energy contents of the feed constituents had to be collated from Beyer et al. (2004). The calculations use the standard feed properties applied in the German agricultural emission inventory (Rösemann et al., 2015) as listed in Table 2.

3.2 Sensitivity of the model

The model should reflect the effect of important variables such as weight gain and final weight. It should also be insensitive to small changes in intermediate entities such as the intermediate weight w_2 .

3.2.1 Variation of daily weight gains

For a given final weight, increasing daily weight gain leads to a shorter lifespan implying decreasing overall ME requirements. This is because overall ME required for maintenance decreases with decreasing lifespan. Lower ME requirements result in to lower overall feed intake and therefore decreasing CH₄ emissions from enteric fermentation as well as VS and N excretion per animal. A 5 % increase in weight gains results in reductions of 3 % for enteric CH₄, 2 % for VS, 3 % for total N and TAN. Figure 7 shows the results of model calculations for a final weight of 625 kg animal⁻¹ for housed heifers ($x_{\text{graz}} = 0$ a⁻¹).

3.2.2 Variation of final weights

Increased final weights result in increased energy requirements and feed intake if weight gains are kept constant ($\Delta w = 0.685$ kg animal⁻¹ d⁻¹, $x_{\text{graz}} = 0.2$ a⁻¹). Hence, all excretion rates will increase: A 5 % increase in final weights results in increased excretion rates of 9 % for enteric CH₄, 10 % for VS, total N and TAN. The results are illustrated in Figure 8.

3.2.3 Variation of the fraction of grazing

If weight gains and final weights are kept constant ($\Delta w = 0.685$ kg animal⁻¹ d⁻¹, $w_4 = 625$ kg animal⁻¹), grazing has a major effect on N excretion rates. It can be seen that the extension of the grazing period is unfavourable for N excretion, as pasture grass has a comparatively higher CP content. In addition, an adequate ME supply in phase B presupposes higher dry matter intake. If the grazing time is extended by one month, both N

⁷⁾ The N contents of dairy cows as provided by DLG (2005) are slightly higher ($X_{\text{N,he}} = 0.0256$ kg kg⁻¹). DLG (2014) has 0.025 kg kg⁻¹ for dairy cattle irrespective of subcategories.

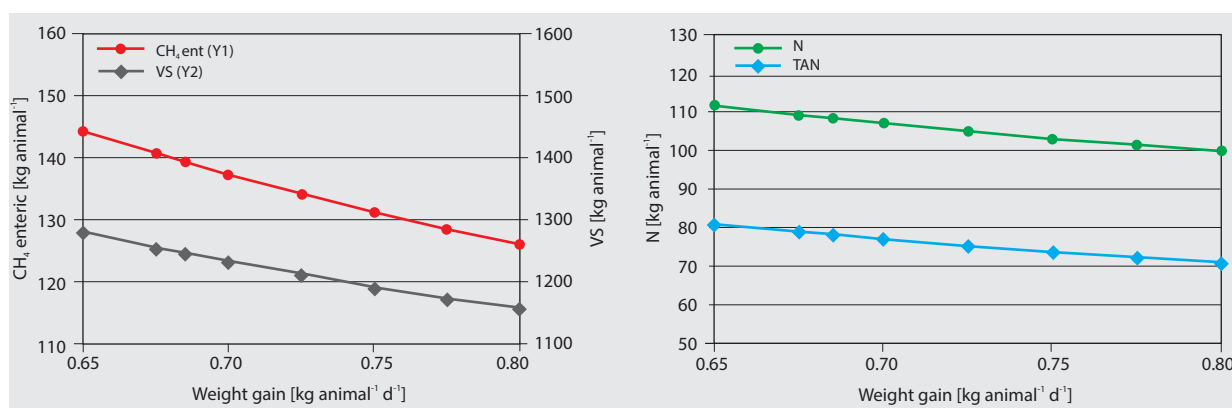


Figure 7

Variation of CH_4 , VS and N excretion as a function of daily weight gains Δw

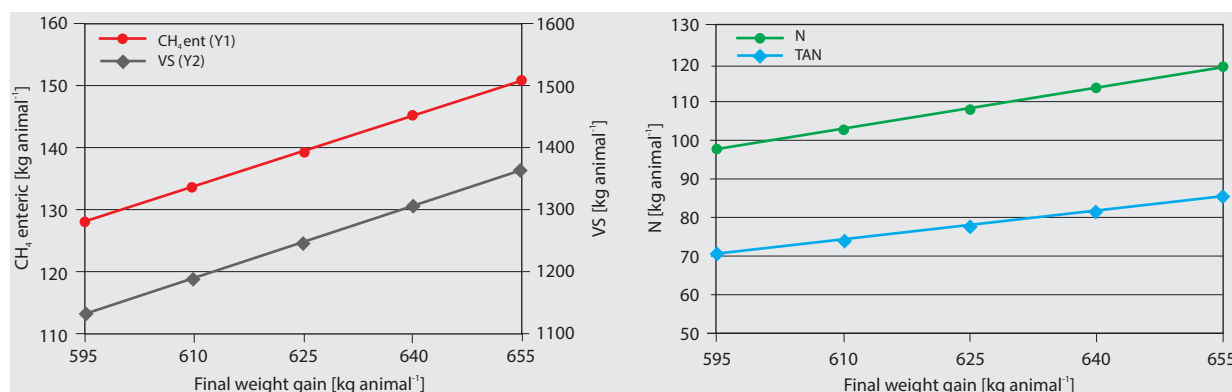


Figure 8

Variation of CH_4 , VS and N excretion as a function of final weight gain w_4

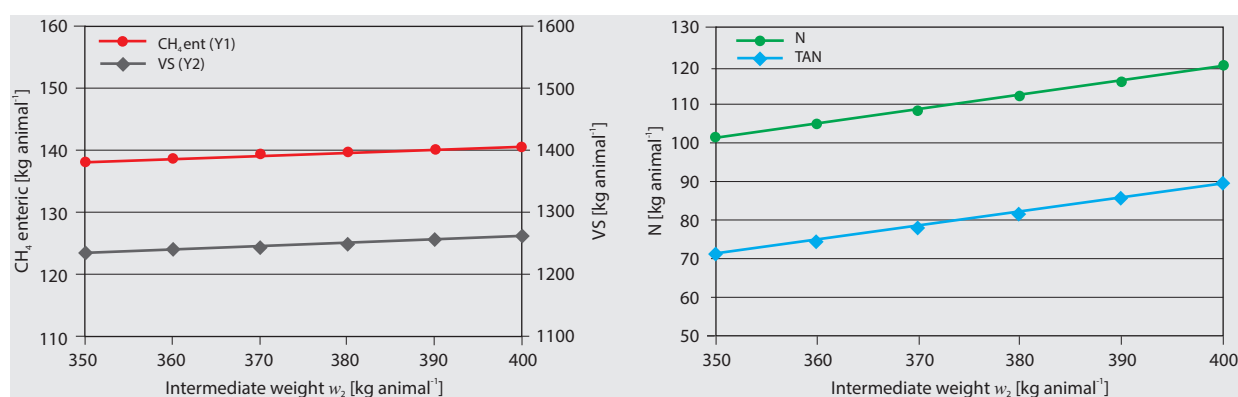


Figure 9

Variation of CH_4 , VS and N excretion as a function of the fraction of time spent grazing, x_{graz}

and TAN excretion increase by about 5 %. The effect on enteric CH_4 emissions and VS excretion is marginal (Figure 9).

3.2.4 Variation of the intermediate weight w_2

The intermediate weight w_2 marks the transition from phase A to phase B, i.e. from higher ME contents to lower ones. A change in w_2 (375 kg animal⁻¹) by 5 % is equivalent to about a

month spent in the respective phase. Weight gain and final weight w_4 were kept constant ($\Delta w = 0.685 \text{ kg animal}^{-1} \text{ d}^{-1}$, $w_4 = 625 \text{ kg animal}^{-1}$). An overall grazing fraction x_{graz} of 0.2 a⁻¹ (German mean, see Figure 5) was used. As can be seen from Figure 10, a change in w_2 results in a minor change of CH_4 emissions ($<1 \text{ kg animal}^{-1}$) and of VS excretion (1 %). Reduction by 5 % yields an increase of less than 1 % in N and TAN excretion, and vice versa.

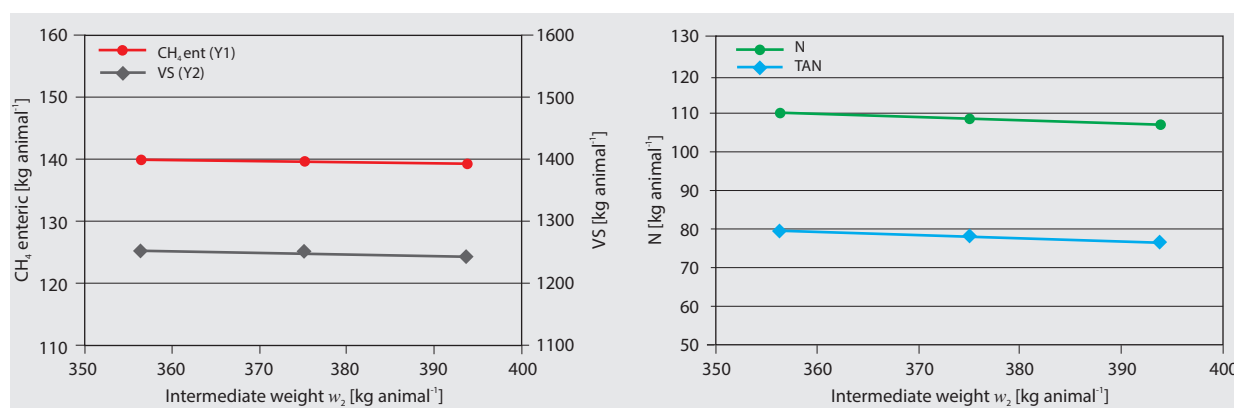


Figure 10

Variation of CH_4 , VS and N excretion as a function of the intermediate weight w_2

3.2.5 Variation of the amount of nitrogen retained

With the large amount of N taken in (about $100 \text{ kg animal}^{-1}$), the amount retained is comparatively small (about $12 \text{ kg animal}^{-1}$). Figure 11 illustrates that changes of about 5 % in the N content of the animal, $x_{\text{N, he}}$, have almost no influence on the amounts of N excreted (data for $\Delta w = 0.685 \text{ kg animal}^{-1} \text{ d}^{-1}$, $w_4 = 625 \text{ kg animal}^{-1}$, $x_{\text{graz}} = 0.2 \text{ a a}^{-1}$).

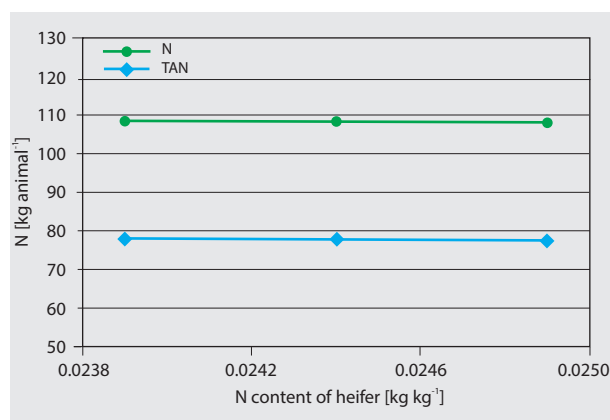


Figure 11

Variation of N excretion as a function of the N content of the heifer, $x_{\text{N, he}}$

4 Discussion

4.1 Uncertainties of input variables

4.1.1 ME requirements

The basic tool used in the present calculations was developed from Table 1 provided by GfE (2001) with additions by Kirchgeßner et al. (2008). GfE (2001) gives no information on uncertainties. Table 1 is the *only* official data set available. This table lists daily ME requirements which are themselves modelled from the requirements for the daily gains of protein, fat and energy. The relevant data base is more than two decades old and does not reflect current animal weights. No

comparison with experimental data is described. This situation is highly unsatisfactory. Nevertheless, this table is used in all relevant publications and official recommendations in Germany, e.g. DLG (2008) and KTBL (2014).

4.1.2 Feeding phases and grazing

The assumptions on feeding phases are based on information given in recommendations (DLG, 2008), supplemented by Le Cozler et al. (2008) and Benson (2011) and backed up by expert judgement (Martin, Lange, see above). No uncertainties have been reported.

4.2 Comparison of the results with data provided in the literature

It is obvious that the **ME requirements** are identical with those provided in the official GfE documentation they were derived from. The results obtained with the model agree well with the ME requirements given in DLG (2014) ($55 \text{ GJ animal}^{-1} \text{ ME per heifer plus calf}$). Rutzmoser and Ettle (2012) found that experimental ME intake rates concur well with GfE data for weights between 100 and $450 \text{ kg animal}^{-1}$, and fall below them at higher weights (about 10 % for $550 \text{ kg animal}^{-1}$). The comparison is aggravated by the fact that for high animal weights weight gains are not constant and much higher than those used in the present model. It remains uncertain whether or not a linear extrapolation is adequate and – if not – how large potential errors are.

The **enteric CH_4 emissions** calculated using this model exceed those which use the default methane conversion factor (MCF) provided in IPCC (2006). The latter are obtained as fraction of the energy equivalent of CH_4 of the gross energy (GE) intake ($0.065 \pm 0.01 \text{ MJ MJ}^{-1}$ for cattle in developed countries). The **MCF** obtained with the model in this work ranges between 0.082 MJ MJ^{-1} and 0.085 MJ MJ^{-1} (Table 3). If one accepts the validity of the approach of Kirchgeßner et al. (1995) which passed international tests (see discussion in Dämmgen et al., 2012) then the IPCC methodology appears to be inadequate for German dairy heifers.

VS excretion rates for comparison could not be identified in the literature.

N excretion rates fit the official German recommendations published in DLG (2014) almost exactly. The German Ministry for Nutrition, Agriculture and Consumer Protection (BMELV, 2007) recommends to use 60 kg animal⁻¹ a⁻¹ for a grassland based production and 42.7 kg animal⁻¹ a⁻¹ production without grassland for the lifespan of a heifer.⁸⁾

4.3 Emission reduction potentials

The example calculations of emission reduction potentials shown in Table 3 reveal just one clear option: For given final weights, increased daily weight gains might help reduce ME required for maintenance, emissions per animal and – as will be seen – costs per animal.

Figure 8 suggests that decreased final weights might be an option for emission reduction. However, lower final weights of heifers equate lower start weights of dairy cows, which also means smaller rumens. In practice, milk production aims at high milk yields per cow, which presupposes a high-volume rumen to guarantee a sufficient feed intake rate.

Figure 2 illustrates that present mean weight gains fall below 0.7 kg animal⁻¹ d⁻¹. Official N excretion rates recommended by BMELV (2007) use a weight gain of about 0.85 kg animal⁻¹ d⁻¹, suggesting that this increase is feasible. This is supported by the following: Heifers should have a weight of about 400 kg animal⁻¹ when they are first inseminated. This would result in a weight of first calving of 600 to 650 kg animal⁻¹. Hoffmann (2001) collated data that show that the animal weight is the crucial entity for successful insemination and pregnancy. The above mentioned weights can be strived for in a time span of 20 to 22 months with a moderate increase of weight gains to about 0.80 kg animal⁻¹ d⁻¹. Carefully composed diets combined with adequate grazing will prevent them from adiposity and at the same time have positive influence on health, performance level and longevity of cows and on the economic results of milk production (e.g. Drackley, 2005). Losand (2009) reported that the exhaustion of the growth potential had also beneficial effects on fertility and calving as well as milk yield in the first lactation period.

⁸⁾ BMELV (2007) provides excretion rates for dairy heifers plus calves and an overall life span of 27 months. Excretion rates for calves are also listed. Hence the annual excretion rate is obtained as

$$m_{N, \text{heifer}} = \frac{m_{N, \text{ya}} - m_{N, \text{calf}}}{\Delta t_{\text{heifer}}}$$

where

$m_{N, \text{heifer}}$ amount of N excreted by a heifer per year (in kg animal⁻¹ a⁻¹)

$m_{N, \text{ya}}$ amount of N excreted per young animal (0 to 27 months) (in kg animal⁻¹)

$m_{N, \text{calf}}$ amount of N excreted per calf (0 to 4 months) (in kg animal⁻¹)

Δt_{heifer} life span of a heifer (23 months)

Back-calculations show that this data was obtained for a weight gain of about 0.850 kg animal⁻¹ d⁻¹. With the assumption that the N excretion of a calf is 5.1 kg animal⁻¹, these excretion rates match those obtained in this model sufficiently, keeping in mind that marginal weights are not identical and that no diet composition is mentioned.

Increased weight gains of about 9 % result in excretions and emissions that are reduced by about the same amount. Reduced cumulative ME requirements also mean reduced feed intake, and this results in a reduction of costs per heifer. For Simmental heifers, Spiekers (2013) reported a decrease of feed costs of about 50 Euros per month not needed to rear heifers.

Table 3

Effects of increased weight gains and extended grazing period on excretions and emissions⁹⁾

ΔW		$x_{\text{graz}} = 0.20 \text{ a a}^{-1}$		$x_{\text{graz}} = 0.30 \text{ a a}^{-1}$	
		0.7	0.8	0.7	0.8
emissions					
CH ₄ enteric	kg animal ⁻¹	137	126	138	127
DM intake	kg animal ⁻¹	4972	4667	5023	4715
VS excreted	kg animal ⁻¹	1235	1159	1242	1166
N excreted	kg animal ⁻¹	107.3	100.1	111.1	103.6
TAN excreted	kg animal ⁻¹	77.4	71.2	81.0	74.6
CH ₄ manure management *	kg animal ⁻¹	14.6	13.7	13.0	12.1
NH ₃ manure management *	kg animal ⁻¹	35.1	32.3	32.2	29.6
N ₂ O manure management	kg animal ⁻¹	0.59	0,55	0,53	0.49
GHG	kg animal ⁻¹ CO ₂ -eq	3977	3659	3932	3617
characteristic entities					
methane conversion factor **	MJ MJ ⁻¹	0.085	0.083	0.084	0.082
TAN content ***	kg kg ⁻¹	0.72	0.71	0.73	0.72
* includes emissions during grazing; ** according to IPCC, see text; *** ratio of TAN excreted to total N excreted.					

* includes emissions during grazing; ** according to IPCC, see text; *** ratio of TAN excreted to total N excreted.

Table 3 also shows the effect of increased grazing. Grazing reduces both GHG and NH₃ emissions. Extended grazing does not really affect CH₄ emissions from enteric fermentation if one uses the diets described in Table 2. DM intake is slightly higher, and so are VS and N excretions. However, CH₄ emissions from storage and NH₃ and N₂O emissions from manure management are affected favourably.

⁹⁾ Conditions for the calculation of emissions: loose housing, slurry; storage: conventional tank with natural crust; half of the slurry broad cast on short grass, the other half spread on arable land using trailing hoses, incorporation within 4 h. Emission factors as in IPCC (2006) and EMEP (2013); global warming potentials of 25 and 298 kg kg⁻¹ CO₂-eq for CH₄ and N₂O, respectively, as in IPCC (2007).

Appendices

Appendix 1 A steady equation for daily ME requirements of housed animals

An analysis of Table 1 reveals that for each weight gain Δw the daily ME requirements are almost linear functions of the actual weights:

$$ME = a + b \cdot w \quad (A1)$$

where

ME daily ME requirements (in MJ animal⁻¹ d⁻¹)

a constant (in MJ animal⁻¹ d⁻¹, see Table A1)

b coefficient (in MJ kg⁻¹ d⁻¹, see Table A1)

w actual weight (in kg animal⁻¹)

Table A1

Numerical values of the constant a and the coefficient b in Equation (A1)

Δw kg animal ⁻¹ d ⁻¹	constant a MJ animal ⁻¹ d ⁻¹	coefficient b MJ kg ⁻¹ d ⁻¹	R^2
0.40	13.5928571	0.1129286	0.9999
0.50	12.1400000	0.1262667	0.9998
0.60	11.8872727	0.1384606	0.9999
0.70	11.2090909	0.1530424	0.9999
0.80	10.6844444	0.1676000	0.9999
0.90	9.1500000	0.1856667	0.9998
1.00	6.8285714	0.2065000	0.9997

Both a and b can be expressed as functions of Δw . As shown in Figure A1, non-linear regressions are needed to best reproduce the values of the table. The values for $\Delta w = 0.4$ kg animal⁻¹ d⁻¹ are considered outliers. Figure 2 illustrates that they can be neglected for this study as a weight gain of $\Delta w = 0.4$ kg animal⁻¹ d⁻¹ is irrelevant. It has to be kept in mind that the relations in Table A1 apply to housed animals without any grazing.

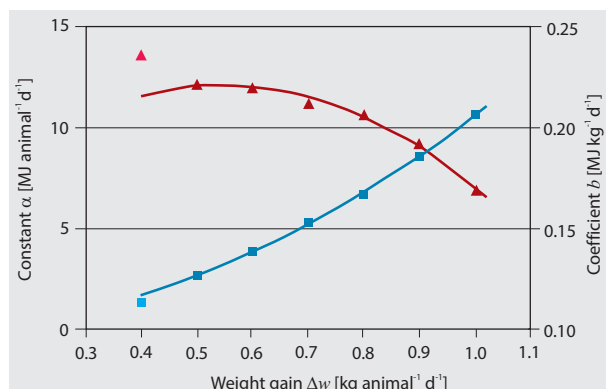


Figure A1

Constant a (triangles) and coefficient b (circles) in Equation (A1) as functions of weight gain Δw

$$\text{constant} \quad a = \alpha + \beta \cdot \Delta w + \gamma \cdot \Delta w^2 \quad (A2)$$

$$\text{coefficient} \quad b = \delta + \varepsilon \cdot \Delta w + \zeta \cdot \Delta w^2 \quad (A3)$$

with

a constant (in MJ animal⁻¹ d⁻¹, see Equation (A1))

α constant ($\alpha = 4.7665678$ MJ animal⁻¹ d⁻¹)

β coefficient ($\beta = 26.7961752$ MJ kg⁻¹)

Δw daily weight gain (in kg animal⁻¹ d⁻¹)

γ coefficient ($\gamma = -24.5867088$ MJ animal kg⁻² d)

b coefficient (MJ kg⁻¹ d⁻¹, see Equation (A1))

δ constant ($\delta = 0.097908$ MJ kg⁻¹ d⁻¹)

ε coefficient ($\varepsilon = 0.0061962$ MJ animal kg⁻² d⁻²)

ζ coefficient ($\zeta = 0.1020296$ MJ animal² kg⁻³ d)

Regression coefficients R^2 for Equations (A2) and (A3) are 0.9902 and 0.9997, respectively. Figure A2 illustrates the usefulness of this approach.

