

**Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn  
Landwirtschaftliche Fakultät**

The logo consists of the letters 'U', 'S', and 'L' in a stylized, hand-drawn font. The 'U' is green, the 'S' is black, and the 'L' is red. Below the letters are two parallel green diagonal lines.

---

**Lehr- und Forschungsschwerpunkt  
„Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“**

**Nr. 158**

**Tagungsband**

**23. Wissenschaftliche Fachtagung**

29. Januar 2009

**Klimawandel**

**– Konsequenzen für die landwirtschaftliche Nutztierhaltung –**

**Band 158**

der Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

**Herausgeber:** Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Meckenheimer Allee 172, 53115 Bonn  
Tel.: 0228 – 73 2285; Fax.: 0228 – 73 1776  
www.usl.uni-bonn.de

**Verantwortlich:** Prof. Dr. W. Büscher

**Verfasser:** W. Büscher, B. Feller, K. Holm-Müller, I. Perez, P. Regenhard, H. Sauerwein, C. Simmer

**Gefördert durch:** Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Bonn 2009

**ISSN 0943-9684**

**Konzept und redaktionelle Betreuung:** Dr. J. Busenkell

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
23. Wissenschaftliche Fachtagung	
<b>Klimawandel – Wahrnehmung, Beobachtungen und Modelle</b> Climate Change – Perception, Observations and Models C. Simmer	1
<b>Einbeziehung der Landwirtschaft in den Europäischen Emissionshandel für Klimagase – Auswirkungen auf Wohlfahrt und landwirtschaftliches Einkommen</b> Opt-in of the Agricultural Sector to the European Trading Scheme for Greenhouse Gas Emissions – Effects on welfare and agricultural income I. Perez und K. Holm-Müller	14
<b>Hitzestress – physiologische Auswirkung auf landwirtschaftliche Nutztiere</b> Heat stress – physiological effects in farm animals H. Sauerwein und P. Regenhard	24
<b>Stressminderung durch bauliche-technische Maßnahmen beim Rind</b> Stress reduction in dairy cow houses by technical and construction means W. Büscher	34
<b>Stressminderung durch Zuluftkonditionierung in der Schweinehaltung</b> Stress reduction in pig houses by inlet air conditioning B. Feller	43



## **Klimawandel –Wahrnehmung, Beobachtungen und Modelle**

Climate Change - Perception, Observations and Models

C. Simmer

### **Zusammenfassung**

In diesem Beitrag werden zunächst die Ursachen und Ausprägungen der anthropogenen Klimaänderungen erläutert. Die Qualität der globalen und regionalen Klimamodelle wird diskutiert im Lichte der beobachteten Änderungen der letzten 100 Jahre. Dabei wird insbesondere auf die aktuellen extremen Wetterereignisse, ihre Wahrnehmung in der Öffentlichkeit und ihr Bezug zu den Klimaänderungen eingegangen.

### **Abstract**

This contribution reviews some aspects of the observed climate change during the last 100 years. Also the relation between the recent extreme weather events and global warming often taken for granted in the public is discussed in the light of the basics of anthropogenic climate change. Finally, future climate projections and the capability of global and regional climate models to reproduce the past and present climate are summarized.

### **1 Einleitung**

Der Klimawandel ist heute in aller Munde. Der aktuelle, vierte Bericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (International Panel on Climate Change, IPCC) der Vereinten Nationen schätzt die beobachteten Klimaänderungen nunmehr als zweifellos vorwiegend menschengemacht ein. Auch die Politik reagiert mittlerweile national wie international und versucht Regelungen zu implementieren, die den Klimawandel eindämmen sollen. Was steckt hinter dem beobachteten Klimawandel, sind der Sommer 2003 und das Orkantief „Lothar“ die ersten Vorboten des Klimawandels auch bei uns? Im Folgenden werden die Grundlagen des anthropogenen Klimawandels erläutert und die Frage, inwieweit aktuelle Extremereignisse mit dem Klimawandel zusammenhängen, diskutiert. Es folgt eine Einschätzung der beobachteten Klimaänderungen der letzten ca. 100 Jahre, während denen der Übergang von weitgehend natürlichen Schwankungen des Klimasystems in das Zeitalter des vorwiegend von Menschen gemachten Klimawandels stattfindet. Danach werden die Grundlagen der globalen Klimamodelle und deren Leistungsfähigkeit erläutert. Dem schließt sich eine Betrachtung der Szenariensimulationen an, die für das Verständnis des Klimasystems entwickelt wurden und heute für Klimaprognosen – die Klimaforscher drücken sich vorsichtiger aus und sprechen lieber von Projektionen – verwendet werden. Abschließend werden Ergebnisse einiger Modellszenarien für die nächsten 100 Jahre vorgestellt und der heute mögliche räumliche Detaillierungsgrad durch das sogenannte Downscaling erläutert.

## 2 Ursachen des anthropogenen Klimawandels

Wetter und damit auch Klima auf der Erde werden maßgeblich durch die Strahlungsenergie der Sonne, genauer durch die Umwandlung dieser Energie in Wärme angetrieben. Durch die ungleiche Verteilung der Sonnenenergie über die Erde – die niederen Breiten erhalten mehr Sonneneinstrahlung als die hohen Breiten – kommt es zu Temperaturunterschieden. Die hieraus entstehenden Druckunterschiede treiben die Luftzirkulation an. Die Ozeane reagieren ähnlich, doch wird ein wesentlicher Teil der Meereszirkulationen durch die Atmosphärenbewegung über die Reibung angetrieben.

Der Mensch verändert das Klimasystem indem er in die Verteilung der Sonnenstrahlung und deren Umwandlung in verschiedene Wärmeenergieformen durch Modifikation der Erdoberfläche und der Zusammensetzung der Atmosphäre eingreift.

Seitdem der Mensch sich die Erde zunächst i.W. durch die Landwirtschaft im wahrsten Sinne des Wortes untertan gemacht hat, verändert er massiv die Oberfläche der Erde indem er die vorher bestehende Vegetation durch andere ersetzt und damit den Anteil der Sonnenenergie, der ungenutzt zurück in das Weltall reflektiert wird, beeinflusst. Mit großer Wahrscheinlichkeit hat sich hierdurch das Klima etwas abgekühlt, da beackelter Boden meistens heller als die Urvegetation ist und daher mehr Sonnenstrahlung reflektiert. Man sagt auch, er hat eine höhere Albedo<sup>1</sup>.

Durch den Ackerbau und insbesondere durch die Viehzucht hat der Mensch bereits früh, wenn auch in sehr geringem Maße, die Konzentrationen der natürlichen atmosphärischen Treibhausgase wie Methan und Lachgas erhöht und damit auch eine Erwärmung verursacht. Treibhausgase lassen das kurzwellige Sonnenlicht fast ungehindert durch die Atmosphäre durch, doch beeinflussen sie stark die sogenannte langwellige oder infrarote Strahlung, auch Wärmestrahlung genannt. Diese Strahlung wird von jeder Materie, also auch vom Erdboden und der Atmosphäre in Abhängigkeit von deren Temperatur abgestrahlt und auch wieder absorbiert. Je mehr Treibhausgase die Atmosphäre beinhaltet, desto mehr infrarote Strahlung absorbiert sie und – das ist das Wichtige – strahlt sie auch wieder aus. Wird also die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre höher, so gelangt mehr Wärmestrahlung von der Atmosphäre an die Erdoberfläche und erwärmt sie zusammen mit den bodennahen Luftschichten<sup>2</sup>.

Mit der fortschreitenden Industrialisierung hat ein anderes anthropogenes Treibhausgas - das Kohlendioxyd -, das durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle und Erdöl für die Energiegewinnung und den Transport entsteht, an Bedeutung gewonnen. Kohlendioxyd dominierte seit Jahrzehnten den Zuwachs an anthropogenen Treibhausgasen und auch die hierdurch generierte zusätzliche Erwärmung. Doch ziehen die von der Landwirtschaft erzeugten Treibhausgase durch die stark ansteigende Weltbevölkerung nach und könnten bald einen vergleichbaren

---

<sup>1</sup> Als Albedo bezeichnet man das Verhältnis von reflektierter zu eingestrahelter Strahlungsenergie. So hat Erde eine Albedo von ca. 30%. Für diese hohe Albedo sind aber mehr die Wolken verantwortlich als die Erdoberfläche.

<sup>2</sup> Der Begriff Treibhausgas ist eigentlich missverständlich. In einem Treibhaus entsteht nämlich die Erwärmung nicht hauptsächlich durch das Zurückhalten der Wärmestrahlung im Treibhaus oder durch die erhöhte Wärmestrahlung der Glaswände und des Glasdachs, sondern durch die Unterbindung des Luftaustauschs mit der Umgebung. Im Treibhaus wird es warm, weil die erwärmte Luft nicht wie draußen nach oben entweichen kann, sondern im Treibhaus verbleiben muss.

Effekt erzielen<sup>3</sup>. Schließlich wirkt auch die durch den Menschen erzeugte Luftverschmutzung auf die Sonnenstrahlung. Nicht nur durch die dabei entstehenden Aerosole<sup>4</sup> wird mehr Sonnenlicht zurück ins Weltall reflektiert (Kühlungseffekt) - sondern auch die Wolken werden heller und meistens langlebiger. Damit bleibt noch mehr Sonnenenergie ungenutzt und führt zu einer weiteren Abkühlung<sup>5</sup>.

Das Klima reagiert auf die Zunahme der Treibhausgase aber nicht einfach nur durch eine entsprechende großräumige Erwärmung. Es gibt eine Vielzahl von sogenannten Rückkopplungen im Klimasystem, die den Effekt dieser Änderungen modifizieren, sie regional verstärken oder abschwächen können. Gut bekannt sind die positiven, das heißt verstärkenden, Rückkopplungen mit dem Meereis. Nimmt dieses durch die Erwärmung ab, so wird zunehmend eine helle die Sonnenstrahlung zurückreflektierende Oberfläche durch die für die Sonnenstrahlung fast schwarze Meeresoberfläche ersetzt. Infolgedessen wird mehr Sonnenenergie aufgenommen und eine weitere Erwärmung des Klimasystems erfolgt. Bekannt ist auch, dass wärmeres Wasser weniger Kohlendioxyd aufnehmen kann und damit mehr davon als wirksames Treibhausgas in der Atmosphäre verbleibt. Auch negative Rückkopplungen sind in Aktion. Wenn durch den zunehmenden Wasserdampf auch mehr Wolken entstehen, so kommt es zu einer Stabilisierung, weil mehr Sonnenenergie durch die Wolken wieder zurückreflektiert wird. Hier muss man aber genauer hinschauen, um welche Wolken es sich hier handelt. Solange sie dünn bleiben und Sonnenlicht durchscheinen lassen, wie die Zirren, können sie noch effizienter als die Treibhausgase zu einer Erwärmung beitragen. Dieses ambivalente Verhalten der Wolken ist übrigens neben den indirekten Aerosoleffekten einer der größten Unsicherheitsfaktoren bei der Vorhersage des zukünftigen Klimas.