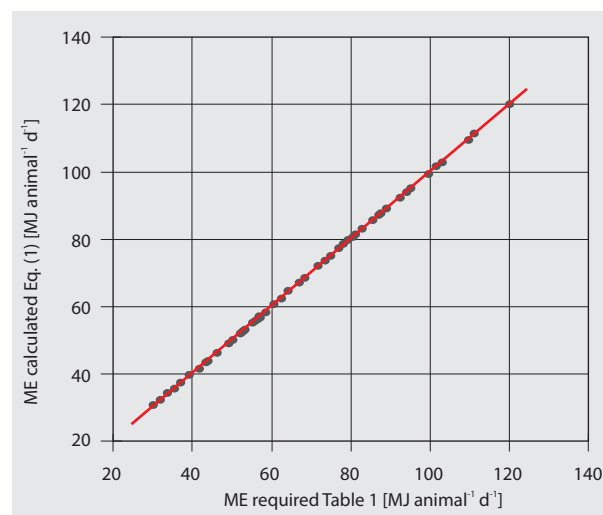


Figure A2

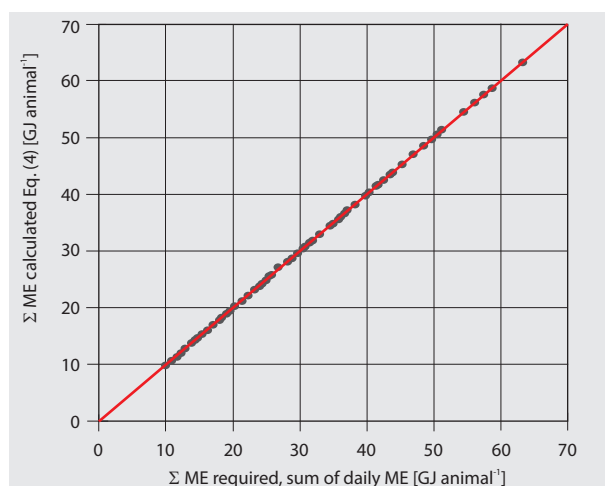
Comparison of daily ME requirements in Table 1 (data for $\Delta w = 0.4$ kg animal⁻¹ d⁻¹ excluded) and as calculated using Equations (A1) to (A3) (slope: 0.9997; offset: 0.016 MJ animal⁻¹ d⁻¹; R^2 0.9999)

Appendix 2 Cumulative ME requirements of housed animals

Equation (A1) was used to establish a list of ME requirements for each single day between start weight and final weight, using a start weight of 125 kg animal⁻¹ (the final weight of calves in the German inventory). Adding up the single-day ME requirements over the heifers' entire life span as function of Δw and w_{fin} leads to the cumulative requirements. These are presented in Table A2.

Table A2Cumulative ME requirements of heifers (in GJ animal⁻¹)

final weight w_m (kg animal ⁻¹)	daily weight gain Δw (kg animal ⁻¹ d ⁻¹)							
	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
300	13.65	12.81	12.13	11.50	11.00	10.53	10.17	9.81
350	18.97	17.82	16.86	16.04	15.33	14.76	14.21	13.78
400	24.92	23.43	22.17	21.14	20.27	19.52	18.85	18.28
450	31.50	29.64	28.12	26.80	25.68	24.74	23.93	23.21
500		36.46	34.57	33.02	31.72	30.57	29.63	28.75
550			41.60	39.79	38.21	36.94	35.75	34.81
600					45.24	43.74	42.51	41.39
650						51.18	49.68	48.50
700							57.49	56.13

**Figure A3**

Comparison of cumulative ME requirements obtained from adding up single-day ME requirements and using Equation (A4) (slope: 1.0009; offset: 0.0031 GJ animal⁻¹; R² 1.0000)

Cumulative ME requirements can also be obtained from the application of Equation (A4). This Equation is derived from

Equation (A1) by integration using the approach described in the appendix in Haenel et al. (2011). Figure A3 shows that the results are almost identical to that obtained by adding up single-daily ME requirements.

$$\sum ME = \frac{1}{\Delta w} \cdot \left[a \cdot (w_4 - w_1) + \frac{b}{2} \cdot (w_4^2 - w_1^2) \right] \quad (A4)$$

where

$\sum ME$ cumulative ME requirements
(in MJ animal⁻¹)

Δw daily weight gain (in kg animal⁻¹ d⁻¹)

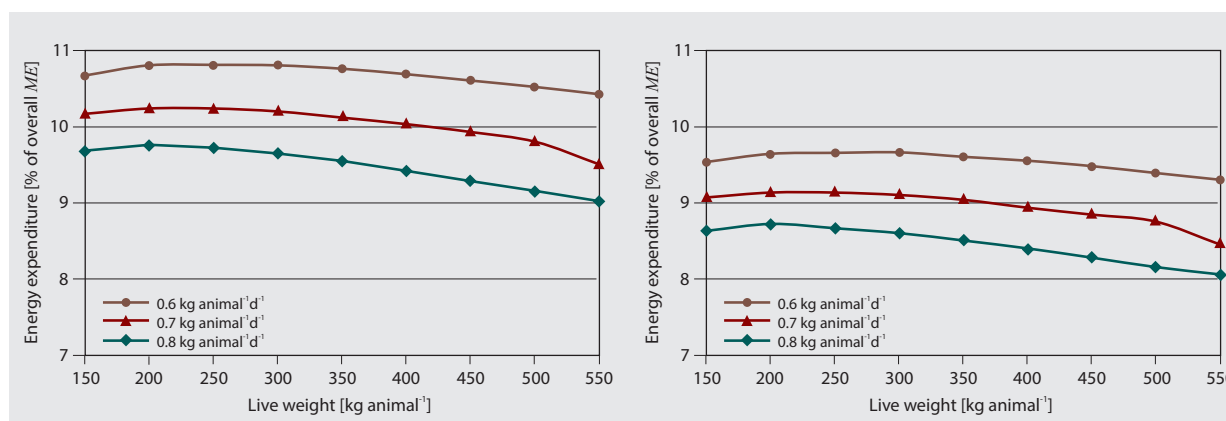
a coefficient (in MJ animal⁻¹ d⁻¹, see Equation (A2))

w_4 final weight of heifer (in kg animal⁻¹)

w_1 start weight of heifer (in kg animal⁻¹)

b coefficient (in MJ kg⁻¹ d⁻¹, see Equation (A3))

It can be shown that the cumulative ME requirements for any subsection of the heifers' life span (i.e. any phase) can be described by an equation of the same type as Equation (A4) using the appropriate weight gains Δw and initial and final weights, w_m and w_n , respectively. Note that Δw is assumed to be constant over the period considered.

**Figure A4**

Energy expenditure due to grazing in per cent of ME_0 (overall ME), for various live weights and weight gains. Left: using IPCC (2006) default value; right: using DLG (2014) recommendation.

Appendix 3 Energy expenditure related to overall ME intake

IPCC (2006) and DLG (2014) provide factors to estimate energy expenditure for grazing. Whereas IPCC (2006) gives a general estimate for all cattle of 17 % of the ME required for maintenance, ME_m , GfE (2001) states that grazing heifers may result in increased ME_m demands of up to 15 %. The energy expenditure may have to be related to overall ME requirements, $ME_{overall}$, if ME_m is not available.

GfE (2001) provides tables for both requirements: Table 1.5.2 gives ME_m requirements as a function of live weight, Table 1.5.3 contains $ME_{overall}$ requirements as a function of live weight and weight gain. This data was used to derive a factor characterising energy expenditure relative to the overall ME requirements of dairy heifers.

The comparison in Figure A4 illustrates that both procedures deviate from 10 % by about ± 1 % in any case. A factor of 1.1 MJ MJ⁻¹ for total ME requirements taking primarily the national recommendation into account is conservative.

References

- ADR – Arbeitsgemeinschaft Deutscher Rinderzüchter (1993, and subsequent years) Rinderproduktion in Deutschland 1992 (and subsequent years). Bonn : ADR
- Benson F (2011) Health benefits of grazing dairy heifers (2011) [online]. To be found at <<http://smallfarms.cornell.edu/2011/01/09/health-benefits-of-grazing-dairy-heifers/>> [quoted 04.08.2015]
- Beyer M, Chudy A, Hoffmann L, Jentsch W, Laube W, Nehring K, Schiemann R (2004) Rostocker Futterbewertungssystem : Kennzahlen des Futterwertes und Futterbedarfs auf der Basis von Nettoenergie. Dummerstorf : Forschungsinst Biol landwirtschaftl Nutztiere, 392 p
- BMLV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2007) Bekanntmachung der Neufassung der Düngeverordnung : vom 27. Februar 2007 [online]. To be found at <http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F%40attr_id%3D%27bgbl107s0221.pdf%27#_bgbl_%2F%2F%40attr_id%3D%27bgbl107s0221.pdf%27__1438689491615> [quoted 04.08.2015]
- Brosh A, Henkin Z, Ungar ED, Dolev A, Orlov A, Yehuda Y, Aharoni Y (2006) Energy cost of cows' grazing activity : use of the heart rate method and the global positioning system for direct field estimation. *J Dairy Sci* 84:1951-1967
- Dämmgen U, Haenel H-D, Rösemann C, Hutchings N J, Brade W, Lebzin P (2009) Improved national calculation procedures to assess energy requirements, nitrogen and VS excretions of dairy cows in the German emission model GAS-EM. *Landbauforsch* 59(3):233-252
- Dämmgen U, Haenel H-D, Rösemann C, Brade W, Müller-Lindenlauf M, Eurich-Menden B, Döhler H, Hutchings NJ (2010) An improved data base for the description of dairy cows in the German agricultural emission model GAS-EM. *Landbauforsch* 60(2):87-100
- Dämmgen U, Amon B, Gyldenkerne S, Hutchings NJ, Kleine Klausung H, Haenel H-D, Rösemann C (2011) Reassessment of the calculation procedure for the volatile solids excretion rates of cattle and pigs in the Austrian, Danish and German agricultural emission inventories. *Landbauforsch* 61(2):115-126
- Dämmgen U, Rösemann C, Haenel H-D, Hutchings NJ (2012) Enteric methane emissions from German dairy cows. *Landbauforsch* 62(1/2):21-31
- Dämmgen U, Meyer U, Rösemann C, Haenel H-D, Hutchings NJ (2013) Methane emissions from enteric fermentation as well as nitrogen and volatile solids excretions of German calves - a national approach. *Landbauforsch Appl Agric Forestry Res* 63(1):37-46
- Dawson IER, Carson AF (2005) Grazing systems for dairy herd replacements. In: Garnsworthy PC (ed) *Calf and heifer rearing : principles of rearing modern dairy heifer from calf to calving*. Nottingham : Nottingham UP, pp 253-276
- Di Marco ON, Aello MS (1998) Energy cost of cattle walking on the level and on a gradient. *J Range Management* 51:9-13
- DLG - Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft (2005) Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen landwirtschaftlicher Nutztiere. Frankfurt a M : DLG-Verl, 69 p, Arb DLG 199
- DLG - Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft (2008) Jungrinderaufzucht : Grundstein erfolgreicher Milcherzeugung. Frankfurt a M : DLG-Verl, 64 p, Arb DLG 203
- DLG - Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft (2014) Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen der landwirtschaftlicher Nutztiere. Frankfurt a M : DLG-Verl, 120 p, Arb DLG 199
- Drackley JK (2005) Early growth effects on subsequent health and performance of dairy heifers. In: Garnsworthy PC (ed) *Calf and heifer rearing : principles of rearing modern dairy heifer from calf to calving*. Nottingham : Nottingham UP, pp 213-235
- EMEP (2013) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013 : report No 12/2013 [online]. To be found at <<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>> [quoted 07.08.2015]
- Fischer C, Gerhards-Lindner E, Hennig S von, Heutelbeck A, Künne H, Landmann D, Pommerien H, Schulz J (2011) Rinderhaltung : Rinderaufzucht, Milchkühhaltung, Milcherzeugung, Rindermast und Mutterkühe ; Leitfaden [online]. To be found at <http://www.nibis.de/nibis3/uploads/2bbs-poelking-oesselmann/files/Leitfaden_Druckversion_02.12.2011.pdf> [quoted 07.08.2015]
- GfE – Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (2001) Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Milchkühe und Aufzuchttrinder. Frankfurt a M : DLG-Verl, 136 p, Energie- Nährstoffbedarf landwirtschaftl Nutztiere 6
- Haenel H-D, Dämmgen U, Laubach P, Rösemann C (2011) Update of the calculation of metabolizable energy requirements for pigs in the German agricultural emission inventory. *Landbauforsch* 61(3):217-228
- Hoffmann M (2001) Richtige Fütterung der Jungrinder als Voraussetzung für hohe Milchleistungen. *Schr Thüringer Landesanst Landwirtsch* 2001(1):5-12
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2006) 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories : vol 4: Agriculture, forestry and other land use ; Chapter 10: Emissions from livestock and manure management [online]. To be found at <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf> [quoted 10.08.2015]
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Climate change 2007 : working group I: The physical science basis : 2.10.2: Direct global warming potentials [online]. To be found at <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html> [quoted 10.08.2015]
- Janssen H (2006) Untersuchungen zum Einfluß unterschiedlicher Fütterungsintensitäten auf das Körperwachstum, die Futteraufnahme, die Körperzusammensetzung sowie den Stoff- und Energieansatz von weiblichen Kälbern und Aufzuchttrindern. Göttingen : Cuvillier, 171 p
- Kirchgessner M, Windisch W, Müller HL (1994) Methane release from dairy cows and pigs. *EAAAP Publ* 76:399-402
- Kirchgessner M, Windisch W, Müller HL (1995) Nutritional factors for the quantification of methane production. In: von Engelhardt W, Leonhard-Marek S, Breves G, Gieseke D (eds) *Ruminant physiology : digestion, metabolism, growth and reproduction*. Stuttgart : Enke, pp 333-348
- Kirchgeßner M, Roth FX, Schwarz FJ, Stangl G (2008) Tierernährung : Leitfaden für Studium, Beratung und Praxis. Frankfurt a M : DLG-Verl, 635 p
- KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2014). Betriebsplanung Landwirtschaft 2014/15. Darmstadt : KTBL, 832 p
- Le Cozler Y, Lollivier V, Lacasse P, Disenhaus C (2008) Rearing strategy and optimizing first-calving targets in dairy heifers: a review. *Animal* 2:1393-1404
- LfL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2013) Gruber Tabelle zur Fütterung in der Rindermast. Freising-Weihenstephan : LfL, 86 p
- LfL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2014) Gruber Tabelle zur Fütterung der Milchkühe, Zuchttrinder, Schafe, Ziegen. Freising-Weihenstephan : LfL, 94 p

- Losand B (2009) Aufzuchtintensität von Jungrindern : Ergebnisse aus einem Mehrländerprojekt [online]. To be found at <http://www.landwirtschaft-mv.de/cms2/LFA_prod/LFA/content/de/Fachinformationen/Tierproduktion/Kaelber-_und_Jungrinderaufzucht/09Kaelber_Jungrinderseminar/Losand.pdf> [quoted 04.08.2015]
- Poulsen HG, Kristensen VF (1998) Standard values for farm manure : a revaluation of the Danish standard values concerning the nitrogen, phosphorus and potassium content of manure. Foulum : Danish Inst Agric Sci, 160 p, DIAS Rep 7
- Rösemann C, Haenel H-D, Dämmgen U, Freibauer A, Wulf S, Eurich-Menden B, Döhler H, Schreiner C, Bauer B, Osterburg B (2015) Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2013 : report on methods and data (RMD) submission 2015. Braunschweig : Johann Heinrich von Thünen Inst, 372 p, Thünen Rep 27
- Römer A (2011) Untersuchungen zur Nutzungsdauer bei Deutschen Holsteins. Züchtungskunde 83:8-20
- Rutzmoser K, Ettle T (2012) Ein Modell zur Beschreibung der ME-Aufnahme von weiblichen Aufzuchtrindern. In: Mair C (ed) Die Zukunft der Tierernährung : 11. BOKU-Symposium Tierernährung ; 19. April 2012, Wien ; Tagungsband. Wien : Eigenverl Inst Tierernährung, Tierische Lebensmittel Ernährungsphysiol, pp 42-46
- Spiekens H (2013) Milch und Fleisch effizient erzeugen. Milchpraxis 51:47-50
- UBA - Umweltbundesamt (2015) German informative inventory report [online]. To be found at <<http://iir-de.wikidot.com/>> [quoted 07.08.2015]
- Warzecha H, Kuhaupt H, Anacker G, Hubrich JR (2002) Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Jungrinderaufzucht. Jena : TLL, 14 p
- Weiß J, Pabst W, Strack KE, Granz S (2005) Tierproduktion. Stuttgart : Parey, 579 p

Zum Verhalten laktierender Sauen und zur Lebendmasseentwicklung der Ferkel in Einzel- oder Gruppenhaltung mit drei oder sechs Würfen im ökologischen Landbau

Ralf Bussemas und Friedrich Weißmann*

Zusammenfassung

Ein Vergleich unter Öko-Bedingungen mit 7-wöchiger Säugezeit zwischen Einzelsäugen (ES, 75 Würfe), 3er-Gruppensäugen (GS3, 51 Würfe) und 6er-Gruppensäugen (GS6, 39 Würfe) sollte bisher fehlende Informationen zum Verhalten gruppiert laktierender Sauen und zur Gewichtsentwicklung der Ferkel liefern. Der Versuch startete mit der Wurfgruppierung 14 Tage *post natum* (t1). Die video-gestützten Verhaltensbeobachtungen erfolgten an t1 und t2 (Säugezeitmitte) von 8:00 bis 20:00 Uhr. Die Ferkelwiegungen fanden wöchentlich bis zum 63. Lebenstag statt.

Beim nicht-agonistischen Verhalten zeigte GS6 verglichen mit ES und GS3 an t1 und t2 signifikant die Bauchlage am meisten und Sitzen am wenigsten, ES dagegen die Seitenlage nur an t1 am häufigsten. Aktivität sowie Dauer und Anzahl der Säugeakte blieben von den Haltungssystemen unbeeinflusst. Agonistisches Verhalten (Aufreiben, Gewalt gegen Ferkel, Saugaktstörungen, Heck-, Rumpf- und Kopfstöße) trat an t1 bei GS3 und GS6 mit gleicher und an t2 bei GS6 mit tendenziell geringerer Rate auf. Bei GS6 traten an t2 im Vergleich zu t1 sämtliche Agonismen signifikant niedriger auf, bei GS3 nur Kopfstöße und Saugaktstörungen. Die Gewichtsentwicklung der Ferkel blieb vom Haltungssystem der laktierenden Sau unbeeinflusst.

Unter dem gegebenen Management scheint nichts gegen die Etablierung des Gruppensäugens unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus zu sprechen

Schlüsselwörter: Laktierende Sau, Einzelhaltung, Gruppenhaltung, Verhalten, Lebendmasseentwicklung, ökologischer Landbau

Abstract

Behaviour of lactating sows and live weight development of piglets in organic agriculture with regard to single housed vs. group housed sows by three or by six

A study with single housed organic lactating sows (SH, 75 litters) vs. organic lactating sows group housed by 3 (GH3, 51 litters) and by 6 (GH6, 39 litters) should inform about sow behaviour (SB) and piglets' live weight development. The trial started with litter grouping 14 days *post natum* and ended at day 63 with a total suckling period of seven weeks. Piglets were weekly weighted and SB was recorded at grouping day (t1) and in the middle of the lactation period (t2) for a 12-h-interval from 8:00 a.m. to 8:00 p.m. via video recording.

Regarding non-agonistic SB, GH6 showed significantly the highest level of ventral recumbency and the lowest level of sitting at t1 and t2, whereas lateral recumbency was significantly highest for SH at t1; activity and duration and number of suckling acts were unaffected by the housing systems. Rate of agonistic SB (chasing-up; violence against piglets; sucking interruptions; head, body and stern butts) was similar at t1 between the two group housing variants but non-significantly lower at t2 for GH6. At t2 compared to t1, all agonistic traits rated significantly lower in GH6, whereas this applies to GH3 only for sucking interruptions and head butts. Piglets' daily weight gain and variances in growth were unaffected by the housing systems.

We conclude that group housing with three or six lactating sows seems to be an option for organic piglet production.

Keywords: lactating sow, single housing, group housing, behaviour, organic agriculture

* Thünen-Institut für Ökologischen Landbau, Trenthorst 32, D-23847 Westerau

1 Einleitung

Das Einzelsäugen, d. h. die Einzelhaltung der Sau mit ihrem Wurf während der Säugezeit, ist das Standardverfahren in der konventionellen wie auch ökologischen Ferkelerzeugung. Dagegen besitzt die kombinierte Einzel- und Gruppenhaltung der säugenden Sau, nachfolgend Gruppensäugen genannt, nur eine geringe Verbreitung (Früh et al., 2007). Sie ist durch die Einzelhaltung der Sau beim Ferkeln mit anschließender Zusammenführung von mehreren säugenden Sauen zur Gruppenhaltung zu einem definierten Zeitpunkt nach der Geburt gekennzeichnet (Weber, 2000).

Abgeleitet aus dem Verhalten der wildlebenden Vorfahren unserer heutigen Hausschweine, gilt diese Haltungsform als besonders tiergerecht, da sie den Sauen und Ferkeln die Ausübung einer speziellen natürlichen Verhaltensweise rund um die Geburt weitgehend ermöglicht (Graves, 1984), denn das Wildschwein separiert sich kurz vor der Geburt von der Rotte und gliedert sich zusammen mit ihrem Wurf beginnend nach rund 10 Tagen *post partum* wieder ein (Pitts et al., 2000). Daher erscheint Landwirten und Beratern die Gruppenhaltung laktierender Sauen im Ökologischen Landbau als beachtenswerte Haltungsalternative, die zu einer positiven Akzentuierung der Außenwirkung der ökologischen Schweinehaltung beitragen kann (Aubel et al., 2007). Andererseits werden im Rahmen des Gruppensäugens aber auch mögliche negative Effekte diskutiert, welche die Akzeptanz des Verfahrens mindern können, wie z.B. Unruhe sowie agonistisches Verhalten der Sauen (Weary et al., 2002), Cross-Suckling mit Auseinanderwachsen der Ferkelgruppen (Wülbers-Mindermann, 1992) und im Krankheitsfall eine gruppenbedingt höhere Anzahl betroffener Tiere (Weber, 2000). Diese negativen Aspekte wurden bei Bestandsaufnahmen in der Betriebspraxis der ökologischen Ferkelerzeugung tatsächlich auch teilweise bestätigt (Früh et al., 2007).

Eine wissenschaftlich fundierte Gegenüberstellung der Systeme Einzelsäugen und Gruppensäugen, wie z. B. bei Weber (2000) für die konventionelle Erzeugung, ist unter den speziellen Bedingungen des ökologischen Landbaus bisher nicht erfolgt. Vor allem von der deutlich verlängerten Säugezeit in der ökologischen Schweinehaltung von mindestens 40 Tagen (EU-Öko-VO 834/2007) im Vergleich zur konventionellen Haltung sind erhebliche Effekte auf die o. g. Problemfelder und damit auf die Umsetzbarkeit und Akzeptanz des Gruppensäugens denkbar.

Daher wurden unter vollständig ökologischen Haltungsbedingungen die drei Varianten (i) Einzelsäugen, (ii) Gruppensäugen mit drei versammelten Würfen (nachfolgend 3er-Säugen genannt) und (iii) Gruppensäugen mit sechs versammelten Würfen (nachfolgend 6er-Säugen genannt) miteinander verglichen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse zur Lebendmasseentwicklung der Saug- und Aufzuchtferkel sowie ersten Einblicke in das agonistische und nicht-agonistische Verhalten der säugenden Sau sollen zu einer rational begründeten Entscheidungsfindung in der ökologischen Ferkelerzeugung beitragen.

2 Material und Methoden

Der Versuch wurde auf dem vollständig nach EU-Öko-Verordnung (EU-Öko-VO 834/2007 und EU-Öko-VO 889/2008) zertifizierten Versuchsbetrieb des Thünen-Instituts für Ökologischen Landbau in Wulmenau/Trenthorst durchgeführt. Das Projekt untergliederte sich in zwei aufeinander folgende Module. Modul 1 beinhaltete den Vergleich von Einzelsäugen mit 3er-Säugen vom September 2007 bis Juli 2009, Modul 2 den von Einzelsäugen mit 6er-Säugen vom Juni 2009 bis Februar 2011.

2.1 Tiere und Haltung

Die Sauenherde umfasste im Versuchszeitraum rund 40 Sauen der Schaumann-Genetik inkl. Remonte. Die Remontierung erfolgte im Wesentlichen durch Wechselkreuzung mit Deutschem Edelschwein und Deutschem Landschwein. Als Endstufeneber zur Erzeugung der Ferkel kam ein Piétrain-Duroc-Kreuzungsbeber über KB zum Einsatz. Sämtliche Sauen und Ferkel waren einzeltiergezeichnet.

Das Abferkeln fand bei sämtlichen Sauen in Einzelhaltung statt. Der Versuch begann mit dem durchschnittlich 14. Lebenstag der Ferkel. Zu diesem Zeitpunkt wechselten die Tiere der Kontrollgruppe von der Abferkelbucht in die Einzelsäugebuchten und die Versuchsgruppen von der Abferkelbucht in die Gruppensäugebuchten unter strikter Beachtung folgender drei Gruppierungsregeln:

- Ferkelaltersunterschied max. 5 Tage
- keine erkrankten Sauen ins Gruppensäugen
- keine einzelne Jungsau ins Gruppensäugen

Darüber hinaus erfolgte die Verteilung der Würfe in Kontrolle und Versuch zufällig durch Münzwurf.

Die Ferkel wurden nach durchschnittlich siebenwöchiger Säugezeit donnerstags durch Ausstallung der Sau (in die dynamische Großgruppe sämtlicher nicht säugender Sauen) abgesetzt. Die Umstellung der Ferkel in den Aufzuchtstall erfolgte am darauffolgenden Montag. Die Ferkel aus dem Gruppensäugen gingen als jeweils geschlossene Gruppen in den Aufzuchtstall. Die entsprechenden Ferkelgruppen aus dem Einzelsäugen konnten sich nach Öffnen einer Buchtentür im Kotgang in der 5-tägigen Übergangszeit vor der Umstellung kennenlernen und wechselten dann als gemeinsame Gruppe in den Aufzuchtstall. Der Versuch endete am durchschnittlich 63. Lebenstag der Ferkel nach im Mittel zwei Wochen Aufzuchtperiode.

Die allopathischen Tierbehandlungen erfolgten auf Basis der individuellen Entscheidung des Betreuungspersonals unter Inanspruchnahme der fachtierärztlichen Bestandsbetreuung. Verluste umfassen die tatsächlich verendeten Tiere, die bis zum Zeitpunkt des Ausscheidens in die Auswertung eingehen (vergl. Tabelle 1).

Die Aufstallung im Einzelsäugen erfolgte in der sog. Trenthorster Abferkelbucht (Abbildung 1, linke Bucht mit kleinem Ferkelnest bis 14 Tage *post natum* – Abferkelbucht; rechte Bucht mit großem Ferkelnest ab 14 Tage *p. n.* –

Einzelsäugebucht). Sie besteht aus einem gemeinsamen Bewegungsbereich für Sau und Ferkel, einem durch Ferkelschlupf abgetrennten Bereich nur für die Ferkel mit beheizbarem Ferkelnest sowie einem von Geburt an frei zugänglichen Außenauslauf für Sau und Ferkel. Konform zur EU-Öko-VO umfassen der Auslauf 5,9 m² und das Stallinnere 7,8 m². Sämtliche Bereiche werden mit Stroh eingestreut.

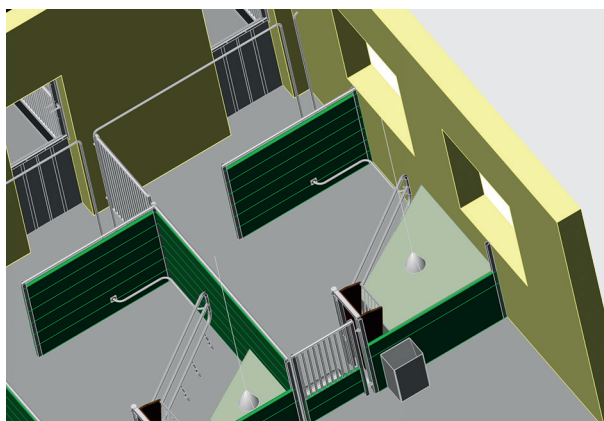


Abbildung 1

Trenthorster Abferkelbucht (links) und Einzelsäugebucht (rechts)

Das Gruppensäugen erfolgte in der BAT-Gruppensäugebucht (Beratung Artgerechte Tierhaltung e.V., Witzenhausen, Abbildung 2). Sie ist durch die gleichen Ausstattungsmerkmale wie die Einzelsäugebucht gekennzeichnet und hat zusätzlich verschließbare Einzelfressplätze für die Sauen. Der Auslauf umfasst 3,8 m²/Sau, das Stallinnere 7,8 m²/Sau inkl. eines Ferkelschlupfs von 6,9 m². Sie ist für die Beherbergung

von 3 Würfen konzipiert und wird durch die Herausnahme der entsprechenden Trennwand zur Gruppensäugebucht für 6 Würfe.

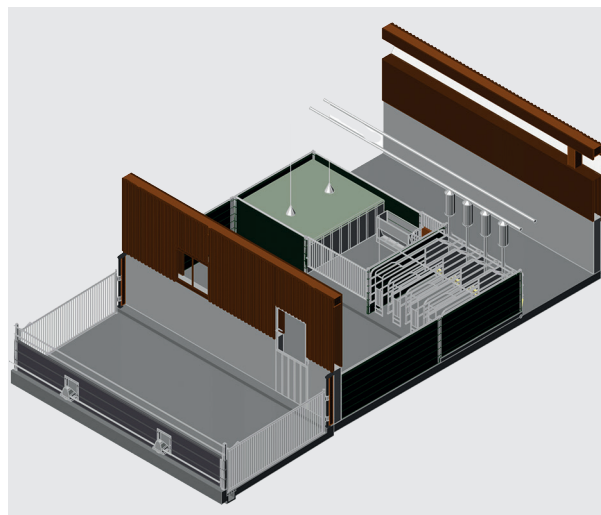


Abbildung 2

BAT-Gruppensäugebucht

Der Aufzuchtstall ist in Anlehnung an das Nürtinger System als Bettenstall mit Auslauf konzipiert. Die vollständig eingestreuten Buchten für max. 30 Ferkel verfügen über ein EU-Öko-VO konformes Platzangebot von 0,4 m²/Tier im Auslauf und von 0,6 m²/Tier im Stallinneren mit beheizbarem Ferkelnest zur Beherbergung sämtlicher Ferkel.

Die Fütterung mit Rationen 100 % ökologischer Herkunft erfolgte in Anlehnung an die Empfehlungen von Zollitsch et al. (2002) für die ökologische Schweinehaltung.

Tabelle 1

Charakterisierung der Versuchstiere bzw. Datengrundlage in Abhängigkeit des Haltungsverfahrens der säugenden Sau (MW / SA)

Kriterium	Haltungsverfahren der säugenden Sau			
	Modul 1		Modul 2	
	Einzelsäugen	3er-Säugen	Einzelsäugen	6er-Säugen
Ausgewertete Würfe, n	50 (49*)	51	25	39
Mittlere Wurfnummer	4,4 / 1,4	3,9 / 1,6	6,6 / 2,7	5,9 / 2,4
Lebende Ferkel pro Wurf zu Versuchsbeginn, n	9,5 / 2,4	9,6 / 2,2	8,8 / 2,6	8,5 / 2,2
Lebende Ferkel pro Wurf beim Absetzen, n	9,3 / 2,1	9,3 / 2,2	8,7 / 2,6	8,4 / 2,2
Lebende Ferkel pro Wurf beim Versuchsende**, n	9,2 / 2,2	9,3 / 2,2	8,6 / 2,6	8,4 / 2,2
Lebensalter der Ferkel zu Versuchsbeginn, d	15,0 / 4,2	15,6 / 3,1	14,4 / 3,3	13,7 / 1,6
Lebensalter der Ferkel beim Absetzen, d	45,5 / 4,3	49,7 / 5,3	46,6 / 3,7	48,7 / 1,4
Lebensalter der Ferkel am Versuchsende, d	63,9 / 2,0	63,6 / 2,7	62,8 / 2,0	61,7 / 1,4
Ferkel zu Versuchsbeginn (Gruppierung), n	474	492	219	332
Ferkel am Versuchsende, n	460	476	215	327
Rate verendeter Ferkel im Versuchszeitraum	3,1 %	3,2 %	1,8 %	1,5 %
Anteil mindestens einmal allopathisch behandelter Ferkel	7,8 %	7,8 %	7,7 %	4,9 %
* Für die Verhaltensuntersuchung				
** Auf Basis der Wurfzugehörigkeit ermittelt				

Die rationierte Zuteilung des Laktationsfutters (12,9 MJ ME/kg, 165 g XP/kg, 8,5 g Ca/kg, 6,3 g P/kg, 88 % TM) orientierte sich an der Wurfgröße und der körperlichen Entwicklung der einzelnen Sau mit einem Maximum von 8 kg bzw. 100 MJ ME pro Tier und Tag.

Die Konzentratfütterung der Ferkel (13,1 MJ ME/kg, 189 g XP/kg, 10,8 g Lysin/kg, 87 % TM) erfolgte als Ein-Phasen-Fütterung. Sie begann im Mittel mit dem 14. Lebenstag – also zu Versuchsbeginn. Während der Säugezeit wurde das Futter ausschließlich innerhalb des nur den Ferkeln zugänglichen Buchtenbereichs vorgelegt. Ab einem stabilen täglichen Futterverbrauch von 100 g/Tier wurde das Konzentratfutter über einen Futterautomaten bei täglicher Befüllung semi-ad libitum gereicht. Auch im Aufzuchtstall standen Futterautomaten zur Verfügung.

Zusätzlich zum Konzentratfutter wurde tagesrationiert Klee-Gras-Silage für Sauen und Ferkel ab der Geburt über eine gesonderte Raufe pro Bucht im Auslauf angeboten.

Eine Erfassung der tatsächlich verzehrten Konzentrat- und Raufuttermengen erfolgte nicht.

2.2 Datenerfassung

Es wurden 165 Würfe mit insgesamt 1517 Ferkeln zu Versuchsbeginn erfasst. Die Tabelle 1 charakterisiert die Versuchstiere bzw. die Datengrundlage.

Die **Verhaltensersassungen** bezogen sich ausschließlich auf die laktierenden Sauen und erfolgten über Videoaufzeichnungen ohne Ton an den Beobachtungszeitpunkten „Gruppierungstag“ am Ende der zweiten Laktationswoche (Versuchsbeginn) und „Säugezeitmitte“ im Verlauf der vierten Laktationswoche jeweils in einem 12-stündigen Zeitraum von 8:00 bis 20:00 Uhr in den Buchtenkompartimenten „Stallinnenraum“ und „Auslauf“, die Sauen und Ferkeln gemeinsam zur Verfügung standen.

Folgende Verhaltensweisen wurden erfasst:

- Nicht-agonistisches Verhalten (Einzel- und Gruppensäugen):
 - Aktivität (Fortbewegen, Erkunden, Fressen) – Dauer der Verhaltensweise
 - Liegen in Bauchlage – Dauer der Verhaltensweise
 - Liegen in Seitenlage – Dauer der Verhaltensweise
 - Sitzen – Dauer der Verhaltensweise
 - Säugen* (Beginn: mindestens 50 % der Ferkel eines Wurfs massieren das Gesäuge)
 - Säugeakte – Anzahl der Verhaltensweise
 - Säugedauer – Dauer der Verhaltensweise
- *eigentlich als Säugeversuch zu bezeichnen, da nutritive von nicht-nutritiven Saugakten ohne Tonaufzeichnung nicht zu unterscheiden sind
- Agonistisches Verhalten (nur im Gruppensäugen):
 - Auftreiben (nur zwischen Sauen); Heck-, Kopf- und Rumpfstöße (nur zwischen Sauen); Säugeaktstörungen (nur durch Interaktion mit Sauen und/oder saugenden Ferkeln); Gewalt gegen Ferkel – Anzahl der jeweiligen Verhaltensweisen

Die Sauen waren für die Datenaufnahme einzeltiergezeichnet. Die Auswertung der Videobänder erfolgte durch

eine geschulte Person durch Zeiterfassung und Auszählen der entsprechenden Verhaltensäußerungen auf Stundenbasis mit Hilfe einer in der Scriptsprache VBA selbst erstellten Auswertesoftware; eine Unterscheidung in Stallinneres und Auslauf erfolgte nicht.

Die Erfassung **der Lebendmasseentwicklung** der Ferkel zur Beschreibung der Lebendmasse selbst, der Tageszunahmen und des Variationskoeffizienten des Wurfgewichtes erfolgte durch wöchentliche Wiegen im Versuchszeitraum mit Hilfe einer Durchtriebswaage auf Einzeltierbasis mit den Eckpunkten Gruppierungstag (= Versuchsbeginn), Absetzen und Versuchsende (vergl. Tabelle 1).

2.3 Statistische Auswertung

Zur Klärung der Frage, ob die drei unterschiedlichen Haltungsverfahren die erhobenen Merkmale beeinflussten, kamen die nachfolgend vorgestellten, varianzanalytischen Modelle unter Verwendung von SAS (Version 9.1) zur Anwendung. Häufigkeiten wurden mit der Prozedur FREQ getestet. Der Test der LSQ-Mittelwerte auf signifikante Unterschiede erfolgte bei einer Signifikanzschwelle von $p < 0,05$.

Verhalten

Es konnten Sauen von 164 komplett vorliegenden Würfen berücksichtigt werden. Für die Auswertung der erhobenen Merkmale wurden

- 2-h-Intervalle generiert, um für die Abschätzung des fixen Effektes der Tageszeit über sämtliche Verhaltenskriterien hinweg durchgehend mit Beobachtungswerten versehene Subzellen nutzen zu können.
- die Sauen aus verhaltensbiologischen Gründen in drei unterschiedliche Wurfnummer-Klassen eingruppiert (I (1. und 2. Wurf), II (3. bis 6. Wurf), III (> 6. Wurf)), da ganz allgemein das Alter der Sauen einen Einfluss auf deren Verhalten hat (Gäde et al., 2005).
- die agonistischen Verhaltensmerkmale in eine binominale Verteilung (Auftreten ja – nein) überführt, da die Auszählung der Verhaltensäußerungen (von 0 bis ≥ 8 Beobachtungen pro Merkmal) eine extrem rechtsschiefe Verteilung ergab.

Beim Verhalten blieb das Modul ohne statistisch absicherbaren Effekt. Daher wurden beim nicht-agonistischen Verhalten das Einzelsäugen zum Zeitpunkt des 3er-Säugens und das Einzelsäugen zum Zeitpunkt des 6er-Säugens zu einer gemeinsamen „Kontrolle“ zusammengeführt.

Folgendes generelle Modell wurde angewendet:

$$Y_{ijklmn} = \mu + HV_i + BZ_j + TZ_k + WN_l + HV \times BZ_{ij} + Sau_m + e_{ijklmn}$$

wobei

- Y_{ijklmn} = Merkmal
- μ = Populationsmittel
- HV_i = Fixer Effekt des Haltungsverfahrens der säugenden Sau (3 Niveaus: Einzelsäugen, 3er-Säugen, 6er-Säugen)

- BZ_j = Fixer Effekt des Beobachtungszeitpunkts (2 Niveaus: Gruppierungstag, Mitte Säugezeit)
 TZ_k = Fixer Effekt der Tageszeit (6 Niveaus: Zweistundenintervalle von 8:00 bis 20:00 Uhr)
 WN_i = Fixer Effekt der Wurfnummer-Klasse (3 Wurfnummer-Klassen)
 HVxBZ_{ij} = Interaktion aus Haltungsverfahren x Beobachtungszeitpunkt
 Sau_m = Zufälliger Effekt der Sau
 e_{ijklmn} = Restfehler

Das nicht-agonistische Verhalten wurde auf der Ebene des Einzeltieres in der Prozedur MIXED mit sämtlichen o. g. Effekten analysiert.

Das agonistische Verhalten wurde in der Prozedur GLIMMIX auf Buchten- bzw. Gruppenebene und somit ohne den fixen Effekt der Wurfnummer-Klasse sowie ohne den zufälligen Effekt der Sau untersucht.

Lebendmasseentwicklung

Für die Auswertung der Lebendmasseentwicklung standen Datensätze von insgesamt 1517 Ferkeln zu Versuchsbeginn bis 1478 Ferkel am Versuchsende zur Verfügung. Die statistische Überprüfung der Lebendmasseentwicklung ergab einen signifikanten Effekt des Moduls, der die Zusammenfassung des Einzelsäugens zu einer gemeinsamen Kontrollgruppe verbietet. Daher wurde die Lebendmasseentwicklung getrennt nach den zwei Modulen (Modul 1: Einzel- vs. 3er-Säugen; Modul 2: Einzel- vs. 6er-Säugen) ausgewertet. Dadurch entfällt auch der direkte Vergleich zwischen 3er- und 6er-Säugen.

Da die Lebendmasseentwicklung neben der Wurfnummer auch entscheidend von der Leistungsfähigkeit der Sau selbst beeinflusst wird, wurde als fixer Effekt die „Sau-Güte“ in das Modell aufgenommen. Dazu wurden die mittleren Tageszunahmen der Ferkel eines Wurfs auf der Basis der Einzeltierwiegungen zur Geburt und nach der ersten Lebenswoche in 3 Klassen eingeteilt: gut (> 200 g/Ferkel und Tag), mittel (150 bis 200 g/Ferkel und Tag), schlecht (< 150 g/Ferkel und Tag).

Folgendes Modell kam in der Prozedur GLM für beide Module zur Anwendung:

$$Y_{ijkl} = \mu + HV_i + WN_j + SG_k + e_{ijkl}$$

wobei

- Y_{ijkl} = Merkmal
 μ = Populationsmittel
 HV_i = Fixer Effekt des Haltungsverfahrens der säugenden Sau (2 Niveaus: Einzelsäugen, Gruppensäugen)
 WN_j = Fixer Effekt der Wurfnummer-Klasse (3 Wurfnummer-Klassen; s. o.)
 SG_k = Fixer Effekt der Sau-Güte (3 Güteklassen: gut, mittel, schlecht)
 e_{ijkl} = Restfehler

Bei der Analyse der Lebendmasseentwicklung (Lebendmasse, Tageszunahmen, Variationskoeffizient des Wurfgewichtes) wurden jeweils sämtliche fixen Effekte im o. g. Modell berücksichtigt, ergänzt um die folgenden Kovariablen: (i) Alter (a) und Anzahl (n) der lebenden Ferkel pro Wurf zur Gruppierung (= Versuchsbeginn (vb)), (ii) Alter (a) und Anzahl (n) der lebenden Ferkel pro Wurf beim Absetzen (ab) und (iii) Alter (a) der lebenden Ferkel am Versuchsende (ve). Die Zuordnung der fünf Kovariablen im Modell zeigt Tabelle 6.

3 Ergebnisse

Nicht-agonistisches Verhalten der laktierenden Sauen

Die nachfolgende Tabelle 2 zeigt die Signifikanzlevel der im statistischen Modell zur Auswertung der nicht-agonistischen Verhaltensweisen berücksichtigten Effekte. Dabei bleibt das Haltungsverfahren (HV) ohne statistisch gesicherten Einfluss auf das Aktivitätsverhalten sowie die Dauer der Säugeakte und beim Beobachtungszeitpunkt gilt dies darüber hinaus noch für die Sitzdauer. Dagegen beeinflussen Tageszeit (TZ) und Wurfnummer der Sau (WN) sämtliche Verhaltensausprägungen mit variabler Signifikanz. Da diese beiden letztgenannten Einflussfaktoren für die Projektfragestellung von untergeordneter Relevanz sind, werden sie nachfolgend nicht näher besprochen.

Tabelle 2

Signifikanzlevel der fixen Effekte sowie Varianzanteil des zufälligen Effektes im statistischen Modell zum nicht-agonistischen Verhalten

Verhaltensmerkmale	HV ¹	BZ ¹	TZ ¹	WN ¹	HVxBZ	Sau ²
Aktivität	ns	ns	***	***	ns	16 %
Liegen in Bauchlage	**	***	***	**	ns	5 %
Liegen in Seitenlage	**	***	***	ns	ns	12 %
Sitzen	***	ns	*	*	*	66 %
Säugedauer	ns	ns	***	***	ns	34 %
Säugeakte	*	***	***	***	ns	4 %

¹ Fixe Effekte: HV - Haltungsverfahren, BZ - Beobachtungszeitpunkt, TZ - Tageszeit, WN - Wurfnummerklasse

² Zufälliger Effekt

ns p ≥ 0,05, * p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001

Tabelle 3 gibt die Ausprägungen der nicht-agonistischen Verhaltensweisen in den drei untersuchten Haltungsverfahren zu den zwei Beobachtungszeitpunkten wider. Sie lassen sich wie folgt beschreiben:

- Am Gruppierungstag (i) bewegt sich das Aktivitätsverhalten in allen drei Haltungsverfahren auf vergleichbarem Niveau, (ii) verbringen die Sauen im 6er-Säugen 39 % des 2h-Intervalls in Bauchlage, wogegen es signifikant abgesichert im 3er-Säugen nur 28 % und im Einzelsäugen nur 25 % sind, (iii) beträgt der Anteil der Seitenlage am 2h-Intervall im Einzelsäugen 33 %, dagegen im 3er-Säugen nur 27 % und im 6er-Säugen nur 21 % in signifikanter Absicherung zum Einzelsäugen, (iv) fällt die Sitzdauer im

Tabelle 3

Nicht-agonistische Verhaltensmerkmale von säugenden Sauen in Abhängigkeit von drei Haltungsverfahren und zwei Beobachtungszeitpunkten (LSQ ± SE)

Nicht-agonistische Verhaltensmerkmale ...	Einheit	Haltungsverfahren der säugenden Sau		
		Einzelsäugen	3er-Säugen	6er-Säugen
... am Gruppierungstag				
Aktivität	(min/2h/Sau)	34,5 ± 3,0	40,9 ± 3,1 ^x	36,2 ± 2,6
Liegen in Bauchlage	(min/2h/Sau)	30,1 ± 2,8 ^{b y}	34,1 ± 2,9 ^{b y}	46,5 ± 2,4 ^{a y}
Liegen in Seitenlage	(min/2h/Sau)	39,3 ± 3,0 ^{a x}	32,1 ± 3,1 ^b	25,2 ± 2,6 ^{b x}
Sitzen	(min/2h/Sau)	3,2 ± 0,8 ^a	3,1 ± 0,8 ^{a y}	0,5 ± 0,7 ^b
Säugedauer	(min/2h/Sau)	12,6 ± 1,2	10,5 ± 1,2	11,8 ± 1,0
Säugeakte	(n/2h/Sau)	2,5 ± 0,1 ^b	2,6 ± 0,1 ^{ab x}	2,9 ± 0,09 ^{a x}
... zur Säugezeitmitte				
Aktivität	(min/2h/Sau)	32,3 ± 3,3	33,7 ± 3,0 ^y	37,2 ± 2,5
Liegen in Bauchlage	(min/2h/Sau)	44,1 ± 3,1 ^{b x}	44,7 ± 2,8 ^{b x}	52,3 ± 2,2 ^{a x}
Liegen in Seitenlage	(min/2h/Sau)	27,3 ± 3,3 ^{a y}	27,4 ± 3,0 ^a	19,1 ± 2,5 ^{b y}
Sitzen	(min/2h/Sau)	3,2 ± 0,8 ^a	4,8 ± 0,8 ^{a x}	0,2 ± 0,7 ^b
Säugedauer	(min/2h/Sau)	12,0 ± 1,2	10,2 ± 1,2	11,8 ± 1,0
Säugeakte	(n/2h/Sau)	2,2 ± 0,1	2,3 ± 0,1 ^y	2,5 ± 0,08 ^y
^{a,b} Unterschiedliche Hochbuchstaben in einer Zeile zeigen signifikante Unterschiede (p < 0,05) zwischen den Haltungsverfahren				
^{x,y} Unterschiedliche Hochbuchstaben in einer Spalte zeigen signifikante Unterschiede (p < 0,05) zwischen den Beobachtungszeitpunkten innerhalb des gleichen Haltungsverfahrens und innerhalb des gleichen Verhaltens				

Einzel- und 3er-Säugen signifikant gesichert um das gut 6-fache länger aus als im 6er-Säugen, (v) nimmt die Säugedauer über alle drei Haltungsverfahren hinweg rund 10 % am 2h-Intervall ein und (vi) ist die Anzahl der Säugeakte im 6er-Säugen zwar geringfügig, aber doch signifikant höher als im Einzelsäugen bei einer Mittelstellung im 3er-Säugen.