### 3 Sind extreme Wetterereignisse Anzeichen der Klimaänderung?

Nicht nur in den Medien werden extreme Ereignisse wie der Orkan „Lothar“, der extrem warme Sommer 2003 oder der heiße April 2007 oft fälschlicherweise als Anzeichen oder sogar Nachweis der fortschreitenden Klimaerwärmung deklariert. Solche extremen Wetter- oder Witterungs-

---

<sup>3</sup> Der stärkste Treibhauseffekt kommt übrigens nicht direkt durch die anthropogenen Treibhausgase, sondern indirekt durch die mit der Erwärmung der Luft einhergehenden Zunahme des Wasserdampfes, das ebenfalls ein Treibhausgas ist: Mit zunehmender Temperatur kann die Luft nämlich mehr Wasserdampf als Gas aufnehmen, und zwar exponentiell nach dem Gesetz von Clausius-Clapeyron. Die Atmosphäre hat die Eigenschaft durch das Zusammenspiel von Niederschlag und Verdunstung im Mittel ein in etwa konstantes Verhältnis von tatsächlichem und dem maximal möglichen Gehalt an Wasserdampf(gas) aufrecht zu erhalten. Man nennt dieses Verhältnis auch relative Feuchte.

<sup>4</sup> Als Aerosole bezeichnet man alle nicht gasförmigen Teilchen in der Atmosphäre, im Prinzip also alle Zusammenballungen von mehreren Molekülen. Man findet 1000–100.000 Aerosolpartikel in einem Kubikzentimeter; deren Größe schwankt zwischen 0,1 µm und 1 µm; ein µm ist ein Tausendstel Millimeter. Aber nur die größeren Aerosolpartikel können Wolkentropfen oder Eispartikel bilden.

<sup>5</sup> Die letzteren beiden Effekte nennt man den ersten und zweiten indirekten Aerosoleffekt. Wolkentropfen benötigen zur Entstehung immer ein Aerosolpartikel. Sind mehr von diesen Aerosolen in der Luft, so entstehen mehr Tropfen, d. h. das vorhandene Wolkenwasser verteilt sich auf viele kleine, anstatt auf wenige große Wolkentropfen. Wolken mit kleinen Tropfen reflektieren bei gleichem Wassergehalt aber mehr Sonnenstrahlung als Wolken mit großen Tropfen. Wenn die Wolken aber aus kleinen Tropfen bestehen, benötigen sie auch längere Zeit um zu Regentropfen anzuwachsen und auszuregen – die Wolke bleibt damit länger bestehen.

ereignisse<sup>6</sup> hat es jedoch immer schon gegeben. Einzelne für sich genommen können sie jederzeit wieder vorkommen. Klima ist die Statistik des Wetters und wird durch gemittelte Werte und Kenngrößen der Variabilität, am besten aber durch die Häufigkeitsverteilung<sup>7</sup> z. B. der Temperatur oder des Niederschlags charakterisiert und in der Regel über mindestens 30 Jahre, d. h. über eine Menschengeneration berechnet. Diese lange Mittelungszeit ist notwendig, weil der Klimazustand ganz natürlichen Schwankungen unterliegt, die durch die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlich schnell agierenden Teilen des Klimasystems (z. B. Ozean und Atmosphäre) verursacht werden können oder einfach ein Merkmal seines chaotischen Charakters sind. Selbst wenn alle Bedingungen, wie eingestrahelte Sonnenenergie oder Treibhausgaskonzentration konstant bleiben, schwankt der Zustand beträchtlich und das durchaus auch in langen Zyklen, die 10 Jahre und mehr andauern können – sogenannte dekadische Variationen.

Der Mensch hat kein Empfinden (Gespür) für das Klima – er empfindet nur das aktuelle Wetter. Seine Wahrnehmung des Wetters ist zudem maßgeblich durch seine (Außen)Aktivität bestimmt. So sind Behauptungen, dass z. B. früher mehr Schnee gefallen ist immer vor dem Hintergrund des Erzählenden zu bewerten. Dieser war damals möglicherweise ein kleines Kind, das vielleicht erstmals bis über seine Kinderknie im Schnee stehend von der weißen Landschaft überwältigt war und deshalb genau dieses Ereignis in sehr guter Erinnerung hat. Warum sollte er sich an die schneearmen oder sogar die schneefreien Winter erinnern, wenn da keine spektakulären winter-spezifischen Aktivitäten, wie Schlitten fahren, stattfanden?

Auch bei den im klimatologischen Sinne sicher repräsentativeren Jahresmitteltemperaturen muss man vorsichtig sein. An der Station Potsdam z. B. schwanken diese von Jahr zu Jahr quasi erratisch in einem Intervall zwischen 7 °C und fast 10 °C (°C = Grad Celsius). Die Abweichung vom langjährigen Mittel kann mal weniger als ein halbes Grad aber auch schon mal zwei Grad betragen. Extreme gab es zu jeder Zeit; so war die höchste Jahresmitteltemperatur im Jahr 1934 mit über 10 °C deutlich höher als in den letzten Jahren. Das Jahr 1940 dagegen war mit ca. 7 °C das kälteste Jahr, dicht gefolgt von 1996. Einzelne Jahre mögen auch aus ganz persönlichen Erfahrungen in besonderer Erinnerung sein und so Trends suggerieren. Tatsächlich ist die Jahresmitteltemperatur in Potsdam während der vergangenen 100 Jahre um ca. 1 °C, d. h. von ca. 8,1 auf 9,1 °C gestiegen, und dieser Anstieg ist auch im statistischen Sinne signifikant<sup>8</sup>. Dies wird aber erst deutlich wenn man versucht eine Gerade möglichst gut durch alle Punkte zu legen. Hätte man

---

<sup>6</sup> Unter Witterung versteht man ein über mehrere Tage bis Wochen andauerndes ähnliches Wetter.

<sup>7</sup> Eine Häufigkeitsverteilung erhält man, indem man die Messgröße, z. B. die Temperatur, in aufsteigende Klassen, z. B. in Grad Celsius Abständen, einteilt und dann zählt, wie häufig in einer Zeitreihe die einzelnen Klassen vorkommen.

<sup>8</sup> Statistische Signifikanz, ganz allgemein, ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Aussage die Wirklichkeit trifft. In unserem Fall lautet die Aussage (sogenannte  $H_0$ -Hypothese): Der Trend ist von Null verschieden und positiv. Die Signifikanz wird anhand von geeigneten statistischen Tests überprüft, denen - je nach der Fragestellung - verschiedene Häufigkeitsverteilungsfunktionen zugrunde liegen können. Die Tests erlauben eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für eine fälschlicherweise angenommene  $H_0$ -Hypothese. Sehr häufig wird - wie auch hier - die maximal zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit - auch Signifikanzniveau genannt - auf 5% gesetzt. Damit besteht eine Wahrscheinlichkeit von 95%, dass die Trends von Null verschieden und positiv sind. Eine 100%ige Sicherheit gibt es nicht, solange die Messungen nicht exakt auf der Trendanpassungslinie liegen.



eine deutlich kürzere Zeitreihe, so wäre vielleicht kein positiver Trend erkennbar, oder er wäre statistisch nicht signifikant oder sogar negativ.

Ein gutes Beispiel ist auch der Sommer 2003. In der Schweiz schwanken die Sommermitteltemperaturen der letzten 100 Jahre zwischen ca. 15 und 20 °C. Die Verteilung ist fast symmetrisch mit einem Mittelwert um die 17 °C. Der Sommer 2003 wies eine Mitteltemperatur von über 22 °C auf und lag somit weit außerhalb von der bislang höchsten Temperatur, die im Jahre 1947 mit knapp 20 °C erreicht wurde. In Anbetracht der bisherigen Temperaturen war die Sommertemperatur 2003 äußerst unwahrscheinlich. Statistisch gesehen kann sie aber durchaus alle paar hundert oder auch tausend Jahre vorkommen<sup>9</sup>, warum also nicht gerade 2003. Eine Klimaänderung kann man hier – so wie bei der Zeitreihe aus Potsdam - nur erkennen, wenn man einen Trend aus der gesamten Zeitreihe errechnet.

Eine Klimaänderung aus einzelnen extremen Ereignissen oder auch aus einer kurzen Reihe von Ereignissen abzuleiten ist falsch. Selbst 30jährige Beobachtungen dürfen aufgrund möglicher dekadischer Schwankungen des Klimasystems nicht als Grundlage für Klimatrendanalysen genommen werden, auch wenn sie statistisch signifikante Trends aufweisen sollten. Dennoch – und das zeigen eben die längeren Reihen - ist der Klimawandel, die globale Klimaerwärmung, real und in ihrem Umfang bedrohlich. Wenn auch die beobachteten Extremereignisse nicht als Vorboten des Klimawandels interpretiert werden dürfen, so können sie durchaus als Beispiele dienen, denn in einem sich ändernden Klima werden (die in der Vergangenheit und heute beobachteten) entsprechende Ereignisse an die sich verschiebenden Mittelwerte näher rücken und damit wahrscheinlicher und häufiger werden.

#### 4 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

In den 1980er Jahren warnten die ersten Wissenschaftler vor einer drohenden Klimaerwärmung durch das zunehmende Kohlendioxid in der Luft. Die Problematik wurde bald als so dringlich und für die Welt als so bedrohlich angesehen, dass die Vereinten Nationen (United Nations, UN) im Jahre 1988 das IPCC mit dem Auftrag gründeten, die publizierten wissenschaftlichen Arbeiten im Hinblick auf einen drohenden Klimawandel zu sichten und zu bewerten.