- In der Säugezeitmitte (i) bewegt sich das Aktivitätsverhalten wiederum in allen drei Haltungsverfahren auf vergleichbarem Niveau, (ii) ist wiederum die Bauchlage der Sauen im 6er-Säugen signifikant stärker ausgeprägt als im 3er- und Einzelsäugen, (iii) fällt wiederum der Anteil der Seitenlage im 6er-Säugen im Vergleich zum 3er- und Einzelsäugen am geringsten aus, diesmal in signifikanter Absicherung zum 3er-Säugen, (iv) hat auch zu diesem späteren Zeitpunkt das Sitzen im 6er-Säugen eine signifikant geringere Ausprägung als im Einzel- und 3er-Säugen, (v) nimmt wiederum die Säugedauer in allen drei Haltungsverfahren die gleiche Größenordnung am 2h-Intervall ein und (vi) nivelliert sich die Anzahl der Säugeakte über die drei Haltungsverfahren hinweg.
- Der Vergleich der Beobachtungszeitpunkte zeigt, dass (i) das Aktivitätsverhalten im Einzel- und 6er-Säugen auf gleichem Niveau verläuft, dagegen im 3er-Säugen zur Säugezeitmitte im 2h-Intervall signifikant um 8 min reduziert ist, (ii) die Dauer der Bauchlage sich in allen drei Haltungsverfahren zur Säugezeitmitte hin signifikant erhöht – im Einzelsäugen um 47 %, im 3er-Säugen um 31 % und im 6er-Säugen um 12 %, (iii) die Dauer der Seitenlage im 2h-Intervall sich dagegen statistisch gesichert nur im Einzelsäugen um 12 min und im 6er-Säugen um 6 min verringert, während der Rückgang in der Säugezeitmitte im

3er-Säugen um 4 min nur tendenziell ausfällt, (iv) der Umfang des Sitzens im 3er-Säugen statistisch gesichert um 55 % zunimmt, dagegen im 6er-Säugen –allerdings nur tendenziell – sogar abnimmt, während im Einzelsäugen das exakt gleiche Niveau beibehalten wird, (v) bei der mittleren Säugedauer über alle drei Haltungsverfahren hinweg kein signifikanter Unterschied zwischen den Beobachtungszeitpunkten besteht und (vi) die Säugeakte zur Säugezeitmitte rel. einheitlich um rund 12 % zurückgehen, statistisch gesichert aber nur in den beiden Gruppenhaltungsverfahren.

Agonistisches Verhalten der laktierenden Sauen

Eine Übersicht der Signifikanzlevel für die im statistischen Modell berücksichtigten fixen Effekte zur Auswertung der agonistischen Verhaltensweisen gibt die nachfolgende Tabelle 4.

Tabelle 4

Signifikanzlevel der Effekte im statistischen Modell zum agonistischen Verhalten

Verhaltensmerkmale	HV ¹	BZ ¹	TZ ¹	HVxBZ
Auftreiben	ns	***	ns	ns
Gewalt gegen Ferkel	*	*	ns	ns
Heckstöße	ns	*	ns	ns
Kopfstöße	ns	***	ns	ns
Rumpfstöße	ns	***	ns	ns
Störungen des Säugeaktes	ns	**	ns	ns
Agonistisches Verhalten, gesamt	ns	***	ns	ns

¹ HV - Haltungsverfahren, BZ - Beobachtungszeitpunkt, TZ - Tageszeit
 ns p ≥ 0,05, * p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001

Das Haltungsverfahren (HV) beeinflusst nur das Kriterium „Gewalt gegen Ferkel“ statistisch gesichert. Dagegen nimmt der Beobachtungszeitpunkt (BZ) mit wechselnder Signifikanz Einfluss auf die Ausprägung sämtlicher agonistischer Verhaltensweisen.

Tabelle 5 zeigt das Auftreten der agonistischen Verhaltensweisen Auftreiben, Gewalt gegen Ferkel, Heck-, Kopf- und Rumpfstöße sowie Störungen des Säugeaktes im Vergleich der beiden Gruppenhaltungssysteme. Die Darstellung erfolgt in Form des Anteils an den sechs 2h-Intervallen im Beobachtungszeitraum von 8:00 bis 20:00 Uhr, an denen das jeweilige Verhalten aufgetreten ist – nachfolgend als Auftrittsraten bezeichnet.

- Am Gruppierungstag bestehen zwischen den beiden Gruppenhaltungssystemen in der Auftrittsraten der sechs agonistischen Verhaltensweisen keine statistisch gesicherten Unterschiede. Bis auf das Auftreiben, das im 6er-Säugen tendenziell immerhin fast doppelt so häufig auftritt als im 3er-Säugen, manifestieren sich die Kopfstöße und Säugeaktstörungen mit gleicher Auftrittsraten, während im 6er-Säugen Heck- und Rumpfstöße, aber im 3er-Säugen Gewalt gegen Ferkel mit erhöhter Tendenz auftreten.
- Zur Säugezeitmitte bestehen ebenfalls keine statistisch gesicherten Unterschiede zwischen 3er- und 6er-Säugen. Auftreiben erfolgt nun in beiden Haltungsverfahren mit ähnlicher Rate, während im 6er-Säugen eine tendenziell höhere Auftrittsraten der Saugaktstörungen zu verzeichnen ist. Gewalt gegen Ferkel sowie Heck-, Kopf- und

Rumpfstöße manifestieren sich im 6er-Säugen mit tendenziell niedrigerer Auftrittsraten.

- Der Vergleich der Beobachtungszeitpunkte zeigt, dass im 6er-Säugen sämtliche agonistischen Verhaltensweisen in der Säugezeitmitte mit statistisch gesichert niedrigeren Raten im Vergleich zum Gruppierungstag auftreten. Dies gilt im 3er-Säugen nur für die Kopfstöße und die Säugeaktstörungen. Dagegen gehen die Auftrittsraten der anderen vier Agonismen (Auftreiben, Gewalt gegen Ferkel, Heck- und Rumpfstöße) im 3er-Säugen nur tendenziell in der Säugezeitmitte zurück.

Lebendmasseentwicklung der Ferkel

Tabelle 6 zeigt die Signifikanzlevel der im statistischen Modell zur Auswertung der Lebendmasseentwicklung berücksichtigten Effekte. Das Haltungsverfahren (HV) bleibt durchgängig ohne statistisch gesicherten Einfluss auf die Ausprägung von Lebendmasse, Tageszunahmen und Variationskoeffizienten der Wurfgewichte - im deutlichen Gegensatz zu den restlichen fixen Effekten und den Kovariablen im Modell. Da diese für die Projektfragestellung nicht von Relevanz sind, werden sie nicht weiter diskutiert.

Tabelle 7 zeigt in Abhängigkeit des Haltungsverfahrens der säugenden Sau und getrennt nach den Modulen 1 und 2 die Entwicklung von Lebendmasse und Tageszunahmen der Ferkel sowie der Variationskoeffizienten der Wurfgewichte im Verlauf des Versuchszeitraums. Übereinstimmend zur Tabelle 6 springt ins Auge, dass zu keinem Zeitpunkt im Versuchsverlauf bei den drei Aspekten der

Tabelle 5

Anteil von 2h-Intervallen zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (Auftrittsraten) in Abhängigkeit von zwei Haltungsverfahren und zwei Beobachtungszeitpunkten, in denen unterschiedliches agonistisches Verhalten von säugenden Sauen auftrat (LSQ $\pm$ SE)

Agonistische Verhaltensmerkmale ...	Einheit	Haltungsverfahren der säugenden Sau	
		3er-Säugen	6er-Säugen
... am Gruppierungstag			
Auftreiben	%	36,6 ± 7,7	62,9 ± 8,5 ^x
Gewalt gegen Ferkel	%	21,9 ± 6,6	17,6 ± 6,6 ^x
Heckstöße	%	18,1 ± 6,2	25,2 ± 7,7 ^x
Kopfstöße	%	58,0 ± 7,9 ^x	58,1 ± 8,7 ^x
Rumpfstöße	%	41,0 ± 7,9	50,0 ± 8,9 ^x
Störungen des Säugeaktes	%	35,0 ± 7,6 ^x	36,4 ± 7,5 ^x
Agonistisches Verhalten, gesamt	%	73,2 ± 7,0 ^x	82,6 ± 6,6 ^x
... zur Säugezeitmitte			
Auftreiben	%	13,1 ± 5,1	15,7 ± 5,5 ^y
Gewalt gegen Ferkel	%	17,8 ± 5,8	2,3 ± 2,2 ^y
Heckstöße	%	11,6 ± 4,9	2,4 ± 2,3 ^y
Kopfstöße	%	23,0 ± 6,4 ^y	9,4 ± 4,5 ^y
Rumpfstöße	%	18,4 ± 5,9	4,7 ± 3,2 ^y
Störungen des Säugeaktes	%	6,8 ± 3,8 ^y	9,3 ± 4,4 ^y
Agonistisches Verhalten, gesamt	%	39,0 ± 7,4 ^y	25,9 ± 6,7 ^y
^{x,y} Unterschiedliche Hochbuchstaben in einer Spalte zeigen signifikante Unterschiede (p < 0,05) zwischen den Beobachtungszeitpunkten innerhalb des gleichen Haltungsverfahrens und innerhalb des gleichen Verhaltens			

^{x,y} Unterschiedliche Hochbuchstaben in einer Spalte zeigen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Beobachtungszeitpunkten innerhalb des gleichen Haltungsverfahrens und innerhalb des gleichen Verhaltens

Tabelle 6

Signifikanzlevel der fixen Effekte und der Kovariablen in den beiden statistischen Modellen zur Lebendmasseentwicklung der Ferkel in Modul 1 und Modul 2

Kriterium	Modul ¹	HV ²	WN ²	SG ²	a_vb ³	n_vb ³	a_ab ³	n_ab ³	a_ve ³
Lebendmasse									
- zur Gruppierung	1	ns	*	***	***	**	--	--	--
	2	ns	ns	***	***	**	--	--	--
- beim Absetzen	1	ns	***	***	--	--	***	***	--
	2	ns	*	***	--	--	***	***	--
- am Versuchsende	1	ns	***	***	--	--	--	--	***
	2	ns	***	**	--	--	--	--	ns
Tägliche Zunahmen									
- in der Säugephase	1	ns	***	***	--	--	***	***	--
	2	ns	*	***	--	--	**	***	--
- in der Aufzucht	1	ns	*	ns	--	--	--	--	***
	2	ns	***	ns	--	--	--	--	ns
- im Versuchszeitraum	1	ns	***	***	--	--	--	--	***
	2	ns	***	**	--	--	--	--	ns
Variationskoeffizient des Wurfgewichts⁴									
- zur Gruppierung	1 und 2	ns	*	**	*	ns	--	--	--
- beim Absetzen	1 und 2	ns	ns	**	--	--	ns	**	--
- am Versuchsende	1 und 2	ns	ns	*	--	--	--	--	ns

¹ Modul 1: Vergleich Einzelsäugen mit 3er-Säugen; Modul 2: Vergleich Einzelsäugen mit 6er-Säugen

² Fixe Effekte: HV – Haltungsverfahren, WN – Wurfnummerklasse; SG – Sauengüte

³ Kovariablen: a – Ferkelalter pro Wurf; n – Ferkelanzahl pro Wurf; vb – zur Gruppierung (Versuchsbeginn); ab – beim Absetzen; ve – am Versuchsende

⁴ Keine getrennte Darstellung nach Modulen wegen der gleichen Ausprägung der Effekte

ns p ≥ 0,05, * p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001, -- nicht im Modell

Tabelle 7

Lebendmasseentwicklung von Ferkeln in Abhängigkeit von Haltungsverfahren, Beobachtungszeitpunkt und Untersuchungsmodul (LSQ ± SE)

Kriterium		Haltungsverfahren der säugenden Sau	
Vergleich zwischen Einzel- und Gruppensäugen (Modul 1)		Einzelsäugen*	3er-Säugen*
Lebendmasse ...			
... zur Gruppierung (Versuchsbeginn)	kg	5,0 ± 0,07	5,0 ± 0,07
... beim Absetzen	kg	16,0 ± 0,2	15,9 ± 0,2
... am Versuchsende	kg	22,5 ± 0,3	22,1 ± 0,3
Zunahmen ...			
... in der Säugephase	g/Tag	304 ± 3,9	301 ± 4,1
... in der Aufzuchtphase	g/Tag	399 ± 9,7	395 ± 9,1
... im Versuchszeitraum	g/Tag	326 ± 4,3	322 ± 4,1
Variationskoeffizient des Wurfgewichts ...			
... zur Gruppierung (Versuchsbeginn)	%	23,5 ± 1,4	22,4 ± 1,4
... beim Absetzen	%	19,0 ± 1,1	17,9 ± 1,0
... am Versuchsende*	%	18,1 ± 1,0	17,3 ± 1,0
Vergleich zwischen Einzel- und Gruppensäugen (Modul 2)		Einzelsäugen*	6er-Säugen*
Lebendmasse ...			
... zur Gruppierung (Versuchsbeginn)	kg	4,6 ± 0,09	4,5 ± 0,07
... beim Absetzen	kg	14,9 ± 0,3	15,0 ± 0,2
... am Versuchsende	kg	20,6 ± 0,3	21,1 ± 0,3
Zunahmen ...			
... in der Säugephase	g/Tag	280 ± 5,6	282 ± 4,5
... in der Aufzuchtphase	g/Tag	412 ± 11,4	427 ± 9,6
... im Versuchszeitraum	g/Tag	306 ± 5,5	315 ± 4,6
Variationskoeffizient des Wurfgewichts ...			
... zur Gruppierung (Versuchsbeginn)	%	19,5 ± 1,7	21,1 ± 1,4
... beim Absetzen	%	18,0 ± 1,3	19,0 ± 1,1
... am Versuchsende*	%	18,0 ± 1,2	18,4 ± 1,0

* Sämtliche Differenzen zwischen Haltungsverfahren, innerhalb Kriterium und innerhalb Modul sind nicht signifikant (p ≥ 0,05)

[†] Berechnet auf Basis der Wurfzugehörigkeit

Lebendmasseentwicklung statistisch gesicherte Unterschiede zwischen den Haltungsverfahren Einzel- und Gruppensäugen innerhalb der Module bestehen. Bei den Variationskoeffizienten des Wurfgewichts ist durchgängig eine tendenziell geringfügige Abnahme im Verlauf des Versuches zu verzeichnen.

Das unterschiedliche Niveau der Lebendmassen der Ferkel zu Versuchsbeginn in Modul 1 und Modul 2 sowie die damit einhergehenden Unterschiede in der weiteren Lebendmasseentwicklung und den damit vergesellschafteten täglichen Zunahmen (Tabelle 7) belegen die Sinnhaftigkeit der nach Modulen getrennten Auswertung. Wäre gemeinsam (unter Hinzunahme des Moduleffektes) ausgewertet und dargestellt worden, hätten sich signifikant unterschiedliche Werte bereits zu Versuchsbeginn ergeben. Diese wären den unterschiedlichen Haltungssystemen der laktierenden Sau zugeordnet worden, aber ohne dazu in einer ursächlichen Verbindung zu stehen. Dieser Sachverhalt hätte die Diskussion der Ergebnisse deutlich erschwert und deren Evidenz unnötig vermindert.

4 Diskussion

Nach Schlichting (1996) geht die Gruppenhaltung laktierender Sauen mit erhöhter Unruhe einher, ohne dass er diesen Begriff in negativer oder positiver Hinsicht wertet. Dies kann durch unsere Daten zum nicht-agonistischen Verhalten zwischen den drei unterschiedlichen Haltungsverfahren weitgehend bestätigt werden (Tabelle 3). Am Gruppierungstag besteht das 2h-Beobachtungsintervall im 6er-Säugen zu etwas mehr als zwei Drittel aus Aktivität und Liegen in Bauchlage, im 3er-Säugen sind es noch rund 60 % und im Einzelsäugen machen beide Verhalten nur mehr wenig mehr als die Hälfte des 2h-Beobachtungsintervalls aus. Und auch in der Mitte der Säugezeit besitzen im 6er-Säugen beide Verhaltensweisen mit knapp 90 min den größten Anteil. Dazu passt, dass das Liegen in Seitenlage, das auf einen höheren Tier- bzw. Liegekomfort hinweist (Elmore et al., 2010), im Einzelsäugen ausgeprägter ist – am Gruppierungstag in signifikanter Abgrenzung zu beiden Gruppensäugeverfahren und zur Säugezeitmitte nur noch zum 6er-Säugen. Vermehrtes Sitzen gilt nach Pearce und Paterson (1993) eher als Anzeichen einer haltungsbedingten Störung. Dies passt zu Befunden, die in Einzelhaltung höhere Sitzraten fanden als in Gruppenhaltung (Bohnekamp et al., 2013) bzw. in Outdoorhaltung (Hötzel et al., 2004). Bei unseren Daten (Tabelle 3) fällt dabei auf, dass der Unterschied zwischen Einzel- und Gruppensäugen allerdings nur im Fall des 6er-Säugens signifikant auftritt.

Bei den meisten Säugetieren sinken mit fortschreitender Laktation die Anzahl und die Dauer der einzelnen Säugeakte (Trivers, 1974). Beim Schwein ermuntert die Sau zu Beginn der Laktation aktiv die Ferkel zum Säugen (Bøe, 1991). Später verliert sich dieses Aufforderungsverhalten (Bøe, 1991), die Säugefrequenz geht zurück (Puppe und Tuchscherer, 2000), und die Dauer der Säugeakte wird durch aktives Beenden durch die Sau verkürzt (Špinka und Algers, 1995). Diese

Abfolge spiegeln unsere Ergebnisse aus dem Vergleich zwischen Einzel-, 3er- und 6er-Säugen (Tabelle 3) vor dem Hintergrund der langen Säugezeit von 7 Wochen nicht vollständig wider. Die Säugedauer im 2h-Intervall verläuft in allen drei Haltungsverfahren und zu beiden Beobachtungszeiten auf identischem Niveau. Dagegen nimmt die Anzahl der Säugeakte mit zunehmender Säugezeit tatsächlich ab, allerdings nur in den beiden Gruppensäugeverfahren mit statistischer Absicherung. Damit wird zumindest teilweise die These von Šilerová et al. (2006) gestützt, dass sich der o. g. natürliche Prozess der Abnahme von Säugefrequenz und -dauer im Laufe der Laktation in einem Gruppenhaltungssystem besonders gut entfalten kann. Denn u. a. mehr Bewegungsfreiheit und die komplexere soziale Umwelt in Gruppenhaltungssystemen ermöglichen es der Sau, die weiter anhaltenden Bestrebungen der Ferkel nach mehr mütterlicher Zuwendung verhaltensgerecht abzuwehren.

Agonistisches Verhalten zwischen in Gruppen gehaltenen Sauen resultiert zu einem wesentlichen Anteil aus dem Wettbewerb um die Ressourcen Platz und Futter (Remience et al., 2008). Die Trenthorster Gruppensäugebucht verfügt über eine uneingeschränkt nutzbare Fläche von 9,3 m² pro Sau inklusive Auslauf und über verschließbare Einzelfressplätze zur zeitlich synchronen Fütterung. Mit diesen Ausstattungsmerkmalen bietet sie deutlich mehr Platz als konventionelle Aufstallungssysteme (Whittaker et al., 2012) und schließt die belastende Konkurrenzsituation bei der Futteraufnahme aus, im Gegensatz zur Verwendung von z. B. Futterstationen, wie von Kirchner et al. (2012) beschrieben. Nach Weng et al. (1998) sollte bei Sauen das Mindestplatzangebot 2,4 m² bis 3,6 m² zur Beförderung des Wohlbefindens umfassen. Die vorliegenden Daten zeigen, dass die Summe des agonistischen Verhaltens der Sauen statistisch gesichert im Verlauf der Säugezeit im 3er-Säugen nahezu auf die Hälfte und im 6er-Säugen sogar auf weniger als ein Drittel zurückgeht. Dabei fällt der Rückgang im 6er-Säugen bei sämtlichen 6 erfassten Verhaltensmerkmalen signifikant aus (Tabelle 5). Der dadurch sichtbare Gewöhnungseffekt der Sauen im Gruppensäugen kann letztendlich als Beleg für die gelungene Ausbildung einer funktionierenden Rangordnung gewertet werden, die u. a. für ein nicht-destruktives Gruppenverhalten bei sozial lebenden Spezies sorgt (Arey und Edwards, 1998). Der Vergleich der beiden Gruppenhaltungsverfahren zeigt, dass die Gruppengröße ohne statistisch gesicherten Einfluss auf das agonistische Verhalten blieb (Tabellen 4 und 5). Dies steht nur scheinbar im Widerspruch zu Shin-Jae (2012), der eine höhere Belegungsdichte für zunehmendes agonistisches Verhalten verantwortlich macht, da in unserem System das Platzangebot pro Sau in beiden Varianten gleich blieb. Und absolute Gruppengrößen auf dem niedrigen Level von drei oder sechs Tieren scheinen bei ausreichendem Platzangebot für das Verhalten von laktierenden Sauen unproblematisch, obwohl Großgruppen mit größerer Anonymität grundsätzlich besser geeignet erscheinen, die Rate agonistischen Verhaltens zu verringern (Borberg und Hoy, 2009; Turner et al., 2001). Nicht unerwähnt bleiben soll in diesem Zusammenhang die nach der Eingewöhnungsphase in der Säugezeitmitte signifikant geringere

Auftrittsrate aller sechs agonistischen Verhaltensmerkmale sowie der Gesamtrate im 6er-Säugen im Vergleich zum 3er-Säugen mit nur drei Signifikanzen (Tabelle 5).

In unserer Studie beträgt der Zeitraum zwischen den beiden Beobachtungszeitpunkten „Gruppierungstag“ und „Säugezeitmitte“ im Mittel 17 Tage. In diesem Zusammenhang berichtet u. a. Arey (1999), dass aggressives Verhalten von Sauen nach der Gruppierung mit zunehmender Dauer der Gruppenzugehörigkeit rasch abnimmt und bereits nach einer Woche stabile Verhältnisse herrschen. Remience et al. (2008) konnten an wiedereingegliederten Wartesauen in eine dynamische Großgruppe zeigen, dass pro 2-h-Beobachtungsintervall am Gruppierungstag 10 Kämpfe stattfanden, gegenüber weniger als zwei Kämpfen in den Tagen eins bis drei nach der Gruppierung mit einer sich daran anschließenden Tendenz gegen null bis zum Versuchsende am 22. Beobachtungstag. Dies zeigt, dass die Auseinandersetzungen im Rahmen der Gruppierung i. d. R. sehr schnell abklingen. Gleichwohl bedarf es der Betrachtung des Gruppierungstages, um eine Aussage zum dabei bestehenden Gefährdungspotenzial der Ferkel machen zu können; denn es ist davon auszugehen, dass agonistische Interaktionen zwischen Sauen gefährlich für Ferkel sein können. Die Daten aus Tabelle 1 zeigen, dass das Haltungsverfahren der laktierenden Sauen weder das Krankheits- noch das Verlustgeschehen beeinflusste. Darüber hinaus ergab sich sowohl bei den Verletzungen als auch bei den Verlusten keine besondere Häufung um den Gruppierungstermin herum (Daten nicht explizit dargestellt).

Das Zunahmenniveau der Ferkel (Tabelle 7) bewegt sich über alle Haltungsvarianten auf einem für Öko-Bedingungen guten Level (Früh et al., 2007). Die Größenordnung der Variationskoeffizienten der Wurfgewichte (Tabelle 7) bleibt ohne Auffälligkeiten in einem üblichen Bereich (Wientjes et al., 2012). Die fehlenden Unterschiede zwischen der Einzel- und der Gruppenhaltung in beiden Modulen zeigen, dass es zu keinem Auseinanderwachsen der Würfe im Gruppensäugen gekommen ist, wie von Kühberger und Jais (2006) ebenfalls für ökologische und von Bohnenkamp et al. (2013) für konventionelle Gruppensäugeverfahren beschrieben.