Im Jahre 1990 wurde dann der erste Sachstandsbericht (*First Assessment Report*, FAR) veröffentlicht. Hier wurde erstmals der Klimawandel festgestellt, doch konnte man den Menschen noch nicht als den wesentlichen Verursacher identifizieren. Somit wurden weitergehende Untersuchungen gefordert. Im zweiten Sachstandsbericht (*Second Assessment Report*, SAR), der 1995 veröffentlicht wurde, konnte sich das Autorenteam bereits auf die Formulierung einigen: „...*the balance of evidence suggests that there is a discernible human influence on global climate...*“ („...unter Abwägung aller Indizien gibt es einen merklichen Einfluss menschlicher Aktivitäten auf das globale Klima...“). Auf dieser Grundlage wurde im Jahre 1997 das Kyoto-Protokoll zur Reduktion des Kohlendioxydausstoßes formuliert. Der dritte Sachstandsbericht (*Third Assessment Report*, TAR) identifizierte dann im Jahre 2001 den Menschen als den wesentlichen Verur-

---

<sup>9</sup> Diese Wahrscheinlichkeit kann man aus dem mittleren Wert und der Variabilität der Temperaturen und der Annahme einer bestimmten Form der Häufigkeitsverteilung ableiten. Die beobachteten Temperaturen interpretiert man dabei als zufällig gezogene Sommertemperaturen aus einer unendlich lang gedachten Zeitreihe.

sacher des beobachteten Klimawandels. Diese Aussage wurde im bislang letzten, dem vierten Sachstandsbericht (*Forth Assessment Report*, AR4, 2007), weiter erhärtet, so wie auch die bislang gemachten Prognosen zum Ausmaß der Ausprägung des Klimawandels. Die Sachstandsberichte enthalten neben den wissenschaftlichen Grundlagen, zusammengestellt aus den begutachteten, in Fachzeitschriften veröffentlichten Beobachtungs- und Modellstudien, auch eine Zusammenstellung der erwarteten Folgen für z. B. Ökosysteme, Wasserknappheit etc. sowie Vorschläge zur Anpassung an den Klimawandel bis 2050 und für die Abmilderung des Klimawandels danach.

## 5 Anthropogene Einflüsse auf den Strahlungshaushalt der Erde

Wie oben erläutert, beeinflusst der Mensch das Klimasystem indem er an der Strahlungswirksamkeit verschiedener Komponenten des Klimasystems Veränderungen bewirkt. Diese Strahlungswirksamkeit wird quantitativ durch den sogenannten Strahlungsantrieb (*Radiative Forcing*, RF) ausgedrückt. Das RF bezeichnet die Änderung in der Strahlungsbilanz der Erdoberfläche, wenn man ausgehend vom ungestörten Klimasystem eine Veränderung im System – z. B. mehr Kohlendioxyd - anbringt. Die Strahlungsbilanz und die entsprechende Änderung werden dabei in Watt pro Quadratmeter ( $\text{W/m}^2$ ) angegeben.

Im Mittel ist die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche positiv mit ca.  $+100 \text{ W/m}^2$ , wenn man global und über einen langen Zeitraum (mehrere Jahre) mittelt<sup>10</sup>. Nach dem Stand von 2004 hat die anthropogene Zunahme des Kohlendioxyds seit der vorindustriellen Zeit das RF um ca.  $1,7 \text{ W/m}^2$  erhöht. Anthropogenes Methan und Lachgas, vorwiegend aus Landwirtschaft und Müllhalden entstammend, liefern weitere  $0,7 \text{ W/m}^2$ , die FCKWs<sup>11</sup> immerhin etwa  $0,3 \text{ W/m}^2$  und damit etwa soviel wie das RF des anthropogenen Ozons, das auch insgesamt als Treibhausgas wirkt. Unklar ist noch die Wirkung des sich aus anthropogenem Methan in der Stratosphäre gebildeten Wasserdampfs, der vermutlich mit ca.  $0,1 \text{ W/m}^2$  zu Buche schlägt. Das entspricht in der Größenordnung dann dem geothermischen Wärmestrom. Seit den 1970er Jahren hat sich die Strahlungswirksamkeit der Treibhausgase fast verdoppelt. Den größten absoluten Anstieg hat dabei das Kohlendioxyd, das zu ca.  $\frac{3}{4}$  zum RF der Treibhausgase beiträgt. Davon fallen wiederum ca. 80% auf die Verbrennung fossiler Energieträger und 20% auf die Abnahme der Biomasse z. B. durch die Abholzung von Wäldern.

---

<sup>10</sup> Die Erdoberfläche würde sich also alleine durch Strahlungseffekte ständig aufheizen und folglich immer wärmer werden. Dem ist natürlich nicht so, sondern diese „überschüssigen“  $100 \text{ W/m}^2$  werden in Form von Verdunstung (das ist der größte Teil) und Wärmeleitung in die Atmosphäre transportiert. Diese hat übrigens gerade ein Strahlungsbilanzdefizit von eben genau diesen  $100 \text{ W/m}^2$  und würde sich durch Strahlungseffekte alleine ständig abkühlen. So hat das System Erdoberfläche und Atmosphäre zusammengenommen im Mittel eine ausgeglichene Strahlungsbilanz. Das muss auch so sein sonst würde sich das Gesamtsystem ständig aufheizen oder abkühlen. Natürlich müsste man auch den geothermischen Wärmestrom aus dem Erdinneren und dessen Variationen mit einbeziehen. Doch ist dieser mit im Mittel  $0,06 \text{ W/m}^2$  (regional maximal etwa  $0,13 \text{ W/m}^2$ ) vergleichsweise gering (nach Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, siehe <http://www.lds-bb.de/cms/detail.php/lbm1.c.361609.de>).

<sup>11</sup> Fluorchlorkohlenwasserstoffe sind rein menschengemachte Stoffe, die auch für den Ozonabbau in der Stratosphäre mit verantwortlich sind.

Es wird geschätzt, dass die Änderungen der Albedo der Landoberflächen durch Landnutzungsänderungen zu einer Reduktion des RF von ca.  $-0,2 \text{ W/m}^2$  geführt haben. Der direkte Aerosoleffekt – also die Reflexion von Sonnenstrahlung durch die anthropogen verschmutzte Luft – wird mit  $-0,5 \text{ W/m}^2$  abgeschätzt, während die sekundären Aerosoleffekte durch die Wirkung des Aerosols auf Wolken sogar im Mittel mit  $0,7 \text{ W/m}^2$  angegeben werden. Die Aerosoleffekte sind aber extrem unsicher; sie könnten auch sehr viel kleiner oder mehr als doppelt so hoch sein.

Auch die Sonne hat ihre Strahlung über die letzten 100 Jahre verändert. Im Mittel hat die Sonnenstrahlung das RF um  $0,1 \text{ W/m}^2$  erhöht; doch ist auch dieser Wert relativ unsicher ähnlich wie der des Aerosols. Zählt man alle anthropogenen Einflüsse zusammen, so erhält man ein menschengemachtes RF von derzeit ca.  $1,6 \text{ W/m}^2$ , das aber eine große Unsicherheit beinhaltet; der reale Wert wird irgendwo zwischen  $0,6$  und  $2,4 \text{ W/m}^2$  vermutet. Diesem RF schreibt man nun den wesentlichen Teil der beobachteten Erwärmung der bodennahen Luftschicht um  $0,76 \pm 0,19$  Grad Celsius seit der vorindustriellen Zeit zu.

## 6 Der beobachtete globale Klimawandel

Aus den direkten Beobachtungen der letzten ca. 150 Jahre hat man den Gang der global gemittelten Lufttemperatur in zwei Meter Höhe abgeschätzt<sup>12</sup>. Diese Schätzung ist natürlich umso unsicherer, je weiter man zurück in der Zeit geht. Die zeitliche Änderung der Unsicherheit entsteht einerseits durch die Verbesserung der Messverfahren und andererseits, noch viel stärker, durch die Zunahme der Stationsdichte. Das Problem ist nicht trivial und erfordert ausgeklügelte geostatistische Verfahren, um aus den vergleichsweise wenigen Stationen z. B. im vorletzten Jahrhundert auf eine globale Mitteltemperatur zu schließen und dabei den Einfluss der Stationsdichte und -verteilung auf den Verlauf der Temperaturreihe auszuschließen.

Diese Temperaturkurve zeigt beträchtliche Schwankungen. Neben den Fluktuationen von Jahr zu Jahr bis zu  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  sind auch dekadische Schwankungen in der gleichen Größenordnung deutlich. Man kann etwa drei Abschnitte ausmachen: von 1850 bis 1910 ist kein klarer Trend auszumachen; die Werte schwanken um  $13,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . In den nächsten 30 Jahren steigt die Temperatur dann recht kontinuierlich um ca.  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  auf ca.  $14,1 \text{ }^\circ\text{C}$  an, gefolgt von einer Abkühlung um fast  $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$  über knapp 10 Jahre, um dann bis ca. 1970 vergleichsweise konstant bei  $13,9 \text{ }^\circ\text{C}$  zu bleiben. Danach steigt die Temperatur nahezu kontinuierlich wieder um  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  bis heute auf  $14,5 \text{ }^\circ\text{C}$  an.

Über den Anstieg 1910-1940 und den Abfall danach ist viel gerätselt worden. Aktuell werden schleichende Änderungen in der Beobachtungspraxis diskutiert. Es kann sich aber auch ganz einfach um eine außergewöhnliche dekadische Schwankung im Klimasystem handeln, wie es einige Wissenschaftler gestützt auf einer großen Anzahl von Klimamodellläufen vermuten. Solche Schwankungen können auch durch die Kopplung von Atmosphäre und Ozean hervorgerufen werden: ein aktueller Klimazustand prägt dem oberflächennahen Ozeanwasser charakteristische Temperaturen, Salzgehalte und auch Gehalte an Kohlendioxyd auf. Durch Abtauchen und Aufquellen von Ozeanwasser in Verbindung mit den recht verschlungenen im Vergleich zur Atmo-

---

<sup>12</sup> Zwei Meter ist die Höhe, in der nach einem Standard der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organisation, WMO), die auch maßgeblich das IPCC organisiert, die Lufttemperatur weltweit gemessen wird.

sphäre langsamen Ozeanströmungen können nach unterschiedlich langen Zeiträumen diese Wassermassen wieder an die Oberfläche gelangen und so die Atmosphäre und damit unser Klima wieder beeinflussen. Wichtig ist, dass wir solche Schwankungen immer erwarten müssen, d. h., dass ein möglicher markanter Rückgang der globalen Mitteltemperatur über eine Reihe von Jahren möglich, sogar wahrscheinlich ist und nicht im Widerspruch zu einer globalen anthropogen verursachten Erwärmung stehen muss.