Cross-suckling bzw. Fremdsäugen (Milchaufnahme nicht bei der eigenen Mutter) gilt als ein typisches Ferkelverhalten in Gruppensäugesystemen (Wülbers-Mindermann, 1992). Als mögliche negative Begleiterscheinungen werden geringere Lebendmassezunahmen in der Säugezeit bei den Fremdsäugern (Burgwal-Konertz, 1996) und das Auseinanderwachsen der Würfe durch Benachteiligung der schwächeren Ferkel eines Wurfs (Algers, 1991) genannt. Dabei ist denkbar, dass die im Vergleich zur konventionellen Ferkelerzeugung deutlich längere Säugezeit von mind. 40 Tagen unter ökologischen Bedingungen (EU-Öko-VO 889/2008) die negativen Auswirkungen des Cross-sucklings verstärken kann. Wobei dann davon auszugehen ist, dass ein solches Szenario die Akzeptanz des Gruppensäugens seitens der Landwirte schmälert (Früh et al., 2007). Eine Erfassung des Fremdsäugens erfolgte im vorliegenden Projekt nicht, u. a. weil bei Verhaltensaufzeichnungen ohne Ton die Unterscheidung von nutritiven und nicht-nutritiven Saugakten nicht

möglich ist (vergl. Kap. Datenerfassung). Doch kann auf Grund der Ergebnisse hinsichtlich der Tageszunahmen der Ferkel und des Auseinanderwachsens der Würfe (Tabelle 7) abgeleitet werden, dass Cross-suckling, wenn es denn auftrat, zu keinen negativen Auswirkungen führte und die Thematik, zumindest im vorliegenden Versuch, vernachlässigt werden kann.

5 Schlussfolgerung

Es konnte gezeigt werden, dass Gruppensäugen im Vergleich zum Einzelsäugen bei den Sauen zu signifikanten Verhaltensanpassungen führte. Da diese Verhaltensanpassungen mit keinerlei negativen Folgen bei der Lebendmasseentwicklung sowie beim Krankheits- und Verlustgeschehen der Ferkel einhergingen, ziehen wir den Schluss, dass Gruppensäugen mit drei oder sechs Würfen ab dem 14. Lebenstag der Ferkel unter dem hier gegebenen Management eine machbare Haltungsform in der ökologischen Ferkelerzeugung darstellen kann.

Danksagung

Wir danken

- Herrn Horst Brandt, Institut für Tierzucht und Haustiergenetik der Universität Gießen, für Rat und Tat bei der statistischen Auswertung der Verhaltenskriterien und
- der BLE für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau (BÖL-Projekt 07oe029).

Literatur

- Algers B (1991) Group housing of farrowing sows : health aspects on a new system. In: ISAH (ed) Proceedings des VII. Internationalen Kongresses für Tierhygiene, 20.-24. August 1991, Leipzig, Germany : Teil 3. Giessen : DVG, pp 851-857
- Arey DS (1999) Time course for the formation and disruption of social organisation in group-housed sows. *Appl Anim Behav Sci* 62:199-207
- Arey DS, Edwards SA (1998) Factors influencing aggression between sows after mixing and the consequences for welfare and production. *Livest Prod Sci* 56:61-70
- Aubel E, Baumgartner J, Früh B, Hagmüller W, Simantke C (2007) Gruppensäugen in der Bioschweinehaltung [online]. Zu finden in <<http://orgprints.org/11448/3/11448-03OE379-fibl-frueh-merkblatt-gruppensaegen.pdf>> [zitiert am 28.09.2015]
- Bohnenkamp AL, Meyer C, Müller K, Krieter J (2013) Group housing with electronically controlled crates for lactating sows : effect on farrowing, suckling and activity behaviour of sows and piglets. *Appl Anim Behav Sci* 145:37-43
- Borberg C, Hoy S (2009) Mixing of sows with or without the presence of a boar. *Livest Sci* 125:314-317
- Burgwal-Konertz B van de (1996) Das Saug- und Säugeverhalten bei der Gruppenhaltung abferkelnder und ferkelführender Sauen und ihren Würfen unter besonderer Berücksichtigung des Fremdsäugens. Stuttgart : Grauer, 285 p
- BØe K (1991) The process of weaning in pigs when the sow decides. *Appl Anim Behav Sci* 30:47-59

- Elmore MRP, Garner JP, Johnson AK, Richert BT, Pajor EA (2010) A flooring comparison : the impact of rubber mats on the health, behavior, and welfare of group-housed sows at breeding. *Appl Anim Behav Sci* 123:7-15
- EU-Öko-VO 834/2007 (2007) Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates vom 28. Juni 2007 über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 2092/91 [online]. Zu finden in <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007R0834&from=en>> [zitiert am 05.10.2015]
- EU-Öko-VO 889/2008 (2008) Verordnung (EG) Nr. 889/2008 der Kommission vom 5. September 2008 mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle [online]. Zu finden in <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:250:0001:0084:de:PDF>> [zitiert am 05.10.2015]
- Früh B, Aubel E, Baumgartner J, Hagmüller W, Schwarz P, Simantke C (2007) Gruppenhaltung Ferkel führender Sauen als Produktionssystem im ökologischen Landbau [online]. Zu finden in <<http://orgprints.org/11448>> [zitiert am 28.09.2015]
- Gäde S, Bennewitz J, Kalm E, Kirchner K, Looft H (2005) Zucht auf Mütterlichkeit : Was ist möglich? *SUS* 5:60-62
- Graves HB (1984) Behavior and ecology of wild and feral swine (*Sus scrofa*). *J Anim Sci* 58:482-492
- Hötzel MJ, Machado LCP, Wolf FM, Dalla Costa OA (2004) Behaviour of sows and piglets reared in intensive outdoor or indoor systems. *Appl Anim Behav Sci* 86:27-39
- Kirchner J, Manteuffel G, Schrader L (2012) Individual calling to the feeding station can reduce agonistic interactions and lesions in group housed sows. *J Anim Sci* 90:5013-5020
- Kühberger M, Jais C (2006) Gruppenhaltung ferkelführender Sauen : Vergleich zweier Buchtensysteme. Freising : LfL, 82 p, SchR Bayer Landesanst Landwirtsch 2006/14
- Pearce GP, Paterson AM (1993) The effect of space restriction and provision of toys during rearing on the behaviour, productivity and physiology of male pigs. *Appl Anim Behav Sci* 36:11-28
- Pitts AD, Weary DM, Pajor EA, Fraser D (2000) Mixing at young ages reduces fighting in unacquainted domestic pigs. *Appl Anim Behav Sci* 68:191-197
- Puppe B, Tuchscherer A (2000) The development of suckling frequency in pigs from birth to weaning of their piglets : a sociobiological approach. *Anim Sci* 71:273-279
- Remience V, Wavreille J, Canart B, Meunier-Salaün MC, Prunier A, Bartiaux-Thill N, Nicks B, Vandenheede M (2008) Effects of space allowance on the welfare of dry sows kept in dynamic groups and fed with an electronic sow feeder. *Appl Anim Behav Sci* 102:284-296
- Schlichting MC (1996) Freibewegliche Haltung während der Säugephase. *KTBL Schr* 732:54-60
- Shin-Jae R (2012) Effects of group size on agonistic behaviors of commercially housed growing pigs. *Rev Colomb Cienc Pec* 25:353-359
- Šilerová J, Špinka M, Šárová R, Slámová K, Algers B (2006) A note on differences in nursing behaviour on pig farms employing individual and group housing of lactating sows. *Appl Anim Behav Sci* 101:167-176
- Špinka M, Algers B (1995) Functional view on udder massage after milk let-down in pigs. *Appl Anim Behav Sci* 43:197-212
- Trivers RL (1974) Parent-offspring conflict. *Am Zool* 14:249-264
- Turner SP, Horgan GW, Edwards SA (2001) Effect of social group size on aggressive behaviour between unacquainted domestic pigs. *Appl Anim Behav Sci* 74:203-215
- Weary DM, Pajor EA, Bonenfant M, Fraser D, Kramer DL (2002) Alternative housing for sows and litters : part 4: Effects of sow-controlled housing combined with a communal piglet area on pre- and post-weaning behaviour and performance. *Appl Anim Behav Sci* 76:279-290
- Weber R (2000) Gruppensäugen im Abferkelstall : ein Vergleich zur Haltung in Einzelabferkelbuchten. Tänikon : FAT, 12 p, FAT-Berichte 549
- Weng RC, Edwards SA, English PR (1998) Behaviour, social interactions and lesion scores of group-housed sows in relation to floor space allowance. *Appl Anim Behav Sci* 59:307-316
- Whittacker AL, Van Wettere WH, Hughes PE (2012) Space requirements to optimize welfare and performance in group housed pigs : a review. *Am J Anim Vet Sci* 7(2):48-54
- Wientjes JGM, Soede NM, van der Peet-Schwering CMC, van den Brand H, Kemp B (2012) Piglet uniformity and mortality in large organic litters : effects of parity and pre-mating diet composition. *Livestock Sci* 144:218-229
- Wülbers-Mindermann M (1992) Characteristics of cross-suckling piglets reared in a group housing system. Skara : Sveriges Lantbruksuniv, 77 p, Specialarbete 13
- Zollitsch W, Wagner E, Wlcek S (2002) Ökologische Schweine-, Geflügelfütterung. Leopoldsdorf : Österr Agrarverl, 112 p

Analyse zur erweiterten Nachhaltigkeitsberichterstattung deutscher Länderforstbetriebe

Elisabeth Kindler*

Zusammenfassung

Die Berichterstattung sowie der Umgang mit Nachhaltigkeitsaspekten blicken in der deutschen Forstbranche auf eine lange Tradition zurück. Doch wird die öffentliche Diskussion z. B. zu so genannten Nachhaltigkeitsberichten in anderen Branchen lebhafter geführt. Dieser Beitrag widmet sich daher der Untersuchung der Nachhaltigkeitsberichterstattung deutscher Länderforstbetriebe. Dazu wird in Anlehnung an Analyseschemata außerforstlicher Nachhaltigkeitsberichte eine forstspezifische Checkliste entwickelt, auf elf aktuelle Berichte angewandt und die Betriebe befragt. Wie sich zeigt, können die Berichte als Mischtypen forstlicher und unternehmerischer Berichterstattung bezeichnet werden. Als Standardelemente können u. a. die Betriebsdarstellung, Wirtschaftsergebnisse, Holzeinschlag, Festmeterpreis identifiziert werden. Darüber hinaus bestehen Unterschiede in Inhalt und Form, die auf unterschiedliche Betriebsausrichtungen hindeuten und keine einheitliche Branchenkommunikation erkennen lassen. Eine bessere Vergleichbarkeit kann aber den Fokus von individuellen Eigenheiten auf die Ausprägungen bestimmter Sachverhalte (z. B. Holzerlöse, Totholzanteil) lenken und eine Bereicherung der Diskussion zur Ausrichtung öffentlicher Forstbetriebe darstellen. Die kritische Würdigung der Berichterstattung ist dabei ein erster Schritt, für die das dargestellte Konzept eine Umsetzungsmöglichkeit bietet.

Schlüsselwörter: *Berichterstattung Forstbetriebe, Nachhaltigkeitsbericht, Gemeinwohl, Kennzahlen*

Abstract

Analysis of extended sustainability reporting by state forestry services in Germany

The concept of sustainability, as well as reporting, have a long tradition within the German forest sector. However, the trend to publish so called sustainability reports in other industries gains more public interest. Therefore the following paper analyses the sustainability reporting of German state owned forestry services. For these purposes an analysis scheme as used in non-forestry sustainability reports but specifically adjusted for the forestry sector was applied to eleven recent forest reports and interviews with the forestry services were conducted. Analysis and interviews show that the majority of state forestry services are regularly publishing detailed reports, which can be classified as a mixture of forest- and business reporting. The set of common information identified is rather small: typical information provided are e. g. the presentation of the forestry service, economic results, annual fellings, mean prices per cubic meter sold timber. On the other hand differences can be found in form and content, pointing at different interpretations of sustainability within the forestry services. An improved comparability between the reports can help to focus the discussion regarding public forestry on forestry facts rather than forestry services' specialties. Therefore a critical assessment of forestry reports, as it is suggested here, can serve as a first step.

Keywords: *sustainability reporting, forest enterprise, key figures*

* Georg-August Universität Göttingen, Burckhardt Institut, Abteilung für Forstökonomie und Forsteinrichtung, Büsgenweg 3, 37077 Göttingen

1 Einleitung

Der Nachhaltigkeitsbegriff hat, wie Vertreter der deutschen Forstbranche gerne betonen, seinen Ursprung in einer vorausschauenden Holznutzungsplanung, die bereits auf eine über 300 jährige Tradition zurückblicken kann (DFWR, 2014). Der Begriff Nachhaltigkeit hat aber in den letzten Jahrzehnten eine bemerkenswerte Entwicklung fernab der Forstwirtschaft vollzogen und steht heute für ein allgemeingültiges Konzept, das generationenübergreifendes Denken in ökonomischer, ökologischer sowie sozialer Dimension vereint (Deutscher Bundestag, 1998). Dieses abgewandelte und deutlich erweiterte Nachhaltigkeitsverständnis lässt sich u. a. aber wiederum auf die Forstbranche zurückübertragen. Der ökonomische und ökologische Bezug der Forstwirtschaft, die sich als Bewirtschaftung (Ökonomie) eines Ökosystems (Ökologie) beschreiben lässt, ist dabei leicht erkennbar. Doch verfügt die Forstwirtschaft auch über eine besondere soziale Dimension: vor allem die öffentlichen Forstbetriebe der Bundesländer, die fast 30 % der deutschen Waldfläche ausmachen (BMEL, 2014), tragen spezielle gesellschaftliche Verantwortung. Diese ergibt sich aus ihrer gesetzlichen Verpflichtung die Wälder *vorbildlich* und *ordnungsgemäß* zu bewirtschaften und dabei in besonderem Maße dem *Wohl der Allgemeinheit* zu dienen.¹

Für andere Branchen hat sich inzwischen ein umfassendes Angebot von Initiativen und Richtlinien rund um die Nachhaltigkeit von Unternehmen entwickelt. Neben beispielsweise dem Deutschen Nachhaltigkeitskodex (Rat für Nachhaltige Entwicklung, 2015), verschiedenen Nachhaltigkeitspreisen (z. B. Stiftung Deutscher Nachhaltigkeitspreis, 2015) und Zertifizierungen unterstreicht auch die Nachhaltigkeitsberichterstattung, die in den vergangenen zehn Jahren immer bedeutender geworden ist (Greiling et al., 2015), die besondere Rolle von Nachhaltigkeit in der Wirtschaft. Auf globaler Ebene setzt sich z. B. die Global Reporting Initiative (GRI) intensiv mit Nachhaltigkeitsberichterstattung auseinander. Dabei handelt es sich um eine unabhängige internationale Organisation, die Leitfäden für die Erstellung von Nachhaltigkeitsberichten bereitstellt und so Standards definiert. Diese sollen es Wirtschaft, Regierungen, Gesellschaft und BürgerInnen erleichtern fundierte Entscheidungen zu treffen und umgekehrt öffentliche Interessen stärker in die betriebliche Entscheidungsfindung zu integrieren (GRI, 2015). Innerhalb Deutschlands widmete sich zudem beispielsweise bis 2011 das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) zusammen mit „future verantwortung unternehmen“ (future e. V.) der Nachhaltigkeitsberichterstattung. Dazu verglichen und bewerteten sie die regelmäßigen, gesellschaftsbezogenen Nachhaltigkeitsberichte aus verschiedenen Unternehmenskategorien. Dieses Ranking sollte nicht nur einen „sachgerechten Vergleich“ zwischen den Berichten erlauben, sondern auch den „Wettbewerb fördern“

und so einen „kontinuierlichen Verbesserungsprozess in Richtung Nachhaltigkeit“ unterstützen (IÖW und future e. V., 2015).

Neben ihrem besonderen Bezug zur Nachhaltigkeit blicken die öffentlichen Forstbetriebe der Bundesländer aber auch auf eine z. T. über hundertjährige Tradition der wirtschaftlichen Berichterstattung zurück, wie die „Mitteilungen über die Wirtschaftsergebnisse der Herzoglich Braunschweigischen Forstverwaltung für das Jahr 1900/01“ (Herzogliche Kammer, 1902) oder die „Amtliche(n) Mitteilungen aus der Abtheilung für Forsten des Königlich Preussischen Ministeriums für Landwirtschaft, Domänen und Forsten“ (1901) mit Angaben zu den Jahren 1890 bis 1899 belegen. Auch heute veröffentlichen die Forstbetriebe der Bundesländer, die mit der Bewirtschaftung des Landeswaldes betraut sind (nachfolgend Länderforstbetriebe – LFBs) mehrheitlich regelmäßig Berichte, die sich nach Hartebrodt et al. (2009) vornehmlich der Gruppe erweiterter Geschäfts- oder Nachhaltigkeitsberichte zuordnen lassen. Sie sind Teil einer umfassenden Öffentlichkeitsarbeit und werden vielfach von zahlreichen themenspezifischen Veröffentlichungen begleitet. Eine mit der oben beschriebenen Nachhaltigkeitsberichterstattung vergleichbare, gesellschaftliche oder auch wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den dort veröffentlichten Inhalten fehlt aber bislang. Anders als die vom IÖW und future e. V. untersuchten Wirtschaftsbetriebe, unterliegen die LFBs unmittelbar dem staatlichen Einfluss und stehen auch nicht in direktem Wettbewerb zueinander. Dennoch zeigt die aktuelle öffentliche Diskussion über verschiedene ihrer Tätigkeiten², dass auch landeseigene öffentliche Forstbetriebe und ihr Umgang mit Nachhaltigkeitsaspekten Gegenstand einer kritischen Auseinandersetzung sein können.

Wie die Arbeit der Global Reporting Initiative oder auch des IÖW und future e. V. darlegt, kann eine solche Auseinandersetzung auf Grundlage der Berichterstattung erfolgen. Beide Initiativen gehen von einem Zusammenhang zwischen der Berichterstattung und der Berücksichtigung der dort thematisierten Nachhaltigkeitsbelange im Betrieb aus. Im folgenden Beitrag soll dieser Annahme gefolgt und diese auf Nachhaltigkeitsaspekte der Tätigkeit der LFBs übertragen werden. Im Fokus steht dabei die betriebliche Tätigkeit der LFBs, da diese trotz der unterschiedlichen Ausrichtung der LFBs in den einzelnen Bundesländern in allen betrachteten Betrieben zum Kerngeschäft gehört. Dazu wurde eine forstspezifische Checkliste als Analyseschema für die Berichte erstellt, in der relevante Aspekte, die Forstbetriebe im Rahmen ihrer betrieblichen Tätigkeit abdecken und über die sie berichten könnten, zusammengestellt sind. Dieses Schema wurde im Anschluss auf die zum August 2014 aktuellsten verfügbaren Berichte von elf LFBs der großen Flächenländer angewendet und geprüft, über welche der zusammengestellten Aspekte berichtet wurde. Dabei soll

¹ Vgl. z. B. „nachhaltig“ §6 LWaldG MV, §26 LWaldG BB, §34 LWaldG RP; „vorbildlich“ §31 ThüWaldG, §45 SächsWaldG, Abschnitt III Artikel 18 BayWaldG, „Gemeinwohl“ o. ä. §15 NWaldG, §18 HWaldG, §6 LWaldG SH

² Vgl. beispielsweise die aktuelle Diskussion um das Kartellverfahren gegen ForstBW (Bundeskartellamt, 2015), oder die Greenpeace Buchenwälder-Kampagne (Dobler et al., 2014).

untersucht werden, ob es einen implizierten Standard in der aktuellen forstlichen Berichterstattung in Deutschland gibt, wie dieser gegebenenfalls aussieht und in welchen Bereichen Unterschiede zwischen den Berichten festgestellt werden können. Zudem wurde eine Befragung der LFBs zu Zielsetzung, Stellenwert und Details zur Erstellung der Berichte durchgeführt.

Eine solche Gegenüberstellung kann, wenn sie von den Betrieben entsprechend aufgegriffen wird, langfristig wie ein Benchmarking wirken und ebenso einen Verbesserungsprozess in Gang setzen, wie es das IÖW und future e. V. für ihr Ranking beabsichtigen.

2 Material und Methoden

Die Analyse der Berichterstattung, die als zielgruppenbezogenes Instrument der Öffentlichkeitsarbeit (Krott, 2001) und zentrales Element des normativen betrieblichen Managements (Oesten und Roeder, 2012) gilt, erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst wurden verschiedene Quellen ausgewählt, aus denen dann in Anlehnung an vorhandene Untersuchungen eine Checkliste für forstliche Nachhaltigkeitsberichte zusammengestellt wurde. Diese wurde im Anschluss verwendet, um eine quantitative Inhaltsanalyse der zum Stichtag 05.08.2014 jeweils aktuellsten Berichte der LFBs (vgl. Tabelle 1) durchzuführen. Außerdem erfolgte eine deskriptive Analyse der Inhaltsverzeichnisse zur Überprüfung der Checkliste. Zudem wurde zur verbesserten Einordnung der Veröffentlichungen Experten der LFBs vor allem zu Zielrichtung und Stellenwert der untersuchten Berichte befragt.

2.1 Erstellen der Checkliste

Für die Erstellung der Checkliste wurden Prüfkriterien (im Folgenden Items) aus verschiedenen für Forstbetriebe und die allgemeine Nachhaltigkeitsberichterstattung relevanten Quellen abgeleitet, wie in Abbildung 1 dargestellt. Ähnlich wie bei Papenfuß et al. (2015), die Prüfkriterien für die Analyse der Nachhaltigkeitsberichte von Stadtwerken zusammengestellt haben, wurden dafür im Hinblick auf öffentliche Forstbetriebe themenspezifische Informationen gutachterlich ausgewählt und in einer Checkliste (Tabelle 3) zusammengestellt. Eingeflossen sind neben den forstlichen Quellen, Produktplan Forst (DFWR, 2015), Waldbericht der Bundesregierung (BMELV, 2009), Erhebungsbogen für die Datenmeldung des forstlichen Testbetriebsnetzes des Bundeslandwirtschaftsministeriums (BMELV, 2012)) auch Items aus dem IÖW- und future e. V. Ranking (Gebauer et al., 2011), dem Leitfaden der Global Reporting Initiative (GRI, 2013) und aus den Vorgaben des Handelsgesetzbuches (HGB, 2015). Die genannten forstlichen Quellen wurden ausgewählt, da sowohl der Produktplan Forst als auch der Erhebungsbogen des Testbetriebsnetzes ihr Augenmerk auf die Dokumentation der betrieblichen Tätigkeiten von Forstbetrieben legen. Diese betriebliche Perspektive sollte durch jene Informationen zum Wald ergänzt werden, bei denen von einem besonderen Interesse der Öffentlichkeit ausgegangen werden kann. Deshalb wurde aus dem

Waldbericht der Bundesregierung das Kapitel „Wald, Forst- und Holzwirtschaft in Deutschland“ als weitere forstliche Quelle hinzugezogen. Dem stehen ergänzend die Quellen der Nachhaltigkeitsberichterstattung gegenüber. Neben der Global Reporting Initiative (GRI) und dem IÖW/future e. V., die sich ganz gezielt mit diesen Berichten auseinandersetzen, wurde noch die Bilanz, die Gewinn- und Verlustrechnung, der Lagebericht und sonstige Pflichtangaben aus dem HGB hinzugezogen, da einige LFBs verpflichtet sind, ihren Jahresabschluss nach den dort aufgeführten gesetzlichen Vorgaben zu gestalten und zu veröffentlichen.

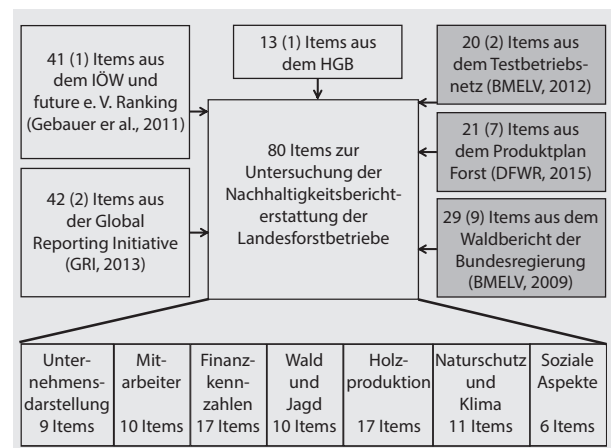


Abbildung 1

Quellen und Anzahl der Items die in das forstliche Analyse-schema (Checkliste) eingegangen sind. Die Werte in Klammern geben die Itemanzahl wieder, die ausschließlich auf die angegebene Quelle zurückgeht, entsprechend gibt es viele Mehrfachnennungen. Dunkelgrau hinterlegt sind die forstlichen Quellen und unten sind die im Ergebnisteil dargestellten sieben Kategorien abgebildet.