Tatsache ist, dass die globale bodennahe Mitteltemperatur im statistischen Sinne über die letzten 150 Jahre signifikant zugenommen hat, und dass sich dieser Trend derzeit seit etwa den 1970er Jahren mit  $0,18\text{ °C}$  pro Dekade so hoch war wie noch nie. Wir werden später sehen, dass genau dieser Anstieg nach unserem derzeitigen Wissen nicht durch andere bekannte Ursachen, sondern durch menschliche Aktivitäten erklärbar ist. Die Erwärmung erfasst auch die höheren Schichten der Atmosphäre bis hinauf auf 10-20 Kilometer. Sie ist zumindest seit den 1970er Jahren bodennah und über den Kontinenten stärker als über den Ozeanen und in der Höhe, wie es auch die Klimamodelle nahe legen. Bedingt durch die komplexen Strömungen in Atmosphäre und Ozean gibt es erwartungsgemäß auch Gebiete, vor allem auf der Südhemisphäre, über denen die Temperatur leicht abgenommen hat.

Wie die Atmosphäre so wird auch der Ozean erwärmt und dehnt sich dabei aus. Seit der vorindustriellen Zeit hat sich die mittlere Meeresspiegelhöhe daher recht kontinuierlich um ca. 15 Zentimeter erhöht; davon geht nur ein sehr kleiner Teil auf das Konto von abschmelzendem Inlandeis. Die Schneedecke der Nordhemisphäre – hier liegen halbwegs verlässliche Messungen erst seit den 1920er Jahren vor - hat sich erst seit den 1980er Jahren um ca. 10% verringert, doch sind diese Messungen mit sehr großen Unsicherheiten verbunden. Mit der steigenden Atmosphärentemperatur erwartet man einen intensivierten Wasserkreislauf und damit auch zwangsläufig eine Erhöhung des Niederschlags. Leider ist der Niederschlag als Folge von Einzelereignissen eine höchst variable, insbesondere über den Ozeanen schwer messbare und daher global kaum sicher abschätzbare Größe. Über den Kontinenten überwiegen die Gebiete mit zunehmendem Niederschlag, doch die vorhandenen Zeitreihen zeigen sehr hohe Schwankungen von Jahr zu Jahr und hohe dekadische Variationen.

## **7 Der beobachtete Klimawandel über Zentraleuropa**

Der Trend der Jahresmitteltemperaturen für Deutschland zeigt naturgemäß mit bis zu  $\pm 2\text{ °C}$  viel stärkere Schwankungen von Jahr zu Jahr als die globale Mitteltemperatur. Dennoch ist ein Trend, der mit etwa  $0,9\text{ °C}$  (in Nordrhein-Westfalen übrigens mit  $1,1\text{ °C}$  noch etwas höher) während der letzten 100 Jahre über dem globalen Mittel (ca.  $0,75\text{ °C}/100\text{ Jahre}$ ) liegt, deutlich. Seit 1900 hat danach die Jahrsmittemperatur von ca.  $8\text{ °C}$  auf knapp  $9\text{ °C}$  zugenommen. Der deutliche Anstieg der globalen Mitteltemperatur zwischen 1910-1940 ist darin übrigens nicht abgebildet. Der Trend ist in allen Jahreszeiten positiv, doch nur im Sommer und Herbst wirklich signifikant. Insgesamt ist die Erwärmung im Südwesten deutlicher als im Nordosten des Landes.

Von einigen zentraleuropäischen Stationen sind auch längere Zeitreihen verfügbar. So folgen die Messungen der Stationen Prag, Wien, Berlin, München, Hohenpeißenberg und De Bilt seit 1850 den steigenden Tendenzen der globalen Mitteltemperatur. Bei den älteren Messungen an diesen Stationen – Berlin und De Bilt gehen zurück bis 1750 – sind Temperaturen aufgezeichnet worden

mit 30-jährigen Mittelwerten um 1800, die denen der 1990er Jahre nahe kommen. Sicher haben diese Messungen größere Unsicherheiten, doch mahnen solche Reihen vor einer Überinterpretation singulärer Ereignisse oder zu kurzen Messserien. Sie widerlegen aber nicht den quasi sicheren Befund, dass zumindest in den letzten 500 Jahren nie so hohe Temperaturen erreicht worden sind wie heute.

Der Jahresniederschlag hat in Deutschland in den letzten 100 Jahren um ca. 10 % zugenommen, doch ist dieser Trend aufgrund der hohen Variationen statistisch nicht signifikant. Dabei ist die Zunahme auf die westlichen und südwestlichen Gebiete beschränkt. Alle Jahreszeiten bis auf den Sommer weisen zunehmende Tendenzen auf. Recht ähnlich verhält es sich auch mit den Starkniederschlägen, die aufgrund einer noch zu geringen Zahl an verfügbaren Zeitreihen erst ab 1950 untersucht werden können. Vom Herbst bis zum Frühling sind laut eigenen Untersuchungen die 95-Perzentilwerte<sup>13</sup> leicht angestiegen, während in den Sommermonaten der Trend schwach nach unten geht und statistisch nicht signifikant ist. Eine regionale Differenzierung ist auf der Basis der vorhandenen Messungen nicht erkennbar.

## 8 Grundlage der Klimamodelle

Klimamodelle sind mathematisch-physikalische Beschreibungen unseres derzeitigen Wissens über die Prozesse, die das Klimasystem regulieren. Sie sind ursprünglich entwickelt worden, um unser Verständnis für das Klima zu verbessern. Die allermeisten dieser Modelle bauen auf Wettervorhersagemodellen der nationalen Wetterdienste auf. Klimamodelle simulieren so zunächst einmal hypothetische Wetterabläufe – Aussagen über das Klima und seine mögliche Entwicklung folgen dann aus der nachgeschalteten Analyse der erzeugten Zeitreihen, genau so wie aus den Beobachtungen. Im Unterschied zu den Beobachtungen enthalten die simulierten Daten Informationen über die gesamte Atmosphäre (und den Ozean) überall und zu jeder Zeit während des Simulationszeitraums.

Klimamodelle müssen, weil sie über viel längere Zeiten Wetter simulieren, im Vergleich zu Wettervorhersagemodellen vielfältige Wechselwirkungen des Klimasystems mit berücksichtigen. So können und müssen sich in einem Klimamodell die Ozeanoberflächentemperaturen ändern, die Eisbedeckungen der Pole zunehmen oder abnehmen können und die Vegetation auf zusätzliches Kohlendioxyd reagieren. Dies wird durch Kopplung des Atmosphärenmodells mit Teilmodellen, die das jeweilige Klimauntersystem (wie Ozean, Eis, Vegetation) physikalisch beschreiben, erreicht. Diese Wechselwirkungen sind für die Wettervorhersage irrelevant. Auch muss man sich viel genauer die numerischen Lösungsverfahren bei Klimamodellen anschauen, da kleine Unge-

---

<sup>13</sup> Zur Ermittlung des 95%-Perzentilwertes summiert man die Tagesniederschläge z. B. eines Jahres beginnend mit den niedrigsten Werten auf, bis man 95% des Jahresniederschlags erreicht hat. Der genau dann erreichte Tagesniederschlag in mm ist das 95%-Perzentil. Nimmt dieser zu während der Jahresniederschlag gleich bleibt, so nehmen Tage mit höheren Niederschlägen zu während solche mit niedrigeren Niederschlägen abnehmen - die Niederschläge werden extremer.

nauigkeiten, die beim Vorwärtsrechnen des Wetters über wenige Tage nicht auffallen, bei Simulationen über Jahre unangenehme Folgen haben können<sup>14</sup>.

Die notwendig langen Simulationszeiten bei Klimamodellen kann man noch nicht mit Gitterweiten von 10 Kilometer und darunter, wie sie heute bei Wettervorhersagen verwendet werden, realisieren. Daher muss man die Gitterweiten zurzeit noch auf über 100 Kilometer vergrößern, was natürlich die Qualität der simulierten Prozesse und die räumliche Auflösung der Ergebnisse beeinträchtigt. Dies wird teilweise durch Einsetzen von höher aufgelösten regionalen Modellen mit höheren Auflösungen über den interessierenden Gebieten kompensiert. Diese Regionalmodelle werden dann an den Rändern von den Ergebnissen eines globalen Klimamodells „angetrieben“; die Ergebnisse der Regionalmodelle wirken aber in der Regel nicht mehr auf das Globalmodell zurück. Man nennt diese Technik „Nesting“ und das Ergebnis dann „dynamisches Downscaling“. Alternativ gibt es auch das „statistische Downscaling“, das über raffinierte statistische Verfahren die Ergebnisse von den groben globalen Modellen direkt auf beliebig hohe Auflösungen interpoliert. Diese Verfahren müssen allerdings davon ausgehen, dass die statistischen Zusammenhänge, die aus der Gegenwart über den Vergleich zwischen Beobachtungen und Modellrechnungen abgeleitet werden, auch in einem veränderten Klima gelten.

Klimamodelle werden heute auch für Vorhersagen des Klimas der Zukunft verwendet. Dazu müssen aber Annahmen über Entwicklungen gemacht werden, die man heute noch nicht vorherhersagen kann. Dazu gehört z. B. der zukünftige Gehalt der Atmosphäre an den verschiedenen Treibhausgasen und Aerosolen sowie die Entwicklung der Rückstreuung der Landoberfläche durch die sich ändernde Landnutzung. All dies hängt von der Zunahme der Weltbevölkerung und davon ab wie sich die Weltwirtschaft, die Gesellschaft und die Technologie entwickeln. So gibt es eine ganze Palette von Annahmen – Szenarien genannt –, die von sehr optimistisch (Kohlendioxid ausstoß wird konstant gehalten) bis sehr pessimistisch (der beobachtete Zuwachs an Ausstoß nimmt ungebremszt zu) reichen. Die sogenannten A-Szenarien gehen von einer ökonomisch orientierten Weltwirtschaft aus, während die B-Szenarien eine mehr ökologisch orientierte Entwicklung annehmen. Die 1er Szenarien gehen von global homogenen Entwicklungen aus, die 2er Szenarien von regional differenzierten Entwicklungen. Die auf der Basis der unterschiedlichen Szenarien durchgeführten Klimasimulationen nennt man dann Klimaprojektionen, um deutlich zu machen, dass sie nur eine mögliche Entwicklung des Klimas beschreiben. Um den Einfluss der dekadischen Schwankungen in den Griff zu bekommen werden üblicherweise mehrere Läufe mit leicht unterschiedlichen Anfangs- und Randbedingungen gemacht – sogenannte Ensembles. Das IPCC analysiert dann auch viele verschiedene Modelle um den Einfluss unserer Unsicherheiten in der Modellierung der Prozesse zu quantifizieren.

---

<sup>14</sup> Allerdings verlängert sich durch die Verbesserung der Wettervorhersage zunehmend die Dauer für die Prognosen erstellt werden. Witterungsvorhersagen und Vorhersagen für Jahreszeiten sind in Zukunft möglich, was immer höhere Anforderungen an die Modelle stellt. Damit müssen auch immer mehr Komponenten des Klimasystems in Wettervorhersagemodellen berücksichtigt werden – Klima- und Wettervorhersagemodelle werden sich zunehmend ähnlicher. Diese Entwicklung fungiert unter der Bezeichnung *Seamless Prediction* (Nahtlose Vorhersage).

## 9 Globale Projektionen und Ergebnisse für Europa

Die optimistischsten Szenarien führen nach den Berechnungen der Klimamodellierer zu Erhöhungen der globalen Jahresmitteltemperaturen zwischen 1 und 2,8 °C (Mittel über alle für den letzten IPCC-Bericht vorliegenden Simulationen etwa 1,8 °C) in den kommenden 100 Jahren, während eine ungebremsste, ökonomisch bestimmte Entwicklung zu Erhöhungen zwischen 2 und 6 °C (Mittelwert bei etwa 4 °C) führen würde. Können wir diesen Prognosen vertrauen?

Ein notwendiger Test ist der Vergleich der Simulationen der Vergangenheit mit Messungen der Vergangenheit. Dabei darf man natürlich nicht erwarten, dass die Messungen selbst wieder gegeben werden. Dies würde implizieren, dass man eine Wettervorhersage über Jahre tatsächlich machen kann. Man muss aber verlangen, dass die simulierte Variation in Zeit und Raum den Beobachtungen entspricht. So kann die bekannte Kurve der Jahresmitteltemperaturen von einem Klimamodelllauf nicht explizit wiedergegeben werden, wohl aber die Schwankungsbreiten der Variationen von Jahr zu Jahr. Auch dekadische Schwankungen muss das Klimamodell in ihrer Statistik – aber eben nicht die genaue Abfolge – wiedergeben. Ein Klimamodell sollte auch die Jahreszeiten in den verschiedenen Regionen der Erde im Mittel reproduzieren sowie realistische Muster der Bewölkung und der Niederschläge liefern. Auch müssen bekannte Bewegungssysteme wie die ozeanischen Strömungen, die innertropische Konvergenzzone, die Monsune und die Tief- und Hochdruckgebiete der mittleren Breiten realistisch in ihren Strukturen und ihren Lebenszeiten simuliert werden.

Nur mit Klimamodellen sind wir letztlich in der Lage mit großer Sicherheit behaupten zu können, dass die beobachteten Trends im Klima hauptsächlich menschengemacht sind. So gibt es derzeit kein Klimamodell, das in der Lage ist die Zunahme der Temperatur der letzten Dekaden nachzuvollziehen, ohne die anthropogenen Emissionen zu berücksichtigen. Dies gilt nicht nur für die globale Kurve, sondern auch für die Verläufe der bodennahen Temperaturen über den einzelnen Kontinenten. Das heißt, dass die Zunahme der Treibhausgase und die anderen anthropogenen Einflüsse mit großer Sicherheit ursächlich für diesen Temperaturanstieg sind. Diskutieren ließe sich allenfalls, ob die menschlichen Aktivitäten alleine die Treibhausgaskonzentrationen erhöhen, oder ob andere natürliche Prozesse dies mitbewirken. Hier wurde aber bislang keine alternative Quelle nachgewiesen.

Die globalen Projektionen lassen spätestens für das Ende dieses Jahrhunderts drastische Klimaänderungen erwarten. Als sehr wahrscheinlich gelten danach z. B. für Europa weiter höhere Maximal- und Minimaltemperaturen, mehr Sommer- und Tropentage, intensivere ein- und mehrtägige Niederschlagsereignisse, mehr Hitzewellen, Dürre- und Nässeperioden und weniger Kälteperioden. Als wahrscheinlich gilt die Abnahme der Frosttage, die Zunahme tropischer Stürme und El Niño-ähnlicher Zirkulationszustände in den entsprechenden Gebieten. Die Zunahme der Intensität tropischer Stürme und auch Orkane wie „Lothar“ wird als möglich eingestuft.

Über Europa werden nach einem wahrscheinlichen Szenario die Temperaturen in den kommenden 100 Jahren um 2 bis 6 °C zunehmen; im Winter hauptsächlich im Nordosten des Kontinents, während im Sommer das Mittelmeergebiet extreme Erwärmungen zu erwarten hat. Der Niederschlag wird nördlich von 50° Nord um bis zu 20 % zunehmen und südlich davon in gleicher Weise wohl abnehmen. Im Sommer werden die Niederschläge überall bis auf Skandinavien abnehmen. Mit hochaufgelösten Regionalmodellen hat man auch die Tendenz der extremen Nieder-

schlagsereignisse über Mitteleuropa analysiert. Danach würden sich die beobachteten Trends für den Winter i.W. fortsetzen, d. h. etwas mehr Niederschlag und entsprechend auch mehr Extreme. Allerdings gibt es hier entgegen den Beobachtungen auch eine Tendenz zu leicht zunehmenden Extremen im Sommer.

Wie bisher werden wir in Europa in den kommenden zwei bis drei Dekaden kaum den Klimawandel „spüren“ können, da die normale Wetter- und Witterungsvariabilität diesen für unser Empfinden vollkommen verwischt. Das gilt nicht für andere Regionen der Erde wie z. B. Australien und Kanada, wo der Klimawandel bereits spürbar ist. Weitergehende räumliche Differenzierungen des Klimawandels z. B. für Deutschland sind derzeit nicht möglich. Verschiedene Methoden des Downscaling führen hier zu oft deutlich unterschiedlichen Ergebnissen im Betrag und der räumlichen Verteilung. Eine Extrapolation der beobachteten Trends erscheint derzeit mindestens genauso unzuverlässig.

## **10 Folgen des Klimawandels**

Der anthropogene Klimawandel ist nunmehr Gewissheit geworden. Ausschlaggebend waren dabei die Analyse von alten Klimabeobachtungen und ihre weitgehende Übereinstimmung im Trend mit den Klimamodellläufen, die anthropogene Antriebe berücksichtigen. Nach den Beobachtungen und den Klimaprojektionen sind Meeresspiegelanstieg, zunehmende Dürren und andere extreme Ereignisse wahrscheinliche bis praktisch sichere Folgen. Verursacher und Benachteiligte des Klimawandels sind dabei derzeit weitgehend disjunktiv. Ein aktives Reagieren des Menschen ist notwendig geworden, alleine um die anhaltenden Tendenzen abzumildern.

Das IPCC stellt auch fest, dass durch den Klimawandel viele natürliche Ökosysteme massiv beeinträchtigt und aus dem Gleichgewicht gebracht werden. Wahrscheinlich werden die Ökosysteme Mitte des Jahrhunderts ein Maximum an Kohlendioxid aufnehmen; danach wird dieses Potential stagnieren und schließlich abnehmen und die globale Erwärmung weiter verstärken. Es wird geschätzt, dass ca. 20-30% der bislang untersuchten Pflanzen- und Tierarten vom Aussterben bedroht sein werden. Insgesamt werden die Ökosysteme wahrscheinlich sehr verändert werden mit meist negativen Folgen für Biodiversität und Nahrungsmittelproduktion.

Die Nahrungsmittelproduktion wird wahrscheinlich zunächst leicht steigen, insbesondere in den mittleren und hohen Breiten aber danach wieder fallen. In den niedrigen Breiten wird die Nahrungsmittelproduktion schon bei geringen Temperatursteigerungen fallen. Global wird das Potential für Nahrungsmittelproduktion bei Erwärmungen zwischen 1-3 °C leicht steigen, darüber aber fallen.

Das IPCC mahnt aber auch zur Vorsicht bei seinen Schlussfolgerungen. So wird darauf hingewiesen, dass die vorhandenen Klimadaten geographisch nur sehr eingeschränkt vorliegen. Es sind kaum Messungen für die Entwicklungsländer vorhanden. Auch der Einfluss der Klimaänderungen auf Ökosysteme und Gesellschaft sind schwierig zu bewerten, da Rückkopplungen und andere Einflüsse schwer zu fassen sind. Die Emission von Kohlendioxid durch Landnutzungsänderungen ist weiterhin eine große Unsicherheitsquelle. Für eine zuverlässigere Analyse von Extremwerten und deren Trends werden mehr Daten und längere Zeitreihen angemahnt. Ein großes Problem besteht immer noch bei der regionalen Verteilung der Klimaeffekte auf Skalen kleiner als Kontinente.



## 11 Weiterführende Literatur

BACHNER S., KAPALA A. and SIMMER, C. (2007): Estimation of trends in rainfall extremes as important input parameters for flood risk assessment, in: Reducing the Vulnerability of Societies to Water Related Risks at the Basin Scale (Proceedings of the third International Symposium on Integrated Water Resources Management, Bochum, Germany, September 2006), *In: IAHS Publications* 317, 319-324.

BACHNER, S., KAPALA, A. and SIMMER, C. (2008): Evaluation of daily precipitation characteristics in the CLM and their sensitivity to parameterizations. *Meteorologische Zeitschrift*, im Druck.

CUBASCH, U. und KASANG, D. (2000): *Anthropogener Klimawandel*. Klett-Perthes Verlag, Gotha, Stuttgart, 128 S.

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Physical Science Basis*. Contribution of the Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S., D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of the Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E.Hanson, Eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.

STEHR, N. und VON STORCH, H. (2000): Von der Macht des Klimas. Ist der Klimadeterminismus nur noch Ideengeschichte oder relevanter Faktor gegenwärtiger Klimapolitik? *Gaia* **9**, 187-195.

VON STORCH, H. and STEHR, N. (2002): Towards a history of ideas of anthropogenic climate change. *In: Wefer, G., W. Berger, K.-E. and E. Jansen (Eds): Climate and history in the North Atlantic realms*. Springer Verlag, 17-23.

VON STORCH, H. and STEHR, N. (2006): Anthropogenic climate change - a reason for concern since the 18th century and earlier. *Geogr. Ann.*, **88** A (2), 107–113.

ZOLINA, O., KAPALA, A., SIMMER, C. and GULEV, S. (2004): Analysis of extreme precipitation over Europe from different reanalyses: A comparative assessment. *Global and Planetary Change*. **44**, 129-161.

ZOLINA, O., SIMMER, C., KAPALA, A., BACHNER, S., GULEV, S.K. and MÄCHEL, H. (2007): Seasonally dependent changes of precipitation extremes over Germany since 1950 from a very dense observational network, *J. Geophys. Res.*, **113**, D06110, doi:10.1029/2007JD008393.