Die Quellen enthalten jeweils mehr Items, als in die Checkliste übernommen worden sind. Der GRI Katalog enthält beispielsweise 150 spezifische Items während im IÖW/ future e. V. Ranking 47 umfassend beschriebene Kriterien zu prüfen sind. Items aus dem HGB und den forstlichen Quellen wurden hingegen aus den gegebenen bzw. abgefragten Informationen der Dokumente zusammengestellt. Die Auswahl erfolgte gutachterlich nach Relevanz der Information für Nachhaltigkeitsaspekte der forstbetrieblichen Tätigkeit. So wurden z. B. keine Items ausgewählt, welche die Produktbereiche vier und fünf des Produktplans Forst (Leistung für Dritte und Hoheits- und sonstige behördliche Aufgaben) betreffen, da nicht alle LFBs mit diesen Aufgaben gleichermaßen betraut sind. Zudem wurde beispielsweise auch auf detaillierte Angaben zur Einhaltung der Menschenrechte im Betrieb aus der GRI verzichtet, da die Arbeit des öffentlichen Dienstes der Bundesländer beispielsweise keine Kinderarbeit oder Verstöße gegen die Rechte indigener Völker erwarten lässt. Außerdem wurden Themen des IÖW/future e. V. und der GRI gekürzt und in wenigen Items zusammengefasst, um sie an die Gegebenheiten im Forstbetrieb anzupassen.

Beispielsweise entspricht der Item „ökologische Aspekte der Produktion“ einem ganzen Kapitel des IÖW Kataloges, der sich mit Wasser-, Energieverbrauch und Abfall auseinandersetzt. Die meisten Items gehen auf mehrere Quellen zurück, wobei 27 Items allein aus den forstlichen Quellen stammen (in Abbildung 1 dunkelgrau hinterlegt) und 29 allein auf die GRI und das IÖW/future e. V. Ranking zurückgehen. Insgesamt konnte so ein differenziertes Analyseschema für die Inhaltsanalyse der Berichte erstellt werden. Tabelle 3 führt zudem für jeden der insgesamt 80 Items die zugehörigen Quellen auf. Nach ihrer Auswahl wurden die Items thematisch in sieben verschiedene Kategorien gruppiert.

2.2 Berichtsanalyse

Die Inhaltsanalyse erfolgte dann anhand der Checkliste als quantitative Untersuchung zur An- oder Abwesenheit der

Items in den einzelnen Berichten. Dazu wurden die häufig als Geschäfts-, Jahres- oder Nachhaltigkeitsbericht titulierten, regelmäßig (i. d. R. jährlich oder zweijährlich) veröffentlichten Berichte der LFBs systematisch auf das Vorhandensein der einzelnen Items geprüft. Dazu wurde jeweils die in Tabelle 1 gelisteten Berichte herangezogen. Da die Bundesländer verschiedene Formate zur Veröffentlichung gewählt haben, fließen bei manchen Bundesländern mehrere Dokumente für denselben Berichtszeitraum in die Analyse ein (z. B. für die Bayerischen Staatsforsten), die in anderen Ländern in einem Bericht zusammengefasst sind. Für Sachsen-Anhalt und das Saarland lagen zum Untersuchungszeitpunkt keine vergleichbaren Berichte vor. Wie bei Studien dieser Art üblich³ wurden alle Items bei der Auswertung gleichgewichtet. Ist die gesuchte Information im Bericht vorhanden, z. B. der Gesamtumsatz oder der Flächenanteil nichtheimischer Baumarten, so wird einmalig ein Punkt für diesen Item

Tabelle 1

Zur Inhaltsanalyse herangezogenes Berichtsmaterial der Länderforstbetriebe. Die Abkürzungen der Bundesländer folgen den auf EU-Ebene vereinbarten Abkürzungen der Regionen.

Land	Berichtstitel	Herausgeber	Verfügbar unter (zuletzt geprüft 10.09.2015)
BW	a) Geschäftsbericht 2011 b) Jahresbericht 2011 (Materialband)	Landesbetrieb ForstBW, Stuttgart	http://forstbw.de/forstbw/geschaeftsberichte.html
BY	a) 2013 Bayerische Staatsforsten b) 2013 Bayerische Staatsforsten Statistikband c) Jahresabschluss 2013	Bayerische Staatsforsten AöR, Regensburg c) 20.08.2013	http://www.baysf.de/de/publikationen.html
BB	Geschäftsbericht 2012 Landesbetrieb. Forst Brandenburg – Wald verpflichtet	Landesbetrieb Forst Brandenburg, Potsdam, 2013	http://forst.brandenburg.de/media_fast/4055/gber2012.pdf
HE	Nachhaltigkeitsbericht für 2011 und 2012	Landesbetrieb Hessen-Forst, Kassel	Nicht mehr auf HessenForst Homepage verfügbar, aber über Suchmaschinen auffindbar
MV	a) Die Landesforst Mecklenburg-Vorpommern – AöR - für die Jahre 2010 und 2011 b) Unternehmerische Konzeption für den Eigenen Wirkungskreis 2013 bis 2020 (hier SBSC)	Landesforst MV AöR, Malchin, a) Stand August 2012,	http://www.wald-mv.de/download_details_ebene_1-1614-8-4.html
NI	a) Geschäftsbericht 2012 Waldvision b) Gemeinwohlbilanz	Niedersächsische Landesforsten, Braunschweig a) Juni 2013 b) August 2013	http://www.landesforsten.de/Geschaeftsberichte.24.0.html http://www.landesforsten.de/Broschueren-und-Faltblaetter.127.0.html
NW	Wachstum durch Wandel Wald und Holz NRW Nachhaltigkeitsbericht 2012	Wald und Holz NRW, Münster, 2013	https://www.wald-und-holz.nrw.de/wald-und-holz-nrw/service/publikationen.html
RP	Geschäftsbericht 2009	Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz, Mainz, Nov. 2009	http://www.wald-rlp.de/publikationen.html
SH	Geschäftsbericht 2012 Wald für mehr	Schleswig-Holsteinische Landesforsten AöR, Neumünster	http://www.forst-sh.de/meta/download/kommunikationsmittel.html
SN	Geschäftsbericht 2012	Staatsbetrieb Sachsenforst, Pirna, Oktober 2013	https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/20073
TH	Forstbericht 2012	Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz, Erfurt, November 2012	http://apps.thueringen.de/de/publikationen/pic/pubdownload1270.pdf

³ Vgl. z. B. Li et al. (2011), die Veröffentlichungen der globalen forstbasierten Industrie untersucht haben, Papenfuß et al. (2015), oder Hickey et al. (2005)

vergeben. Zusätzliche Details oder Wiederholungen werden nicht berücksichtigt, sodass die maximale Punktzahl der Itemanzahl entspricht.

Neben der quantitativen Inhaltsanalyse anhand des Analyseschemas wurde auch eine Auswertung der Inhaltsverzeichnisse wie bei Vidal und Kozak (2008) vorgenommen. Dabei sollten Themenbereiche identifiziert werden, die mit Hilfe der Checkliste möglicherweise nicht erfasst wurden, um so die Vollständigkeit der Checkliste zu prüfen. Außerdem wurde die Itemanalyse genutzt, um die Berichte konzeptionell zu charakterisieren; ob sie entweder einen Fokus auf unternehmerische Berichterstattung (IÖW/future e. V. und GRI) oder die forstliche Berichterstattung (TBN, Produktplan, Waldbericht) legen. Dazu wurde die Wiedergabe der 29 Items analysiert, die ausschließlich aus dem IÖW/future e. V. Ranking, der GRI oder beiden Quellen stammen, sowie die Wiedergabehäufigkeit der zehn ausschließlich auf mindestens zwei der forstlichen Quellen zurückgehenden Items. Die dabei vorausgesetzte Doppelnennung wurde im Hinblick auf die unterschiedliche Zielrichtung und geringe Überschneidung der Items aus den drei forstlichen Quellen gewählt. Anders als bei den Quellen zur unternehmerischen Berichterstattung, die als Itemkataloge angelegt sind und eine sehr hohe Übereinstimmung der Items aufweisen (drei der 29 Items stammen aus nur einer Quelle, vgl. Abbildung 1), enthält die Checkliste 18 Items, die allein auf nur eine der forstlichen Quellen zurückgehen. Die für die Untersuchung letztendlich herangezogenen Items sind in Tabelle 3 zusätzlich gekennzeichnet.

Die inhaltliche Analyse der Berichte wurde durch eine Untersuchung formaler Kriterien der Berichte ergänzt. Dabei wurden die Seitenzahlen der Berichte insgesamt sowie ausschließlich mit Tabellen bedruckte Seiten ermittelt. Außerdem erfolgte die Erfassung der Anzahl der Wörter, Tabellen aufgenommen, mit Hilfe der Wörter-zählen-Funktion in MS Word.

2.3 Interviews

Um darüber hinaus einen Überblick über die Ziele, Zielgruppen, Aufwand und den Prozess der Erstellung der Berichte zu erlangen, wurden die für die Berichterstattung maßgeblich verantwortlichen MitarbeiterInnen der betrachteten LFBs (Tabelle 1) mit Methoden der quantitativen Sozialforschung interviewt. Dazu wurden zunächst die auf den Webseiten oder in den Berichten genannten Kontaktpersonen für die Berichterstattung angeschrieben und um die Weiterleitung an geeignete AnsprechpartnerInnen gebeten. Die stark strukturierten Interviews, mit standardisiertem Fragebogen und überwiegend geschlossenen Fragen (Atteslander, 2003), fanden im Juni 2014 statt. Dazu wurde ein kombiniertes Verfahren gewählt (Atteslander, 2003): Der Fragebogen (s. Anlage) wurde den MitarbeiterInnen einige Tage vor den Interviews elektronisch zugeleitet. Dadurch konnte für die darauf folgenden Telefongespräche auch Rücksprache mit anderen Verantwortlichen gehalten werden, was mehrfach erfolgt ist. Entsprechend lag der Fragebogen den Befragten auch während des Gesprächs vor. Eine Ausnahme stellen hierbei die Landesforsten Rheinland-Pfalz dar, die diese Art

der Berichterstattung 2009 aufgegeben haben und deshalb nicht befragt wurden. Die insgesamt zehn Interviews dauerten im Durchschnitt 15 Minuten.

3 Ergebnisse

3.1 Die Checkliste als Analyseschema

Nach Auswertung der sechs Quellen für die Checkliste wurden insgesamt 80 Items zusammengestellt, die in Tabelle 3 aufgelistet werden. Sie wurden in die sieben folgenden Kategorien eingeteilt: 1. „Unternehmensdarstellung“, 2. „Mitarbeiter“, 3. „Finanzkennzahlen“, 4. „Waldbau und Jagd“, 5. „Holzproduktion“, 6. „Naturschutz und Klima“ und 7. „Soziale Aspekte“. Die Anzahl der Items je Kategorie schwankt zwischen sechs in der Kategorie „Soziale Aspekte“ und 17 in der Kategorie „Finanzkennzahlen“.

Von diesen 80 Items wurden in den elf untersuchten Berichten zwischen 31 und 55 thematisiert. Im Durchschnitt finden 41 der 80 Items in einem (Gesamt)Bericht Erwähnung. Sortiert man die Items nach ihrer Wiedergabehäufigkeit, so zeigt sich, dass 44 Items in sechs oder weniger Berichten wiederzufinden sind und 36 Items in mindestens sieben der elf Berichte Eingang gefunden haben. Dabei wurden fünf Items in keinem der Dokumente wiedergefunden (s. auch Tabelle 3). Hierbei handelt es sich einerseits um Aspekte aus dem Waldbericht der Bundesregierung (BMELV, 2009) in der Kategorie „Naturschutz und Klima“: Totholzvorrat, natürliche Waldgesellschaften und Flächenangaben zu eingeführten Baumarten. Außerdem fehlen in allen Berichten Angaben über den Eigenverbrauch von Holz und Informationen zur Produktverantwortung, wie z. B. Lebenszeit- oder Verbleibanalysen, die für das verkaufte Rohholz durchaus denkbar wären (vgl. Redmann et al., 2010). Dagegen lassen sich 16 Items in mindestens zehn der Berichte wiederfinden, darunter Anzahl der Mitarbeiter, Betriebsergebnis, Waldbewirtschaftungszertifikate, und Zahlen aus dem Bereich Erholung und Waldpädagogik (z. B. Besucherzahlen, Anzahl/Stunden waldpädagogischer Aktivitäten).

Neben der Überprüfung der Berichte auf Vorhandensein der zusammengestellten Items wurden zudem die Inhaltsverzeichnisse der Berichte untersucht. Damit sollte festgestellt werden, ob auch alle relevanten (d. h. z. B. ohne Produktbereich vier und fünf) Themenbereiche mit Hilfe der Items abgebildet werden können. Es erweist sich, dass abgesehen von zwei Ausnahmen alle Themen entweder als eigene Kategorie der Checkliste in diesem enthalten sind oder aber zumindest durch bestimmte einzelne Items (z. B. CO₂ Speicherung, Arbeitssicherheit, eingeschlagenes Energieholz) berücksichtigt wurden. Bei den zwei Ausnahmen handelt es sich um die Themen „Waldzustand“ und „Forschung“. Ihr Fehlen in der Checkliste ist dadurch begründet, dass zum Waldzustand in vielen Bundesländern separate Waldzustandsberichte veröffentlicht werden und das Thema „Forschung“ organisatorisch überwiegend nicht den jeweiligen LFBs zugeordnet ist (vgl. z. B. NW-FVA, 2014). Die Kontrolle der Checkliste anhand der Inhaltsverzeichnisse führt also zu einem positiven Ergebnis.

3.2 Analyse und Vergleich der forstlichen Berichterstattung

Die Inhaltsanalyse untersucht zunächst, wie sich die Berichte hinsichtlich der qualitativ und quantitativ aufgegriffenen Themen und Informationen unterscheiden. Dazu werden die Berichte im Hinblick auf Items der unterschiedenen Kategorien untersucht und verglichen. Ein besonderes Augenmerk wird zudem auf das Vorhandensein der Formulierung von Strategien und Zielen gelegt. Anschließend erfolgen eine konzeptionelle Einordnung der Berichte, sowie eine Gegenüberstellung der LFBs anhand ihrer Rechtsform, als Anstalt öffentlichen Rechts oder Landesbetrieb. Schließlich wird die Schnittmenge der Berichte untersucht, wie sie sich aus den festgestellten Gemeinsamkeiten ergibt. Insgesamt zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Berichten der LFBs. Außerdem lässt sich nur eine kleine Schnittmenge an Informationen finden, die von allen LFBs in ihren Berichten bereitgestellt werden. Diese große Diversität spiegelt sich zudem in den unterschiedlichen Berichtsformaten wider.

3.2.1 Berichtsinhalte

Tabelle 2 fasst die thematisierten Items je Kategorie für die untersuchten Berichte zusammen. Dabei werden im Durchschnitt in der Kategorie „Finanzkennzahlen“ die meisten identifizierten Items aufgeführt, während in „Naturschutz und Klima“ nur über durchschnittlich 30 % der Aspekte berichtet wird. Außerdem wird deutlich, dass immer zumindest einer der Items in jeder Kategorie gefunden werden konnte und ein Bericht in der Kategorie „Mitarbeiter“ sogar alle zusammengestellten Items berücksichtigt. Die angegebenen Extremwerte weisen aber bereits darauf hin, wie deutlich die untersuchten Berichte voneinander abweichen.

Tabelle 2

Mögliche Anzahl, Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung (SD) der in den sieben thematischen Kategorien dargestellten Items aus den verglichenen Berichten

Kategorie	Anzahl Items	Mittelwert	Minimum	Maximum	SD
1) Unternehmensdarstellung	9	5,2 58 %	2	7	1,5
2) Mitarbeiter	10	5,9 59 %	3	10	2,3
3) Finanzkennzahlen	17	11,1 65 %	8	14	1,9
4) Waldbau und Jagd	10	5,7 57 %	3	8	1,8
5) Holzproduktion	17	7,1 42 %	2	11	2,6
6) Naturschutz und Klima	11	3,3 30 %	1	7	1,8
7) Soziale Aspekte	6	2,9 48 %	1	4	0,9
Gesamt	80	41,2 51 %	31	55	7,3

Diese länderspezifischen Unterschiede je Kategorie fasst Abbildung 2 zusammen. Dabei berichten die Bayerischen

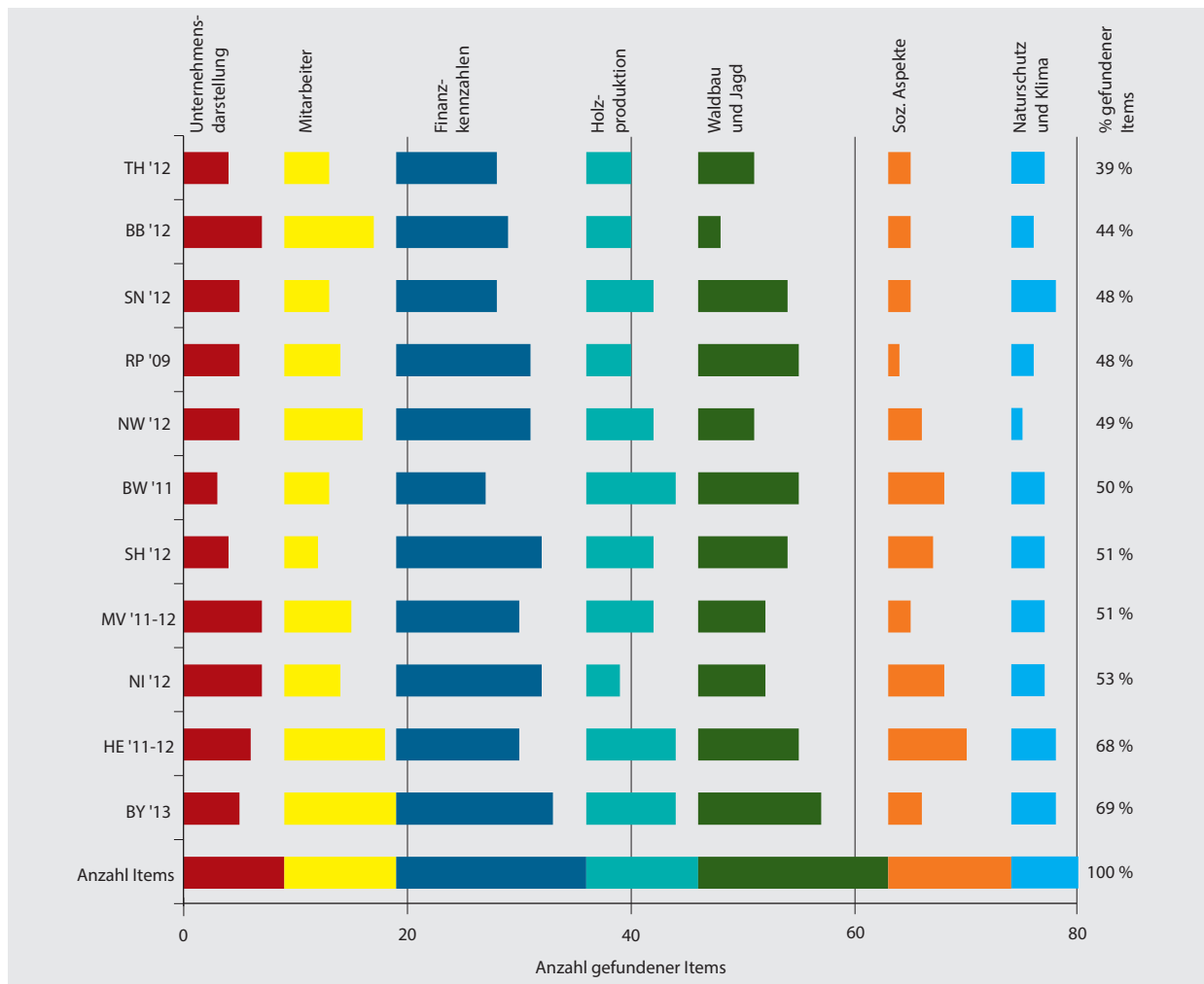
Staatsforsten (BaySF) und Hessen-Forst in ihren Dokumenten mit 69 % und 68 % Items am umfassendsten, während in den Berichten von ThüringenForst und ForstBrandenburg mit 39 % und 44 % die wenigsten Items wiedergefunden wurden. Außerdem wird deutlich, dass die Bundesländer sich teils auf ganz unterschiedliche Kategorien fokussieren.

Paarweise Vergleiche der Berichte zeigen außerdem, dass sich durchschnittlich 49 % der genannten Items überschneiden. Die größten Überschneidungen entfallen dabei auf die Berichte der BaySF und von Hessen-Forst mit 70 % und die geringsten auf die Niedersächsischen Landesforsten und ForstBW mit nur 32 % identischen Items. Auch wenn also alle LFBs Informationen zu jeder Kategorie bereitstellen, wie Abbildung 2 darstellt, fällt die konkrete Darstellung von Detailinformation, wie sie die Items abfragen, sehr unterschiedlich aus.

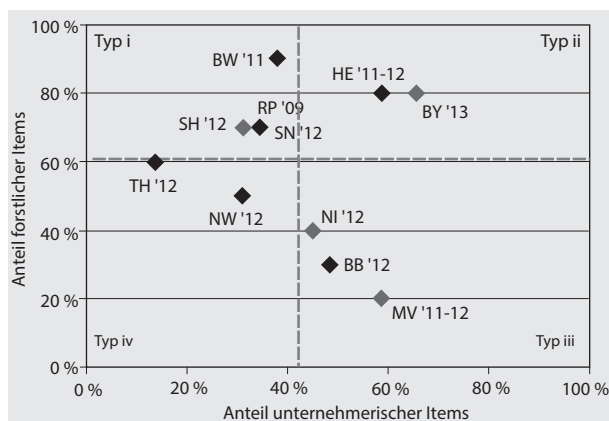
In der Checkliste wird für sechs der sieben Kategorien (ohne „Unternehmensdarstellung“, da diese lediglich deskriptiven Charakter hat) erfasst, ob für diesen Themenbereich Strategien formuliert werden und ob darüber hinaus auch operationale, quantitative Zielgrößen genannt sind, die innerhalb eines bestimmten Zeitraums erreicht werden sollen (z. B. ha, %, Anzahl). Dabei zeigt sich, dass über alle betrachteten Berichte hinweg im Durchschnitt in etwa der Hälfte der sechs Kategorien Strategien und Ziele formuliert werden (rechnerischer Mittelwert = 3,1) und in weniger als der Hälfte der Kategorien (rechnerischer Mittelwert = 2,7) auch operationale Ziele dazu angegeben werden. Am häufigsten werden Strategien dabei in der Kategorie „Mitarbeiter“ und „Waldbau und Jagd“ dargelegt und die meisten Zielangaben finden sich ebenfalls in der Kategorie „Waldbau und Jagd“. Betrachtet man die Ergebnisse hinsichtlich der verschiedenen LFBs, so zeigen sich hier wiederum große Unterschiede: während gerade LFBs mit veröffentlichten Kennzahlenplänen, wie z. B. einer (Sustainability) Balanced Scorecard (SBSC) (vgl. Waniczek und Werderits, 2014), in vielen Bereichen Strategien formulieren und messbare Zielgrößen angeben, ließen andere Berichte solche Angaben vollständig vermissen.