Prof. Dr. Clemens Simmer

Meteorologisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Auf dem Hügel 20; 53121 Bonn

Email: [csimmer@uni-bonn.de](mailto:csimmer@uni-bonn.de)

Webseite: <http://www.meteo.uni-bonn.de/mitarbeiter/CSimmer/wiki/doku.php>

## **Einbeziehung der Landwirtschaft in den Europäischen Emissionshandel für Klimagase – Auswirkungen auf Wohlfahrt und landwirtschaftliches Einkommen**

Opt-in of the Agricultural Sector to the European Trading Scheme for Greenhouse Gas Emissions  
- Effects on welfare and agricultural income

I. Perez and K. Holm-Müller

### **1 Einleitung**

Im Dezember 2002 wurde das Kyoto Protocol offiziell von der EU unterzeichnet (COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION 2002). Hiermit verpflichtete sich die EU als ganzes zu bestimmten Emissionsreduktionen. Im Rahmen eines internen „Burden-sharing-Agreement“ wurden dann einzelne Emissionsverringerungsquoten für die Mitgliedsstaaten vorgesehen. In der Emissionshandelsdirektive etablierte die EU 2003 den Europäischen Emissionsrechtehandel, um das Emissionsziel ökonomisch effizient zu erreichen. (COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION 2003).

Der Emissionsrechtehandel umfasst vorgegebene Bereiche der Energie- und Industrieproduktion und gilt im Moment nur für CO<sub>2</sub>-Emissionen. Er legt ein einheitliches Regelwerk für den Handel über alle EU-Mitgliedsstaaten vor und erlaubt den freiwilligen Beitritt anderer Sektoren zu dem Emissionsrechtehandel. Für den Agrarbereich wird dies bereits in Australien und Kanada diskutiert (AUSTRALIAN GOVERNMENT 2007; CLIMATE CHANGE CENTRAL 2002).

Vor diesem Hintergrund haben wir in unserer Studie ein einfach durchführbares Emissionshandelssystem für den landwirtschaftlichen Sektor entwickelt und mit dem regionalen Agrarsektormodell CAPRI (vgl. BRITZ 2005) simuliert, welche Auswirkungen ein solcher Emissionsrechtehandel haben könnte.

Um in dem Modell Auswirkungen zeigen zu können, sind wir von einem 15% Emissionsvermeidungsziel für die Landwirtschaft ausgegangen. Zudem beziehen sich alle Berechnungen auf das Jahr 2001, um die Simulation nicht mit weiteren Unsicherheiten zu belasten. Wir vergleichen zwei Szenarien: (a) 15 % Emissionsreduktion in jedem Mitgliedsstaat, also eine Situation ohne Emissionshandel, und (b) eine 15 % Emissionsreduktion für die europäische Landwirtschaft insgesamt, also ein System mit Emissionshandel (vgl. PEREZ/HOLM-MÜLLER 2007).

Der Beitrag ist wie folgt gegliedert: Auf Abschnitt 2 zur Berechnung der Vermeidungskosten folgt im Abschnitt 3 eine kurze Charakterisierung des Emissionshandelssystem. Abschnitt 4 stellt dann die wichtigsten Resultate vor, bevor wir zu einer abschließenden Schlussfolgerung kommen.

### **2 Die Berechnung von Vermeidungskosten**

Bei der Berechnung von Vermeidungskosten haben wir alle Treibhausgase entsprechend der IPCC-Faktoren in CO<sub>2</sub>-Äquivalente ungerechnet. Als Vermeidungskosten für die Treibhausgase

haben wir in unserem Fall nur entgangenes Einkommen aufgrund einer Anpassung der Produktion ermittelt. Das heißt, der einzige Weg zur Emissionsvermeidung, den wir in unserem Modell zulassen, besteht in der Verringerung der emissionsintensiven Aktivitäten.

Tabelle 1: Rechenblatt für Anfangsemissionen

Nutzungsaktivität	Technologie	Emissionsfaktor pro Nutzungsaktivität		Messdaten-Einheit	Global-Warming-Parameter	Zahl der vergebenen/gebrauchten Emissionsrechte
		kg Gas pro ha, Kopf oder t		ha, Kopf oder t	Tonnen CO2 eq.	1 Recht = 1000 t CO2 eq.
		NO2	CH4			
<b>Weichweizen</b>	Hohe Düngergabe	3,5	0	100	108.500	109
	Niedrige Düngergabe	2,5	0	0	0	
<b>Milchproduktion</b>	Hohe Leistung	4	160	40	184.000	184
	Niedrige Leistung	3	100	0	0	
<b>Rindfleischproduktion</b>	normal	0,7	30	40	33.880	34
<b>Graslandnutzung</b>	normal	0,3	0	100	9.300	9
				Total	335.680	336

(Quelle: nach PEREZ, I. (2005): Greenhouse Gases. Seite 132.)

Der Grund für dieses Vorgehen liegt darin, dass die Aktivitätsdaten auch heute bereits gemeldet werden müssen und relativ gut kontrolliert werden können. Es war uns wichtig, keine größeren Transaktionskosten durch das System entstehen zu lassen. Für die Berechnungen wurde also davon ausgegangen, dass, wie in Tab. 1 dargestellt, die Emissionen eines Landwirtes aus der Multiplikation seiner Aktivitäten (z.B. 40 t Milch) mit dem IPCC-Emissionsfaktor pro Aktivitätseinheit in der jeweiligen Region errechnet werden können. Dabei variieren die regionalen Emissionsfaktoren stark aufgrund klimatischer, aber vor allem Haltebedingungen. So sind z. B. für Hochleistungskühe die Emissionskoeffizienten für Lachgas in Frankreich doppelt so hoch wie in Belgien (vgl. PEREZ 2005, S. 132).

Im nächsten Schritt haben wir für jede Region unterschiedliche Emissionsvermeidungsziele vorgegeben, um dann jeweils die Einkommensverluste, also die Vermeidungskosten zu berechnen. Dabei unterstellen wir, dass sich die Regionen mit ihrer Produktionsplanung optimal an die neuen Gegebenheiten anpassen. Aus der Zusammenführung der Berechnungen für die unterschiedlichen Vermeidungsvorgaben ergeben sich die in Abb. 1 dargestellten regionalen Vermeidungs- bzw. Grenzvermeidungskostenkurven.<sup>1</sup>

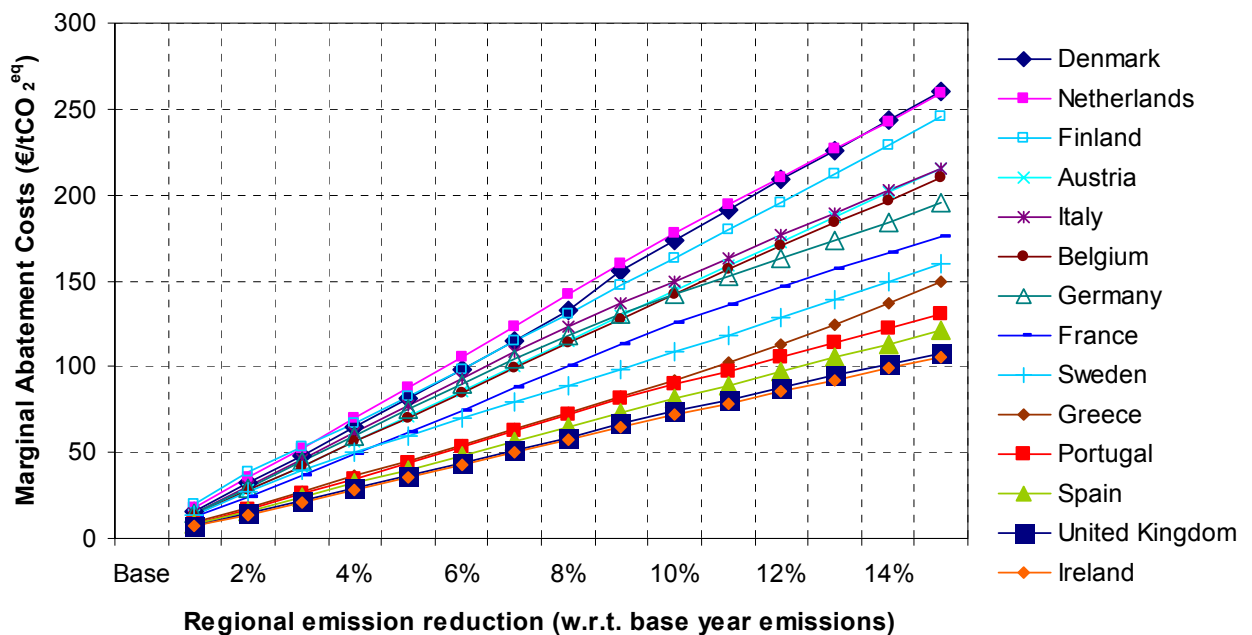


Abbildung 1: Grenzvermeidungskostenkurven für die EU 15 Mitgliedsstaaten (Quelle: eigene Berechnungen; verändert nach PEREZ, 2003; Jahr 2001; Luxemburg zusammen mit Belgien.)

Für eine 15 %-ige Emissionsreduktion variieren die GVK zwischen 105 € für Irland und 259 € für die Niederlande. Die hohen Werte für die Niederlande oder Dänemark werden durch die intensive Landwirtschaft mit hohem Mineralsdüngereinsatz und die große Bedeutung intensiver Rindermast verursacht.

Die hohen Unterschiede in den GVK für eine 15 %-ige Emissionsreduktion weisen bereits auf mögliche Vorteile bei einem Emissionshandel hin. Bei einem freien Handel werden nämlich Emissionsrechte gekauft, solange dies kostengünstiger ist als die Vermeidung einer weiteren Einheit, bzw. verkauft, solange eine weitere Vermeidung weniger kostet als der Preis, der für ein Emissionsrecht erzielbar ist. Es ergibt sich dann eine Situation, bei der die Vermeidungsniveaus der einzelnen Teilnehmer so angepasst werden, dass die Grenzvermeidungskosten aller Teilneh-

<sup>1</sup> Grenzvermeidungskosten sind die Kosten für eine weitere Reduktion der Emissionen um eine Einheit.

mer identisch sind. Dies ist gleichzeitig die Emissionsverteilung, bei der das vorgegebene Emissionsziel mit den geringsten Kosten erreicht wird.