Fasst man die einzelnen LFBs nach ihrer Rechtsform zusammen und unterscheidet zwischen Landesbetrieben (BB, BW, HE, NW, RP, SN) und Anstalten öffentlichen Rechts (AÖR)(BY, MV, NI, SH; Thüringen war zum Berichtszeitpunkt noch Regiebetrieb), zeigt sich, dass die als AÖR organisierten LFBs durchschnittlich über knapp vier Items mehr berichten als die Landesbetriebe. Besonders deutlich weichen die Mittelwerte in den Kategorien „Finanzkennzahlen“ sowie bei den „Sozialen Aspekten“ voneinander ab. Beim Vergleich von LFBs mit Einheitsforstverwaltungen (EFV) und solchen die anders organisiert sind, zeigt sich, dass Letztere durchschnittlich über etwa drei Items mehr berichten. Diese Abweichung begründet sich vor allem über die Kategorie „Finanzkennzahlen“. Allerdings haben von den vier Nicht-EFV auch drei die Rechtsform der AÖR.

Im Hinblick auf die konzeptionelle Einordnung der Berichte wurde untersucht, wie diese die zehn forstlichen und 29 unternehmerischen Items wiedergeben (vgl. Tabelle 3). Wie in Abbildung 3 dargestellt ist, weisen alle Berichte

**Abbildung 2**

Anzahl der vorgefundenen Items innerhalb der sieben thematischen Kategorien in den einzelnen Berichten.

**Abbildung 3**

Typisierung der Berichte nach forstlichen und unternehmerischen Nachhaltigkeitsaspekten anhand der Wiedergabe entsprechender Items. Vertikale und horizontale Linie zeigt Mittelwert an.

sowohl Elemente der forstlichen Berichterstattung, als auch der unternehmerischen Nachhaltigkeitsberichterstattung auf und können daher als Mischtypen bezeichnet werden. Die gestrichelte horizontale bzw. vertikale Linie stellt den jeweiligen Mittelwert dar, anhand dessen eine Typisierung vorgenommen werden kann. Dabei ist die prozentuale Streuung der forstlichen Items größer als die der unternehmerischen. Es zeigt sich, dass die BaySF und Hessen-Forst, die auch insgesamt die itemreichsten Berichte veröffentlicht haben, in den Bereich des Typs ii fallen, d. h. sowohl überdurchschnittlich viele forstliche als auch unternehmerische Items beschreiben. Auch zeigt sich, dass drei der vier Anstalten öffentlichen Rechts (grau dargestellt) über vergleichsweise viele unternehmerische Items berichten (Typ ii und iii), während die Mehrheit der Landesbetriebe unterdurchschnittlich viele unternehmensbezogene Items nennt (Typ i und iv).

Die Wiedergabehäufigkeit der Items innerhalb einer thematischen Kategorie und die besonders häufig genannten einzelnen Items geben einen Überblick über die Schnittmenge der Berichte. Diese enthält typischerweise die

Tabelle 3

Checkliste, Quellen der Items und Anzahl der Berichte, in denen sie wiedergefunden wurden. Items mit (u) und (f) sind in die Auswertung für den unternehmerischen bzw. forstlichen Fokus der Berichte eingeflossen.

Kate-gorie	Item (ggf. Fokus)	Quelle	An-zahl
Unternehmensdarstellung			
9	Name	GRI	11
	Rechtsform	(u) GRI, IÖW	10
	Unternehmensstruktur	(u) GRI, IÖW	10
	Kontaktdaten	(u) GRI, IÖW	10
	Naturaldaten	(f) PrPI, TBN, WBr	8
	Unternehmensaufgaben	(u) GRI, IÖW	5
	Leitbild /Selbstverständnis	(u) GRI, IÖW	2
	Tätigkeitsübersicht	(u) GRI, IÖW	1
	Nennung von Stakeholdern	(u) GRI, IÖW	1
Mitarbeiter			
10	Anzahl	HGB, GRI, IÖW, PrPI, TBN	11
	Gruppierung	HGB, GRI, PrPI, TBN	10
	Vollerwerbsplätze, Teilzeitinfor-mation	(u) IÖW	7
	Unfallstatistik	GRI, IÖW, WBr	7
	besondere Arbeitssicherheit-/Gesundheitsmaßnahmen	(u) GRI, IÖW	7
	Strategien und Ziele formuliert	(u) GRI, IÖW	7
	Mitarbeiterzufriedenheit	(u) IÖW	4
	Frauenquote/ Schwerbehinderte o. ä.	(u) GRI, IÖW	4
	Aus- und Fortbildung	(u) GRI, IÖW	4
	operative Zielangaben	(u) GRI, IÖW	4
Finanzkennzahlen			
17	Ergebnis	HGB, GRI, WBr	11
	Lagebericht, Rahmenbedingun-gen	HGB	10
	Aufwandstruktur	HGB, GRI, TBN	10
	Abschreibung	HGB, TBN, WBr	10
	Bilanz und GuV	HGB, IÖW	9
	Gesamtumsatz	HGB, GRI, IÖW	9
	Darstellung Aufwand/Ertrag ein-zelner Produkte/-gruppen	(f) PrPI, TBN	9
	Investitionen	TBN	8
	Ertragsstruktur	HGB, WBr	8
	zukünft. Chancen u. Risikendar-stellung	HGB, GRI, IÖW	8
	Aufgliederung Umsatz	(u) HGB, IÖW	7
	Abgaben und Zuschüsse Land – Betrieb bzw. Anstalt	GRI, IÖW, TBN, WBr	7
	operative Zielangaben	(u) GRI, IÖW	5
	Aufwand und Ertrag je PB	(f) PrPI, TBN, WBr	4
	Strategien und Ziele formuliert	(u) GRI, IÖW	4
	Darstellung Verwaltungsauf-wand	HGB, PrPI, TBN	2
	Steuern, Beiträge, Versicherung	HGB, IÖW, TBN	1

Kate-gorie	Item (ggf. Fokus)	Quelle	An-zahl
Waldbau und Jagd			
10	Waldbewirtschaftungszertifikate	WBr	11
	Streckenmeldungen je Wildart	PrPI	8
	Darstellung waldbaul. Maß-nahmen [ha]	PrPI	7
	verpachteter Jagdfläche [% / ha]	PrPI	7
	Strategien und Ziele formuliert	(u) GRI, IÖW	7
	Flächenzu- und -abgänge	(f) TBN, WBr	6
	operative Zielangaben	(u) GRI, IÖW	6
	Kalkungsmaßnahmen [ha]	(f) PrPI, WBr	5
	Anteil von Jagdgästen erlegtes Wild	PrPI	5
	PSM Einsatz [ha / ml]	WBr	1
Holzproduktion			
17	Einschlag gesamt	(f) (GRI), PrPI, TBN, WBr	10
	Durchschnittspreis [EUR/Fm]	PrPI	9
	Verhältnis (Zuwachs) – Hiebsatz – Einschlag	(f) PrPI, TBN	7
	Differenzierung Einschlag (Lbh-Ndh, VN-EN, Aufarbeitung, BA)	(f) PrPI, TBN, WBr	7
	Diversifizierung/neue Geschäftsfelder	GRI, IÖW, PrPI	7
	Unternehmereinsatz [EUR/Fm/%]	GRI, IÖW, PrPI, TBN	6
	Brenn- und Energieholz [Fm/SRM]	(f) TBN, WBr	6
	wesentliche Absatzmärkte	(u) GRI, IÖW	5
	operative Zielangaben	(u) GRI, IÖW	5
	Anteil Zwangsnutzung	(f) PrPI, TBN	4
	Strategien und Ziele formuliert	(u) GRI, IÖW	4
	Holzerntekostenfreier Erlös oder Erntekosten [Fm]	PrPI	2
	Normen u. Zertifikate (außer FSC /PEFC)	(u) GRI, IÖW	2
	Ökolog. Aspekte d. Produktion	(u) GRI, IÖW	2
	Lieferkette	(u) GRI, IÖW	2
	Eigenverbrauch (Deputat u. ä.)	TBN	0
	Produktverantwortung	(u) GRI, IÖW	0
Naturschutz und Klima			
11	beispielhafte Darstellung von Maßnahmen	WBr	10
	Strategien und Ziele formuliert	(u) GRI, IÖW	6
	rechtlich ausgewiesene Schutz-gebiete [%/ha]	GRI, PrPI, TBN, WBr	4
	Stilllegungsflächen [%/ha]	WBr	4
	operative Zielangaben	(u) GRI, IÖW	4
	Maßnahmenüberblick	IÖW, WBr	3
	Anteil Nadelholz bzw. Laubholz [%/ha]	WBr	3
	CO ₂ Bindung [t/t/ha]	GRI, WBr	2
	Totholz [m ³ /ha]	WBr	0
	eingeführter Baumarten [%/ha]	WBr	0
	nat. Waldgesellschaften [%/ha]	WBr	0

Kategorie	Item (ggf. Fokus)	Quelle	Anzahl
Soziale Aspekte			
6	zahlenmäßige Darstellung zur Erholung/Waldpädagogik	WBr	11
	beispielhafte Darstellung von Maßnahmen	IÖW, WBr	10
	Maßnahmenüberblick	IÖW, WBr	3
	Strategien und Ziele formuliert	(u) GRI, IÖW	3
	operative Zielangaben	(u) GRI, IÖW	3
	Anteil Erholungswald [%/ha]	PrPI	2

folgenden Themen und Informationen, die sich in mindestens neun der elf untersuchten Berichten wiederfinden lassen (vgl. auch Tabelle 3):

- ♦ Unternehmensdarstellung mit Name, Rechtsform, Unternehmensstruktur und Kontaktdaten des jeweiligen LFB,
- ♦ Anzahl und Gruppierung (z. B. nach Laufbahn) der eigenen MitarbeiterInnen,
- ♦ Wirtschaftsergebnisse,
- ♦ in der Kategorie „Waldbau und Jagd“ immer zumindest das Waldbewirtschaftungszertifikat,
- ♦ in der Kategorie „Holzproduktion“ zumindest der Gesamteinschlag und meist auch der Durchschnittspreis je verkauftem Festmeter,
- ♦ in der Kategorie „Naturschutz und Klima“ schwerpunktmäßig die beispielhafte Darstellung von Maßnahmen,
- ♦ Maßnahmen und Daten aus der Kategorie „Soziale Aspekte“
- ♦ Und neben den erwähnten Kategorien erfolgt auch häufig die Vorstellung aktueller Ereignisse bzw. eines Jahresrückblicks.

3.2.2 Berichtsform

Auch die rein formale Betrachtung der Berichte zeigt z. T. große Unterschiede zwischen den Dokumenten. Wie in Abbildung 4 dargestellt schwankt der Umfang der Berichte zwischen 68 und 168 Seiten. Während manche Berichte über einen umfassenden Tabellenteil verfügen, ist dieser bei anderen Länderforstberichten sehr kurz gehalten. Die Anzahl der Wörter, ohne Berücksichtigung der Tabellen, liegt zwischen 8.600 und 27.500, im Durchschnitt bei 17.300. Bezogen auf die Textseiten ergeben sich damit zwischen 118 und 250, durchschnittlich 184 Wörter je Seite, was auf die reiche Bebilderung der Berichte hindeutet. Keiner der untersuchten Berichte bezieht sich auf die GRI oder ähnliche Standards. In vier der Berichte findet sich eine externe Bestätigung von Berichtsinhalten, was z. B. vom IÖW/future e. V. als Qualitätsmerkmal für Nachhaltigkeitsberichte gewertet wird. Allerdings handelt es sich bei den forstlichen Berichten hierbei um die bei einigen LFBs geforderte Prüfung des Jahresabschlusses durch einen Wirtschaftsprüfer.



Abbildung 4

Seitenzahl (Säulen) und Wörter je Seite (Kreuze) der untersuchten Länderforstberichte, wobei die dunkle Säule Seiten darstellt, die ausschließlich Tabellen enthalten.

Abbildung 5 stellt eine Typisierung der Berichte nach formalen und inhaltlichen Kriterien dar. Dabei wird der Länge der Berichte, gemessen in Wörterzahl der Textseiten, die Anzahl der im Bericht aufgeführten Items gegenübergestellt. Wie sich zeigt, besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Länge der Berichte und der Menge der gefundenen Items. Die horizontale und vertikale Linie stellen dabei die Mittelwerte dar, anhand derer die Berichte in vier Typen eingeteilt werden. Dabei ergibt sich, dass lediglich der Bericht der Schleswig-Holsteinischen Landesforsten gerade noch dem Typ A zugeordnet werden kann, der überdurchschnittlich kurze Berichte mit überdurchschnittlich vielen Items beschreibt. Den anderen Typen B bis D können jeweils mehrere Berichte zugeordnet werden, wobei manche Berichte trotz unterschiedlicher Typenzuordnung recht nah beieinander liegen. Die Gerade durch den Ursprung und den Schnittpunkt der Mittelwerte stellt den durchschnittlichen Informationsgehalt der Berichte als Verhältnis von

genannten Items und Wörterzahl dar. Dabei zeigt sich, dass sechs der Berichte eine überdurchschnittliche Informationsdichte aufweisen und oberhalb dieser Geraden zu finden sind, während der Bericht der Niedersächsischen Landesforsten fast genau dem Mittelwert entspricht und alle anderen im Vergleich mit den aufgewendeten Wörtern über weniger Items berichten und unterhalb der Gerade liegen.

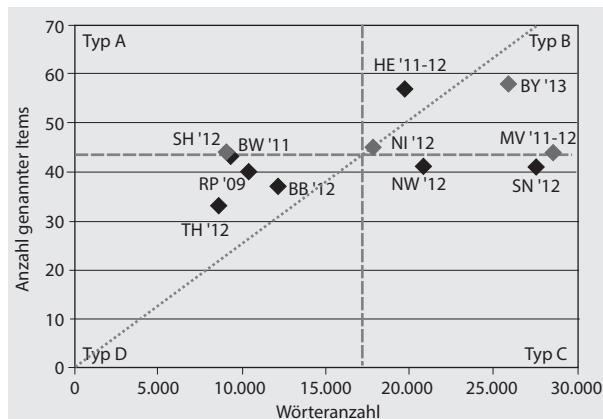


Abbildung 5

Typisierung der Berichte nach inhaltlichen und formalen Kriterien. Vertikale und horizontale Linie zeigt Mittelwert an.

3.3 Interviews

Im Rahmen der zehn ergänzenden Interviews wurde jeweils die/der für die Berichterstattung verantwortliche MitarbeiterIn der LFBs zu dem Hintergrund des Berichts, den Zielen, Zielgruppen, dem Aufwand, dem Prozess der Erstellung, dem Stellenwert und geplanten Änderungen befragt. Der dazu verwendete Fragebogen findet sich im Anhang.

Bei den untersuchten Berichten handelt es sich mit Ausnahme von ThüringenForst um einen Wiederholungsbericht, der in allen Ländern, außer Mecklenburg-Vorpommern, auch als jährliche Veröffentlichung angedacht ist. Neun von zehn Interviewten äußerten, dass sich die Art der Berichterstattung mit Änderung der Forstorganisation und Einführung der neuen Rechtsformen ab 2001 (Landesbetriebe und AöR) (Sproßmann, 2009) geändert hat. So sind im Allgemeinen v. a. neue thematische Schwerpunkte gesetzt worden. Für die Hälfte der LFBs besteht dabei eine gesetzliche oder satzungsmäßige ⁴ Verpflichtung, einen Bericht zu veröffentlichen, wobei es keine konkreten Vorgaben über die zu veröffentlichenden Inhalte gibt, die über die formalen Angaben zum Jahresabschluss nach dem HGB hinausgehen.

Als Ziele der Berichte geben neun von zehn der LFBs an, über die eigenen Tätigkeiten berichten und ein positives Selbstbild vermitteln zu wollen. Acht wollen außerdem über den Forstbetrieb als solchen informieren. Dabei erfolgt die Auswahl der Inhalte bei allen LFBs unter Beachtung aktueller Themen und häufig in Anlehnung an die Vorjahresberichte,

während Berichten anderer LFBs oder Branchen nur wenig Einfluss zugesprochen wird.

Als Zielgruppe werden vor allem die Landespolitik, die interessierte Öffentlichkeit und wichtige GeschäftspartnerInnen genannt. So erscheinen der Landtag acht, die Landesregierung sieben und die Ministerien sechs der Befragten als „sehr wichtig“, ähnlich wie es auch die Untersuchungen von Hartebrodt et al. (2009) gezeigt haben. Die Bedeutung der MitarbeiterInnen als Zielgruppe für die Berichte wird dagegen sehr unterschiedlich eingeschätzt: Vier halten sie für „sehr wichtig“ und drei für „wichtig“, andere stufen sie aber nur als „durchschnittlich“ oder „unwichtig“ ein. Als überwiegend „unwichtig“ werden dagegen Jagdgäste und Waldbesucher als Zielgruppe der untersuchten Berichte verstanden. Von den im Schnitt etwa 2.500 gedruckten Exemplaren (500 bis 8.500) verschicken alle LFBs einen Anteil gezielt an bestimmte Stakeholder. Dabei weichen die Befugnisse der LFBs zum Teil stark voneinander ab, was den Umgang mit der wichtigen Zielgruppe Landtag angeht. Während ein Interviewpartner zur Ergänzung des Fragebogens angab, dass die Berichte den einzelnen Abgeordneten möglichst persönlich übergeben werden, ist es einem anderen LFB, laut Befragung, gar nicht erlaubt, direkt mit dem Landtag in Kontakt zu treten.

Wie viel Aufwand hinter der Erstellung der Berichte steckt, konnte keiner der Befragten genau angeben. Die Schätzungen für den Bearbeitungszeitraum liegt mehrheitlich bei sechs Monaten, während die tatsächliche Bearbeitungszeit – ohne externe Bearbeitung – mit mindestens sechs Personenwochen bis hin zu einem Personenjahr angegeben wurde. Die Bearbeitung erfolgt dabei fast überall auf mehreren betrieblichen Ebenen und mit einer Ausnahme werden Satz und Druck dann extern vergeben. Ist der Bericht zusammengestellt, so genehmigt in den meisten LFBs der Vorstand bzw. Betriebsleiter, oder dieser zusammen mit dem Verwaltungsrat bzw. der Aufsichtsbehörde die Endfassung. In nur einem Fall liegt diese Entscheidung allein beim zuständigen Ministerium.

Im Kontext der gesamten betrieblichen Öffentlichkeitsarbeit spielen die untersuchten Berichte in den LFBs eine unterschiedliche Rolle. Zwei Befragte ordneten den Bericht als „sehr wichtig“ ein, sechs als „wichtig“ und zwei als „durchschnittlich“. Für die nähere Zukunft sind bei der Hälfte der Länder keine besonderen Änderungen vorgesehen. Bei anderen ist z. B. einmal die Integration eines Kennzahlenplans wie z. B. (Sustainability) Balanced Scorecard, einmal die Anpassung an die GRI Kriterien, einmal ein zusätzlicher Gemeinwohlbericht oder in einem Fall eine grundsätzliche Überarbeitung des Konzepts geplant.

4 Diskussion

Da für die durchgeführte Untersuchung kein existierendes Standardverfahren angewendet werden konnte, erscheint das hier entwickelte, vorab beschriebene Verfahren als besonders diskussionswürdig. Dabei kann insbesondere die Auswahl der Quellen und darauf aufbauend die Wahl der

⁴ Die Frage vier zur gesetzlichen Berichtspflicht wurde bei der Befragung um „satzungsgemäß“ ergänzt.

Items kritisch betrachtet werden. Die ganz unterschiedliche Ausrichtung der ausgewählten Quellen und die darauf basierende gutachterliche Auswahl der Items könnten zu einer verzerrten Themenauswahl führen, bei der bestimmte betriebliche Informationen möglicherweise gar nicht betrachtet werden, obwohl sie typischerweise in den Berichten vorkommen. Allerdings konnten weder beim Prüfen der Berichte für die Inhaltsanalyse, noch bei der Analyse der Inhaltsverzeichnisse solche Informationen identifiziert werden. Darüber hinaus hat die Itemanalyse gezeigt, dass die tatsächliche Schnittmenge der Berichte recht klein ist. Durchschnittlich entsprechen sich zudem nur 49 % der Items in zwei Berichten und über die Hälfte der Items ist nur in sechs oder weniger der elf untersuchten Berichte zu finden, was für eine breite Auswahl der zusammengestellten Items spricht. Insgesamt zeigen die oben dargestellten Ergebnisse, dass das vorgestellte Analyseschema auf die forstliche Berichterstattung angewendet werden kann und vielseitige Rückschlüsse erlaubt.

So spricht die ausführliche Vorstellung des jeweiligen Länderforstbetriebs und der Details zu den eigenen MitarbeiterInnen dafür, dass es den LFBs wichtig ist, die seit den Forstreformen gewonnene, größere Eigenständigkeit der Betriebe (Sproßmann, 2009) herauszustellen. Die Betonung dieser „klar erkennbare(n) betriebliche(n) Identität“ ist laut Oesten und Roeder (2012, S. 302) ein grundlegendes Element beim Aufbau von Glaubwürdigkeit im Rahmen des normativen Managements.

Die betriebliche Eigenständigkeit geht aber auch Hand in Hand mit der konkreten Erwartung, die Wirtschaftlichkeit der LFBs zu steigern (Sproßmann, 2009), was den großen Anteil an finanziellen Items in den Berichten erklären könnte, zumal dieser bei „ökonomisch optimierten“ (Sproßmann, 2009, S. 1054) AöR noch höher ausgefallen ist. Die intensive Darstellung der Kategorie „Finanzkennzahlen“ kann aber auch auf das Eigenverständnis der LFBs als Wirtschaftsbetriebe hindeuten, die ihre wirtschaftliche Leistung als Beitrag zum Wohl der Allgemeinheit verstanden wissen möchten. Dagegen stellt z. B. nicht einmal die Hälfte die gesetzlichen oder satzungsgemäßen Aufgaben des LFB dar, obwohl über die eigene Tätigkeit zu berichten von vielen InterviewpartnerInnen als Ziel der Berichte angegeben worden ist. Möglicherweise erscheint eine Gesamtschau der Aufgaben aber als zu profan, zumal diese sich, im Vergleich zur Rechtsform und Organisation nur ausnahmsweise geändert haben.

Ausnahmslos alle LFBs berichten in der Kategorie „Waldbau und Jagd“ über ihr Waldbewirtschaftungszertifikat. Dieses erscheint in der Außendarstellung wichtiger als die gesetzliche Verpflichtung, den Wald vorbildlich und unter besonderer Beachtung des Gemeinwohls zu bewirtschaften, die in den Berichten zumeist gar nicht explizit adressiert wird. Offensichtlich spielt grade in diesem Kernbereich auch die Vermittlung von Glaubwürdigkeit durch die Bestätigung Dritter eine wichtige Rolle.

Nachhaltigkeitsaspekte der Holzproduktion werden dagegen kaum thematisiert; Fragestellungen nach Ressourcenverbrauch bei der Holzernte (ökologische Aspekte der Produktion), Zertifizierung der Zulieferer oder Holzkäufer

(Lieferkette) oder auch die Analyse der Absatzmärkte, fehlen in der Mehrheit der Berichte. Diese Aspekte stehen damit bei Weitem nicht so sehr im Fokus, wie die Menge des geernteten Holzes und das damit verdiente Geld. Auch zeigt sich in dieser Kategorie wieder der besondere betriebliche Fokus in den meisten Berichten: Sieben der LFBs stellen zusätzlich dar, wie sie ihre betrieblichen Tätigkeiten diversifizieren und neue Geschäftsfelder erschließen.