### **3 Das Emissionshandelssystem**

In der Modellierung des Emissionshandels haben wir Handel nicht nur zwischen den Mitgliedsstaaten, sondern zwischen NUTS-2 Regionen zugelassen. Dabei sind wir davon ausgegangen, dass jede Region in der Ausgangssituation 85 % der Emissionen in 2001 als Emissionsrechte bekommt.

Wir sind weiterhin bei unseren Überlegungen davon ausgegangen, dass es eine zentrale Datenbasis und eine Stelle geben muss, an der die Käufe und Verkäufe von Rechten nachgehalten werden müssen. Wir schlagen vor, die Kosten für ein solches System als Aufschlag auf jede Transaktion zu verteilen. Dies führt zu einem leichten Auseinanderfallen von Kauf- und Verkaufspreis, die eine 100 %-ige Minimierung der Emissionsvermeidungskosten verhindern werden. Von Sanktionen bei Nicht-Einhaltung der Emissionsgrenzen sehen wir in unserem Modell ab, da sie eine Obergrenze für den Emissionsrechtspreis darstellen, und unterstellen stattdessen die vollständige Erfüllung aller Verpflichtung durch die Teilnehmer am Emissionssystem.

### **4 Ergebnisse**

Wie bereits erwähnt, haben wir für unsere Ergebnisse angenommen, dass jede Region entweder ein Niveau von 85 % der 2001- Emissionen erreicht oder im zweiten Fall ausgehend von dieser Ursprungsverteilung der Emissionsrechte Rechte kaufen bzw. verkaufen kann. Weiterhin haben wir zuerst unterstellt, dass die Preise für die einzelnen Güter unverändert bleiben. Dies gibt dann Aufschluss über die Vermeidungskosten, die sich aus dem Emissionsziel ohne Handel ergeben, und die Verringerung der Vermeidungskosten, die sich durch den Emissionsrechtehandel erreichen lässt. In einem zweiten Schritt haben wir zugelassen, dass die Preise variieren. Die dann ausgewiesenen Einkommensänderungen für Landwirte berücksichtigen bereits die Überwälzungsmöglichkeiten zusätzlicher Kosten auf die Konsumenten.

Tabelle 2 zeigt die Vermeidungskosten und den Umfang an Zu- und Verkäufen, der sich dabei ergibt.

Tabelle 2 : Einkommenseffekte ohne Preisanpassung (Mio €)

	85% Emissionsstandard			85% Emissionsstandard + Handel (2001)		
	Landwirtsch. Einkommens- änderung <sup>1</sup>	Erlöse/ Kos- ten des E- missions- Handels	Totale Ein- kommens- änderung	Vermeidungs- kosten- reduktion	Erlöse/ Kos- ten aus E- missions- Handel <sup>2</sup>	Netto- Kosten- reduktion <sup>3</sup>
Europäische Union	-5920,67	0	-5920,67	630,67	-66,6	564,06
Belgien	-108,34	0	-108,34	48,01	-44,4	3,61
Dänemark	-261,73	0	-261,73	95,92	-75,7	20,27
Deutschland	-1412,37	0	-1412,37	412,46	-274,7	137,72
Österreich	-174,13	0	-174,13	49,53	-38,6	10,89
Niederlande	-356,64	0	-356,64	148,43	-126,6	21,83
Frankreich	-992,78	0	-992,78	238,91	181,2	57,71
Portugal	-9,21	0	-9,21	-20,70	24,5	3,79
Spanien	-565,27	0	-565,27	-192,24	253,3	61,06
Griechenland	-215,54	0	-215,54	-4,26	7,7	3,44
Italien	-836,80	0	-836,80	254,85	-194,4	60,45
Irland	-143,11	0	-143,11	-134,15	166,9	32,76
Finnland	-111,00	0	-111,00	34,16	-31,9	2,22
Schweden	-175,07	0	-175,07	2,19	-0,9	1,25
Groß Britan- nien	-558,67	0	-558,67	-302,42	449,5	147,08

(Quelle: eigene Berechnungen nach PEREZ 2005, Seite 147. Luxemburg zusammen mit Belgien.)

<sup>1</sup> Differenz zwischen dem vorangegangenen Einkommen im Basis Jahr 2001: keine Emissionsrestriktionen (in Mio. €)

<sup>2</sup> Differenz zwischen dem vorangegangenen Einkommen im 85 % Emissionsstandard (in Mio. €).

<sup>3</sup> Das totale Einkommen ist gleich dem landwirtschaftlichen Einkommen (von den regionalen Angebots-Modellen) plus Ertrag minus Kosten des Emissions-Handels

Die ersten drei Spalten zeigen den Fall ohne Handel. Alle Mitgliedsländer haben hier im Vergleich zur Situation ohne Umweltpolitik Einkommensverluste hinzunehmen (zwischen 1412 €

Mio. in Deutschland und 9 € Mio. in Portugal). Die Unterschiede folgen unmittelbar aus den Vermeidungskosten der Regionen.

Wenn ein Emissionsrechtehandel zwischen den Nuts 2 Regionen eingeführt wird, verringern sich die Einkommensverluste für alle Mitgliedsstaaten. Im Vergleich zum Fall ohne Handel erhöht sich das Gesamteinkommen in der EU-15 um 630 € Mio., von denen allerdings Transaktionskosten abgezogen werden müssen (66 € Mio.). Die Veränderungen für die einzelnen Mitgliedsstaaten sind teilweise dramatisch. So übernimmt Großbritannien zusätzliche Emissionsvermeidungskosten von 302 € Mio., für die es aber Verkaufserlöse von knapp 450 € Mio. erzielen kann, wodurch es seine gesamten Einkommensverluste um 147 € Mio. reduziert. Deutschland verringert durch den Kauf von Emissionsrechten seine Kosten von 1412 € Mio. auf 1274 € Mio.

Für die zweiten Berechnungen wurde das Modell nur insofern verändert, dass die Preise jetzt modellendogen bestimmt werden. Wieder vergleichen wir für eine 15 %-ige Emissionsreduktion die Situationen mit und ohne Handel. Die Tabelle 3 zeigt die Veränderungen der Erzeuger- und Handelspreise für ausgewählte Erzeugnisse.

Tabelle 3: Preisanpassungen

	SIM1: 85-STD (2001)		SIM 3: 85-TRD (2001)	
	Konsumentenpreis	Produzentenpreis	Konsumentenpreis	Produzentenpreis
<b>Weichweizen</b>	0,80%	15,57%	0,79%	15,25%
<b>Körnermais</b>	0,17%	2,81%	0,16%	2,71%
<b>Zucker aus Rüben*</b>	--	8,81%	--	8,38%
<b>Roggen</b>	0,7%	19,66%	0,68	19,29%
<b>Kalbsfleisch</b>	45,54%	99,36%	44,13%	97,63%
<b>Schweinefleisch</b>	42,47%	100,13%	41,18%	98,29%
<b>Kuh- und Büffel- milch*</b>	--	2,48%	--	2,60%

(Quelle: eigene Berechnungen, nach PEREZ 2005; Differenz zu den Preisen des Ausgangsszenarios)

\* Die Herstellung dieser Produkte ist im Modell enthalten.

Die Preiseffekte resultieren aus den Marktbarrieren, mit denen die EU ihre Agrarmärkte immer noch abschottet. Insbesondere Zollquoten für Getreide und Rindfleisch bestimmen die Modellergebnisse. Damit können Importe den Rückgang der heimischen Produktion nicht auffangen. Dies führt zu den Preissteigerungen und trotz eines Rückganges der Produktion zu einer Zunahme der landwirtschaftlichen Einkommen, die für Veredelungsbetriebe mit etwa 70 % (44 % beim Rind) besonders stark ausfällt.

Tabelle 4: Auswirkungen auf das landwirtschaftliche Einkommen

	SIM 1: 85-STD (2001)				SIM 3: 85-TRD (2001)			
	Erlöse	Kosten	Prämien	Einkommen	Erlöse	Kosten	Prämien	Einkommen
Getreide	9,14%	-1,45%	3,42%	11,30%	9,58%	-1,38%	3,63%	11,80%
Ölsaaten	10,53%	-1,99%	0,53%	11,18%	11,18%	-1,73%	0,96%	11,91%
Andere Kulturpflanzen	4,96%	1,23%	1,62%	5,53%	5,08%	1,59%	1,06%	5,50%
alle Rindvieh-Aktivitäten	92,86%	51,75%	4,83%	144,03%	95,95%	57,94%	2,69%	141,36%
Fleisch Aktivitäten	115,40%	70,25%	12,58%	171,08%	118,54%	77,69%	11,89%	157,88%

(Quelle: Quelle: PEREZ, I. (2005): Greenhouse Gases. Seite 158. Auswahl.)

Die höheren Preise werden von den Konsumenten gezahlt, die damit die Hauptlast der Emissionsminderung tragen. Ihre Kosten sinken durch die Einführung des Emissionshandels parallel zu den Vermeidungskosten. Auf Grund der für 2001 geltenden produktorientierten Stützungsmaßnahmen in der Agrarpolitik sinken in unserem Modell die Kosten der öffentlichen Haushalte durch die gesunkenen Produktionsmengen. Demzufolge steigen sie beim Emissionshandel auch wieder leicht an. Tabelle 4 fasst die wichtigsten wohlfahrtsrelevanten Daten zusammen.

## 5 Zusammenfassung und Diskussion

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Zulassung eines Emissionsrechtehandels die Kosten für eine signifikante Verringerung der Treibhausgase erheblich reduzieren kann. Das vorgeschlagene System sollte zu erträglichen Transaktionskosten implementierbar sein, da die notwendige Information bereits in den Daten enthalten ist, die jeder Landwirt bereitstellen muss, um Beihilfen zu erhalten. Außerdem haben die Landwirte z. B. durch die Milchbörse bereits Erfahrung mit ähnlichen Instrumenten.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis der Studie ist, dass unter der geltenden Agrarpolitik, die den europäischen Agrarmarkt immer noch weitgehend vor Importen schützt, Emissionsreduzierung nicht zu einer Nettoeinkommensverringerung für die Landwirte führt. Die Hauptlast der Emissionsreduzierung wird deshalb im heutigen System durch höhere Preise von den Konsumenten



getragen. Für sie ist es deshalb von besonderer Wichtigkeit, Kosten der Emissionsvermeidung durch eine gleichzeitige Einführung eines Emissionsrechtehandelssystem möglichst niedrig zu halten.