Alle Berichte thematisieren außerdem Aspekte des Waldnaturschutzes und der Erholung. Während aber im Bereich Erholung und Waldpädagogik gerne Daten wie Besucherzahlen angegeben werden, legen die meisten Berichte der Kategorie „Naturschutz und Klima“ ihren Schwerpunkt auf die beispielhafte Darstellung von durchgeführten Maßnahmen oder Projekten. Vor allem Items aus dem Waldbericht der Bundesregierung wie z. B. Angaben zu Totholz, Stilllegungsflächen oder eingeführten Baumarten kommen in den Berichten nicht zur Sprache. Das kann einerseits damit zusammenhängen, dass sich diese Daten im Rahmen jährlicher Betrachtung kaum ändern und sie z. T. an anderer Stelle veröffentlicht werden. Andererseits zeigt sich an dieser Stelle vielleicht auch der, von Krott (2001) beschriebene, Konflikt, zwischen den Zielen der Öffentlichkeitsarbeit Transparenz zu schaffen und gleichzeitig die eigenen Interessenspositionen nicht zu beschädigen. Das steht zudem im Einklang mit den formulierten Zielen, über die Tätigkeiten und den Betrieb informieren zu wollen und eine positive Selbstdarstellung zu kommunizieren.

Anders als es IÖW/future e. V. oder die GRI vorsehen, werden von den Länderforstbetrieben nur für die Hälfte der Kategorien Strategien und Ziele für die Zukunft formuliert. Sie richten den Blick schwerpunktmäßig in die Vergangenheit, wie es auch für die Berichterstattung der Forstverwaltungen typisch war (Hartebrodt et al., 2009; Krott, 2001). Der Trend scheint sich aber dahingehend zu entwickeln, mehr Strategien und Ziele darzustellen, beispielsweise im Hinblick auf die Veröffentlichung von (Sustainability) Balanced Scorecards und gesonderten Publikationen mit entsprechendem Fokus (z. B. die unternehmerische Konzeption der Landesforst Mecklenburg-Vorpommern). Auf diese Weise werden Öffentlichkeit und Landespolitik schon frühzeitig von Planungen und Zielsetzungen in Kenntnis gesetzt. Außerdem erlauben die LFBs so eine kritische Begleitung ihrer Entwicklung und einen Vergleich des Erreichten mit Sollwerten (Selbstregulierung).

Darüber hinaus haben die Interviews ergeben, dass die LFBs, die sich für die Veröffentlichung eines Berichts entschieden haben, nennenswerten Aufwand betreiben, um diesen zu erstellen. Grüb und Greiling (2015) nennen vier Motive für Nachhaltigkeitsberichterstattung in öffentlichen und erwerbswirtschaftlichen Unternehmen. Die Interviewergebnisse zeigen, dass alle vier Motive – rechtliche Verpflichtung, „business case“ (betriebswirtschaftliche Hintergründe), Legitimation und Selbstregulierung – auch für öffentliche Forstbetriebe zumindest teilweise zutreffen. Eine rechtliche Berichtsverpflichtung besteht zumindest für die Hälfte der Betriebe, auch wenn diese inhaltlich nicht sehr umfassend ist. Das Motiv „business case“ geht dagegen von einer

positiven finanziellen Auswirkung des Berichts für das Unternehmen aus. Dieses Motiv kann hinter den Aussagen vermutet werden, dass GeschäftspartnerInnen eine besonders wichtige Zielgruppe für den Bericht darstellen. Die mehrheitliche Nennung der Öffentlichkeit und Landespolitik als Zielgruppen der Berichte, lassen sich mit der Rolle der LFBs als öffentliche Institutionen erklären, denen sowohl das gesellschaftliche Vertrauen als auch die Legitimation besonders wichtig sind (Meynhardt, 2008). Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass auch Legitimation ein wichtiges Motiv zur Berichterstattung der öffentlichen Forstbetriebe ist. Es unterstreicht darüber hinaus die Eignung der Berichte als Indikator für den Umgang der LFBs mit Nachhaltigkeitsbelangen, denn deren Darstellung erscheint in der Kommunikation mit dem Land und der Öffentlichkeit, sozusagen Auftraggeber und Kunde (vgl. Moore, 2003), besonders angebracht. Das letzte Motiv, das Grüb und Greiling (2015) für die Berichterstattung öffentlicher Unternehmen nennen, ist die Selbstregulierung. Diese findet sich vornehmlich in der zunehmenden Veröffentlichung von betriebseigenen Ziel- und Sollwerten, z. B. konzentriert in (Sustainability) Balanced Scorecards, die mit Veröffentlichung eine gesteigerte Verbindlichkeit entwickeln.

5 Ausblick

Insgesamt zeigt sowohl die formale Betrachtung der Berichte als auch die Inhaltsanalyse, dass die LFBs ganz unterschiedlich berichten. Einige der Forstbetriebe haben sich beispielsweise entschieden, einen ausführlichen Tabellenband vom eigentlichen Bericht zu trennen oder, wie die BaySF, sogar drei getrennte Berichte zu veröffentlichen, wovon einer, ganz schlicht gehalten, nur den betriebswirtschaftlichen Jahresabschluss beinhaltet. Die inhaltlichen Abweichungen deuten auf verschiedene Fokussierungen innerhalb der Bundesländer oder auch zwischen bestimmten Organisationsformen, wie z. B. der Einheitsforstverwaltung, hin. Diese Vielfalt erschwert aber den direkten Vergleich der Berichte und damit der LFBs, da die gemeinsame Schnittmenge nur relativ wenige Detailinformationen enthält, die von allen Betrieben gleichermaßen bereitgestellt werden. Auch vorhandene Kataloge forstlicher Kennzahlen, wie das Schema des DFWR und des BMELV Testbetriebsnetzes, die als Standards zum Zweck des betrieblichen Vergleichs angelegt sind, werden von den Betrieben nicht konsequent genutzt. Die Interviews haben zudem gezeigt, dass sich die Betriebe bei der Erstellung ihrer Berichte – anders als früher – wenig von den Veröffentlichungen anderer Länder beeinflussen lassen. Diese Unübersichtlichkeit bemängelt auch Tzschupke (2014) im Rahmen seines jährlichen Vergleichs der Betriebsergebnisse der LFBs. Trotz der ähnlichen Zielsetzungen bei der Berichtserstellung kann also von einer einheitlichen Kommunikation der Branche keine Rede sein. Diesen individuellen Kommunikationskonzepten steht allerdings ein gesellschaftliches Interesse am Wald gegenüber, das längst nicht immer Rücksicht auf Landesgrenzen nimmt. Eine bessere Vergleichbarkeit der Berichte könnte in diesem

Zusammenhang den Fokus von den formalen und inhaltlichen Eigenheiten der Berichte und Betriebe auf die unterschiedliche Ausprägung verschiedener Sachverhalte (Flächenausstattung, Holzerlöse, Totholzanteile etc.) in den LFBs lenken und so eine Bereicherung für die Diskussion zur nachhaltigen und gemeinwohldienlichen Ausrichtung der öffentlichen Forstbetriebe darstellen.

Der sachliche Austausch zwischen Forstbetrieben und Öffentlichkeit stellt nämlich eine elementare Grundlage für die Weiterentwicklung der öffentlichen Forstwirtschaft im Sinne einer erweiterten Nachhaltigkeit dar – und das auch länderübergreifend. Eine kritische Würdigung der von den LFBs freiwillig und im Hinblick auf die Öffentlichkeit publizierten Informationen bedeutet in diesem Austausch einen ersten wichtigen Schritt, der für eine konstruktive Rückkopplung genutzt werden kann, wie er in anderen Branchen, wie zu Beginn dargelegt, längst unternommen worden ist. Das oben dargelegte analytische Konzept möchte hier anknüpfen und mit dem vorgestellten Analyseschema eine Möglichkeit aufzeigen, wie eine solche kritische Würdigung umgesetzt werden kann. Wobei die zusammengestellte Checkliste den LFBs auch Anstöße und Ideen für weitere Berichtsgestaltung im Sinne einer erweiterten Nachhaltigkeit liefern kann.

Da Nachhaltigkeitsbelange gerade in öffentlichen Forstbetrieben von großer Bedeutung sind, kann die Etablierung eines gemeinsamen Standards einen Verbesserungsprozess in Gang setzen, der über das eigentliche Berichtswesen hinausgeht, wie es das IÖW und future e. V. mit ihrem Ranking beabsichtigen. Dazu müssen die öffentlichen Forstbetriebe aber bereit sein, best practice Ansätze zu übernehmen und das Berichtswesen als Ausdruck eines öffentlichen Benchmarkings zu begreifen, bei dem nicht der „schönste Bericht“ im Vordergrund steht, sondern die tatsächliche Erhebung und Dokumentation von gesellschaftlich relevanten Daten sowie deren Berücksichtigung in betrieblichen Abläufen. Ähnlich wie eine Erfassung des Ressourcenverbrauchs Einsparungsmöglichkeiten aufzuzeigen vermag, kann die geordnete Zusammenfassung von Naturschutzmaßnahmen oder eine Verbleibanalyse des verkauften Rohholzes nicht nur im Bericht verwendet werden, sondern auch wichtige Hinweise für das Management geben. Die forstliche Berichterstattung der deutschen Länderforstbetriebe birgt entsprechend noch ein großes, bisher wenig genutztes Potenzial, zu deren Entwicklung dieser Artikel beitragen möchte.

6 Danksagung

Danken möchte die Autorin an dieser Stelle zuerst ihren InterviewpartnerInnen der Länderforstbetriebe für die durchweg zeitnahen Rückmeldungen, die überall vorhandene Bereitschaft, sich für die Fragen Zeit zu nehmen, und die vielen aufschlussreichen Gespräche quer durch Deutschland. Besonders das bekundete Interesse an den Ergebnissen der Untersuchung war ein großer Ansporn für die Autorin. Vielen Dank außerdem den zwei anonymen Reviewern für ihre Unterstützung und das ausführliche Feedback zu diesem Beitrag.

7 Anlage

Seite 1 von 3

Befragung: Berichterstattung Länderforsten

Geschäfts- und Nachhaltigkeitsberichte findet man heute in den unterschiedlichsten Branchen in ganz unterschiedlicher Form. Die nachfolgenden 16 Fragen sollen Aufschluss geben über das Erscheinen, die Inhalte und Ziele, die Verbreitung, sowie den Stellenwert dieser Berichte in den verschiedenen deutschen Länderforsten.

Betrifft den Bericht: _____

Datum: _____ Interviewpartner: E. Kindler befragt: _____

1. Handelt es sich bei dem oben genannten Bericht um einen Wiederholungsbericht oder um den ersten Bericht dieser Art?

☐ Wiederholungsbericht ☐ erster Bericht dieser Art

a. Wenn Wiederholungsbericht: Wann erschien der erste Bericht dieser Art?

2. Wenn Wiederholungsbericht ODER Nachfolgebericht geplant: In welchem Turnus wird der Bericht veröffentlicht?

☐ jedes Jahr ☐ alle zwei Jahre
☐ unregelmäßig alle 1-3 Jahre ☐ Sonstiges: _____

3. Hat sich die Berichterstattung Ihres Betriebes mit Einführung der neuen Rechtsform (AGR / Landesbetrieb) geändert?

☐ ja ☐ nein

a. Wenn ja: Was hat sich verändert?

4. Besteht eine gesetzliche Berichtspflicht?

☐ ja ☐ nein

a. Wenn ja: Was umfasst diese?

Seite 3 von 3

11. Werden die Berichte gezielt an bestimmte Personen verschickt?

☐ ja ☐ nein

a. Wenn ja: An was für Personenkreise bzw. Stakeholder werden die Berichte verschickt?

12. Wie viel Aufwand ist mit der Erstellung des Berichts verbunden? (z.B. anhand von Anzahl beteiligter Personen, Vorbereitungszeit)

13. Auf welcher betrieblichen Ebene erfolgt die inhaltliche Bearbeitung? (Sachbearbeiter, Abteilungsleiter, Betriebsleitung, interne und/oder externe Bearbeitung etc.)

14. Wer im Betrieb oder außerhalb genehmigt die Endfassung des Berichts, bevor dieser gedruckt werden kann?

15. Wie wichtig ist der Bericht im Vergleich zur gesamten betrieblichen Öffentlichkeitsarbeit? (bitte einordnen)

sehr unwichtig ☐ unwichtig ☐ durchschnittlich ☐ wichtig ☐ sehr wichtig ☐

16. Sind aktuell Änderungen im Ihrem betrieblichen Berichtswesen geplant?

Vielen Dank für Ihre Unterstützung.

Elisabeth Kindler
 Abt. für Forstökonomie und Forsteinrichtung
 Universität Göttingen
 Büsingenweg 3 37077 Göttingen
 Tel. 0551-39-33423
 Mail: ekindie@gwdg.de
 FERNLEBENSBEREICH

Seite 2 von 3

5. Was ist Ziel des Berichts?

	nicht zutreffend	teilw. zutreffend	zutreffend
über Tätigkeit informieren	☐	☐	☐
über Wald informieren	☐	☐	☐
über Betrieb / Anstalt informieren	☐	☐	☐
Anfragen von dritter Seite begegnen	☐	☐	☐
positive Selbstdarstellung	☐	☐	☐
Sonst. _____	☐	☐	☐
Sonst. _____	☐	☐	☐

6. Wie werden die Inhalte festgelegt?

	nicht zutreffend	teilw. zutreffend	zutreffend
vorjährige Berichte	☐	☐	☐
Berichte andere (Bundes-)Länder	☐	☐	☐
Berichte andere Branchen	☐	☐	☐
gesetzliche Vorgaben	☐	☐	☐
aktuelle Themen	☐	☐	☐
Sonst. _____	☐	☐	☐
Sonst. _____	☐	☐	☐

7. Wie viele Exemplare dieses Berichtes sind gedruckt worden?

8. Wie oft wurde der Bericht als pdf-Dokument heruntergeladen?

9. Wer soll mit dem Bericht angesprochen werden?

10. Wie schätzen Sie die Bedeutung der nachfolgenden Gruppen als Zielgruppe für Ihren Bericht ein?

	sehr unwichtig	unwichtig	durchschnittlich	wichtig	sehr wichtig
Landtag	☐	☐	☐	☐	☐
Ministerien	☐	☐	☐	☐	☐
Landesregierung	☐	☐	☐	☐	☐
ggf. Aufsichtsrat	☐	☐	☐	☐	☐
NGOs	☐	☐	☐	☐	☐
Mitarbeiter	☐	☐	☐	☐	☐
Waldbesucher	☐	☐	☐	☐	☐
Holzkäufer	☐	☐	☐	☐	☐
Jagdgäste	☐	☐	☐	☐	☐
Fachpresse	☐	☐	☐	☐	☐
Sonst. _____	☐	☐	☐	☐	☐
Sonst. _____	☐	☐	☐	☐	☐

Literatur

- Amtliche(n) Mitteilungen aus der Abtheilung für Forsten des Königlich Preußischen Ministeriums für Landwirtschaft, Domänen und Forsten - Preußen / Minist. Landwirtsch. Domänen Forsten (1901) Amtliche Mitteilungen aus der Abtheilung für Forsten des Königlich Preußischen Ministeriums für Landwirtschaft, Domänen und Forsten. Berlin : Springer, 411 p
- Atteslander P (2003) Methoden der empirischen Sozialforschung. Berlin : de Gruyter, 411 p
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014) Der Wald in Deutschland : ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur [online]. Zu finden in <https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Dokumente/Downloads/BMEL_Wald_Broschuere.pdf> [zitiert am 01.10.2015]
- BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2009) Waldbericht der Bundesregierung 2009 [online]. Zu finden in <http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Waldbericht2009.pdf?__blob=publicationFile> [zitiert am 01.10.2015]
- BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2012) Buchführung der Testbetriebe (Forstwirtschaft) : Ausführungsanweisung zum Erhebungsbogen für Forstbetriebe (gültig ab FWJ 2011) [online]. Zu finden in <<http://berichte.bmelv-statistik.de/BFB-0113005-2011.pdf>> [zitiert am 01.10.2015]
- Bundeskartellamt (2015) Verwaltungsverfahren Beschluss Gem. § 32 GWB : öffentliche Version ; Land Baden-Württemberg gegen VSH Verband der Säge und Holzindustrie. Bundeskartellamt (B 1-72/12)
- Deutscher Bundestag (1998) Abschlußbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“ : Konzept Nachhaltigkeit Vom Leitbild zur Umsetzung ; Drucksache 13/11200 [online].

- Zu finden in <<http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/13/112/1311200.pdf>> [zitiert am 01.10.2015]
- DFWR - Deutscher Forstwirtschaftsrat (2014) Jubiläumsjahr „300 Jahre Nachhaltigkeit“ [online]. Zu finden in <http://www.forstwirtschaft-in-deutschland.de/fileadmin/content/pdf/300Jahre_Nachhaltigkeit_internet.pdf> [zitiert am 01.10.2015]
- DFWR - Deutscher Forstwirtschaftsrat (2015) Forstliches Rechnungswesen : Kennzahlen [online]. Zu finden in <<http://www.dfwr.de/download/>> [zitiert am 01.10.2015]
- Dobler G, Suda M, Höhensteiger F (2014) Die Greenpeace-Kampagne im Spessart. *AFZ Wald* 69(2):23–28
- Gebauer J, Hoffmann E, Westermann U (2011) Anforderungen an die Nachhaltigkeitsberichterstattung : Kriterien und Bewertungsmethode im IÖW/future-Ranking [online]. Zu finden in <http://www.ranking-nachhaltigkeitsberichte.de/data/ranking/user_upload/konzerne/2009/Ranking2009_KriteriensetGrossunternehmen.pdf> [zitiert am 01.10.2015]
- Greiling D, Grüb B, Huber A (2015) Entwicklungslinien und Ansatzpunkte der Nachhaltigkeitsberichterstattung. *Z öffentl gemeinwirtsch Unternehmen* Beih 45:125–153
- GRI - Global Reporting Initiative (2013) G4 sustainability reporting guidelines : reporting principles and standard disclosures [online]. Zu finden in <<https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/GRIG4-Part1-Reporting-Principles-and-Standard-Disclosures.pdf>> [zitiert am 01.10.2015]
- GRI - Global Reporting Initiative (2015) About GRI [online]. Zu finden in <<https://www.globalreporting.org/information/about-gri/Pages/default.aspx>> [zitiert am 01.10.2015]
- Grüb B, Greiling D (2015) Motive der Nachhaltigkeitsberichterstattung in öffentlichen und erwerbswirtschaftlichen Unternehmen. *Z öffentl gemeinwirtsch Unternehmen* Beih 45:109–124
- Hartebrodt C, von Wedel K, Bitz S, Kennntner C (2009) Traditionelle und neue Berichtskonzepte in der Forst- und Holzwirtschaft. *Schweiz Z Forstwes* 160(2):37–46
- Herzogliche Kammer - Braunschweig / Herzogl Kammer Direction Forsten (1902) Mittheilungen über die Wirtschaftsergebnisse der Herzoglich Braunschweigischen Forstverwaltung für das Jahr 1900/01. Braunschweig : Buchdr Großen Waisenhauses, 44 p
- HGB (2015) Handelsgesetzbuch in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 4100-1, veröffentlichten bereinigten Fassung, das zuletzt durch Artikel 190 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist [online]. Zu finden in <<http://www.gesetze-im-internet.de/hgb/BjNR002190897.html>> [zitiert am 05.10.2015]
- Hickey GM, Innes JL, Kozak RA, Bull GQ, Vertinsky I (2005) Monitoring and information reporting for sustainable forest management : an international multiple case study analysis. *For Ecol Manage* 209(3):237–259
- IÖW - Institut für ökologische Wirtschaftsforschung und futue e. V. (2015) Ziele des IÖW/future Ranking [online]. Zu finden in <<http://www.ranking-nachhaltigkeitsberichte.de/ueber-das-ioewfuture-ranking/ziele-des-ioewfuture-rankings.html>> [zitiert am 01.10.2015]
- Krott M (2001) Politikfeldanalyse Forstwirtschaft : eine Einführung für Studium und Praxis. Berlin : Parey, 254 p
- Li N, Toppinen A, Tuppurä A, Puumalainen K, Hujala M (2011) Determinants of sustainability disclosure in the global forest industry. *Electr J Business Ethics Organization Stud* 16(1):33–40
- Meynhardt T (2008) Public value – oder: was heißt Wertschöpfung zum Gemeinwohl? *Moderne Staat* 1(2):457–468
- Moore MH (2003) The public value scorecard : a rejoinder and an alternative to “Strategic performance measurement and management in non-profit organizations” by Robert Kaplan [online]. Zu finden in <http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=402880> [zitiert am 01.10.2015]
- NW-FVA - Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (2014) Wir über uns [online]. Zu finden in <<http://www.nw-fva.de/index.php?id=10>> [zitiert am 01.10.2015]
- Oesten G, Roeder A (2012) Management von Forstbetrieben : Band I: Grundlagen, Betriebspolitik. Freiburg : Inst Forstekon , 383 p
- Papenfuß U, Grüb B, Friedländer B (2015) Nachhaltigkeitsberichterstattung öffentlicher Unternehmen : Entwicklung eines Qualitätsmodells und empirische Befunde für Stadtwerke im internationalen Vergleich. *Z öffentl gemeinwirtsch Unternehmen* Beih 45:171–187
- Rat für Nachhaltige Entwicklung (2015) Der DNK-Standard [online]. Zu finden in <<http://www.deutscher-nachhaltigkeitskodex.de/de/dnk/der-dnk-standard.html>> [zitiert am 01.10.2015]
- Redmann M, Dispan J, Held C, Lückge F-J (2010) Clusterstudie Forst und Holz Baden-Württemberg : Analyse der spezifischen Wettbewerbssituation des Clusters Forst und Holz und Ableitung von Handlungsempfehlungen [online]. Zu finden in <http://www.cluster-forstholz-bw.de/fileadmin/cluster/cluster_pdf/Clusterstudie_Forst_und_Holz_BW.pdf> [zitiert am 02.10.2015]
- Sproßmann H (2009) Staatliche Forstorganisation in Deutschland : Landesbetriebe und Anstalten d.ö.R. ersetzen die Regiebetriebe. *AFZ Wald* 64(19):1052–1055
- Stiftung Deutscher Nachhaltigkeitspreis (2015) Der Deutsche Nachhaltigkeitspreis will den gesellschaftlichen Wandel hin zu nachhaltigerem Wirtschaften und Leben fördern [online]. Zu finden in <<https://www.nachhaltigkeitspreis.de/home/preis/leitbild/>> [zitiert am 02.10.2015]
- Tzschupke W (2014) Staatsforstbetriebe 2013 mit leicht schlechteren Ergebnissen. *AFZ Wald* 68(23):14–17
- Vidal NG, Kozak RA (2008) The recent evolution of corporate responsibility practices in the forestry sector. *Int Forestry Rev* 10(1):1–13
- Waniczek M, Werderits E (2014) Sustainability balanced scorecard : Nachhaltigkeit in der Praxis erfolgreich managen – mit umfangreichem Fallbeispiel. Wien : Linde, 130 p

Inhalt

Content

- Dóra Szalay, Hitoshi Fujiwara, and Michael Palocz-Andresen
Using biodiesel fuel for gas turbine combustors
- 65 Einsatz von Biodieselskraftstoff für Gasturbinen
- Marcus Clauß
Particle size distribution of airborne micro-organisms in the environment – a review
- 77 Partikelgrößenverteilung von luftge-tragenen Mikroorganismen in der Umwelt – Ein Review
- Ulrich Dämmgen, Hans-Dieter Haenel, Claus Rösemann, Jim Webb, Wilfried Brade, and Ulrich Meyer
Modelling excretion rates of German dairy heifers
- 101 Modellierung der Ausscheidungs-raten deutscher Aufzucht-rinder
- Ralf Bussemas und Friedrich Weißmann
Zum Verhalten laktierender Sauen und zur Lebendmasseentwicklung der Ferkel in Einzel- oder Gruppenhaltung mit drei oder sechs Würfen im ökologischen Landbau
- Behaviour of lactating sows and live weight development of piglets in organic agriculture with regard to single housed vs. group housed sows by three or by six
- 119
- Elisabeth Kindler
Analyse zur erweiterten Nachhaltigkeitsberichterstattung deutscher Länderforstbetriebe
- 131 Analysis of extended sustainability reporting by state forestry services in Germany

Landbauforschung
*Applied Agricultural
and Forestry Research*

Herausgeber · *Editor*
Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

Vol. 65

No. 2 · 06.2015

Preis · Price 8 €

ISSN 0458-6859