Ein Problem des in der Studie angenommenen Emissionshandels ist, dass er nur eine einzige Art der Emissionsvermeidung zulässt, nämlich eine Verringerung der mit Emissionen verbundenen Aktivität. Dies ist aus mehreren Gründen sehr unbefriedigend. Zuerst einmal führt es dazu, dass andere Möglichkeiten der Emissionsreduktion, wie z. B. Gülle-Management oder Variationen in der Fütterung, vom System nicht honoriert werden, so dass ihre Einführung unter Umständen unterbleibt. Dies führt weiter dazu, dass das Emissionsziel unnötig teuer erreicht wird, denn technologische oder organisatorische Maßnahmen unterbleiben auch dann, wenn sie günstiger sind als die Verringerung der schädigenden Aktivität.

Der Emissionshandel in der Industrie erfasst CO<sub>2</sub>-Emissionen und Emissionsvermeidungen sehr viel genauer. Der Grund dafür liegt darin, dass es bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Landwirtschaft um nicht punktförmige Emissionsquellen handelt (sogenannte non-point sources). Klima-relevante Emissionen der Landwirtschaft sind zudem neben CO<sub>2</sub> Lachgas und Methan, die eine erhebliche Klimawirkung aufweisen und auch nicht punktförmig anfallen. Es gibt keinen Schornstein, an dem man die Emissionen aus z. B. Kuh- oder Schafsmägen messen könnte. Zudem gibt es auch keinen Inputstoff wie z. B. Mineralöl, aus dem man mit hinreichender Genauigkeit auf die klimarelevanten Emissionen schließen kann. In der Landwirtschaft wird der Kohlenstoff in erster Linie von den Pflanzen über die Luft direkt oder von den Tieren über das Futter aufgenommen, während er in der Industrie und z. B. dem Verkehr über Mineralöl/Kohle, also fossile Kohlenstoffsenken, bezogen wird.

Damit muss die Erfassung von Emissionen und Emissionsminderungen der Landwirtschaft notwendigerweise sehr viel ungenauer ausfallen, als dies im Industriebereich der Fall ist. Eine direkte Messung kommt nicht in Frage. Dennoch ist zu überlegen, ob es nicht möglich ist, die Anwendung bestimmter Maßnahmen pauschal zu honorieren, um die richtigen Anreize zu setzen und die Emissionsvermeidung nicht teurer als notwendig zu machen. Dies konnte in unserer Studie jedoch nicht berücksichtigt werden.

Eine weitere Änderung in den Modellergebnissen würde resultieren, wenn wir einen Emissionsrechtehandel zwischen der Landwirtschaft und anderen volkswirtschaftlichen Sektoren zulassen. Angesichts der relativ hohen Grenzvermeidungskosten in der Landwirtschaft ist für diesen Fall anzunehmen, dass Emissionsrechte in den landwirtschaftlichen Sektor wandern, so dass dort weniger Emissionen als geplant vermieden werden, und gleichzeitig die Emissionsanstrengungen in den anderen Sektoren zunehmen, da diese ungenutzte Rechte an die Landwirtschaft verkaufen können. Insgesamt würde dieser intersektorale Handel zu einer weiteren Reduktion der Gesamtvermeidungskosten führen. Die Preissteigerungen in der Landwirtschaft dürften in diesem Fall ebenso wie die Reduzierung der produzierten Mengen sehr viel geringer ausfallen. Was dies für das landwirtschaftliche Einkommen bedeutet, kann an dieser Stelle jedoch nicht gesagt werden.

Aus dem Gesagten folgt, dass die oben erwähnten Ergebnisse unserer Studie Modellergebnisse sind und bleiben. Sie sind abhängig von der Agrarpolitik, aber auch von dem zugrundeliegenden System eines Emissionsrechtehandels. Unabhängig davon gilt, dass ein Emissionsrechtehandel die Vermeidungskosten stark senken kann, dass aber von den Vermeidungskosten nicht unmittel-

bar auf eine Verringerung der landwirtschaftlichen Einkommen geschlossen darf. Wie sich diese verändern, hängt in erster Linie davon ab, inwieweit es den landwirtschaftlichen Produzenten gelingt, zusätzliche Kosten auf die Konsumenten abzuwälzen.

### **Literaturverzeichnis**

AUSTRALIAN GOVERNMENT (2007): Agriculture, forestry and emissions trading: how do we participate?

([http://products.lwa.gov.au/downloads/publications\\_pdf/ER071301.pdf](http://products.lwa.gov.au/downloads/publications_pdf/ER071301.pdf), 25.7.2007).

BRITZ, W. (2005): CAPRI Modelling System Documentation

(<http://www.agp.uni-bonn.de/agpo/rsrch/capri/capri-documentation.pdf>, 25.7.2007).

CLIMATE CHANGE CENTRAL (2002): A Basis for Greenhouse Gas Trading in Agriculture. Final Report of the Emission Reduction Trading Protocol Team

([http://www.climatechangecentral.com/resources/discussion\\_papers/basis\\_for\\_grnhse\\_trading.pdf](http://www.climatechangecentral.com/resources/discussion_papers/basis_for_grnhse_trading.pdf), 25.7.2007).

COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION (2003): Council Directive 2003/87/EC establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC. Official Journal of the European Communities. **L275**.

PEREZ, I. (2003): Modelling of Passive Environmental Indicators for the European Agriculture: The Role of Marginal Abatement Costs. Paper presented at the 12th Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists (EAERE), Bilbao, Spain.

PEREZ, I. (2004): Europaweite Reduktion des Ausstoßes klimarelevanter Emissionen durch handelbare Emissionsrechte. Eine Analyse mit dem regionalisierten Agrarsektormodell CAPRI. Paper presented at the Conference of the German Association of Agricultural Economists (GeWiSoLa), Hohenheim, Germany.

PEREZ, I. (2005): Greenhouse Gases: Inventories, Abatement Costs and Markets for Emission Permits in European Agriculture. A Modelling Approach. Frankfurt a. M.: Peter Lang.

PEREZ, I.; HOLM-MÜLLER, K. (2007): Opt-in of the agricultural sector to the European trading scheme for greenhouse gas emissions – a proposal and its possible effects. *Agrarwirtschaft* **56**: 354-365.

PEREZ, I.; WIECK, C. (2004): Welfare Distribution between EU Member States through different National Decoupling Options - Implications for Spain. Paper presented at the V Congreso Nacional de Economía Agraria, Santiago de Compostela, Spain.

---

**Kontakt**

Dr. Ignacio Pérez Domínguez

Agriculture and Life Sciences in the Economy, European commission; Directorate-General – Joint Research Center, Institute for Prospective Technological Studies.

Edificio EXPO – Calle Inca Garcilaso s/n – 41092 Sevilla, Spain.

Tel: +(34)-954048535

Fax: +(34)-954488434

e-mail: Ignacio.perez-dominguez@ec.europa.eu

Prof. Dr. Karin Holm-Müller

Institut für Lebensmittel und Ressourcenökonomik

Professur für Umwelt- und Ressourcenökonomik

Nussallee 21; 53115 Bonn

Tel.: 0228/73-2333

Fax: 0228/73-5923

e-mail: karin.holm-mueller@ilr.uni-bonn.de

## **Hitzestress – physiologische Auswirkungen auf landwirtschaftliche Nutztiere**

Heat stress – physiological effects in farm animals

H. Sauerwein und P. Regenhard

### **Zusammenfassung**

Die Prognosen über den Klimawandel lassen eine erhöhte Hitzebelastung auch von landwirtschaftlichen Nutztieren erwarten. Als Warmblüter müssen diese ihre Körperkerntemperatur unabhängig von der Umgebungstemperatur konstant halten. Zwar ist innerhalb der Zone thermischer Neutralität keine aktive Thermoregulation notwendig, bei erhöhten Umgebungstemperaturen, die zudem noch gekoppelt sind mit hoher Luftfeuchtigkeit, können landwirtschaftliche Nutztiere trotz ihrer Gegenregulation auch bei den hierzulande gemäßigten klimatischen Bedingungen schnell in eine Hitzestresssituation geraten. Die dann erforderliche Abgabe von Wärme an die Umgebung erfolgt durch regulative Mechanismen wie Strahlung, Leitung, Konvektion und Verdunstung. Da für diese Mechanismen neben der Umgebungstemperatur auch die Luftfeuchtigkeit von Bedeutung ist, wurden zur Beurteilung der aktuellen Belastungssituationen diverse Temperatur-Luftfeuchte-Indices (THI) für die Tierhaltung entwickelt. Die Fähigkeit sich akuten und chronischen Hitzebelastungen anzupassen, ist u. a. vom aktuellen physiologischen Status, von der Höhe der Leistung, und somit auch von genetischen Faktoren abhängig. Hitzestress-bedingte Effekte auf Leistung und Gesundheit zeigen sich bei landwirtschaftlichen Nutztieren als geringeres Wachstum, niedrigere Milchleistung, reduzierte Immunabwehr, beeinträchtigte Verdauungsfunktionen und verminderte Fruchtbarkeit.

### **Summary**

The prognoses about climate change indicate increased periods of heat stress for all species, including livestock. As homoiotherms, they need to keep their core body temperature constant independent of environmental temperature. Active thermoregulation is not necessary within the thermoneutral zone; when the surrounding temperature and the humidity increase, livestock animals as other animals and man may experience situations of heat stress even in moderate climatic conditions. Heat loss is mediated via radiation, conduction, convection, and evaporation. Many Temperature Humidity Indices (THI) combining different environmental factors were developed to evaluate the intensity of heat stress. The ability of animals to adapt to acutely or chronically high surrounding temperatures depends, among others, of the actual physiological status, of performance and thus also of genetic factors. The effects of heat stress on performance and health of livestock comprise decreased growth rates and milk yield, compromised immune defense, indigestion, and impaired fertility.

## **Einführung**

Der kürzlich erschienene Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) mit dem Titel „Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability“, der von einer Arbeitsgruppe erstellt wurde, in der viele weltweit anerkannte Klimatologen mitwirken (Arbeitsgruppe II), macht deutlich, dass der Klimawandel bereits weit reichende Wirkungen beispielsweise auf Menschen, Ökosysteme und Wasserressourcen hat. Diese Wirkungen werden sich mit einem weiteren Temperaturanstieg intensivieren. Eine Stabilisierung des weltweiten Temperaturanstiegs auf höchstens 2°C über dem vorindustriellen Niveau könnte unumkehrbare und potenziell katastrophale Änderungen des Weltklimas wie das Abschmelzen des Grönlandeises verhindern, kann aber nicht alle Folgen aufhalten. Der Bericht ist der zweite von drei Teilen des 4. Evaluierungsberichts des IPCC. Er bestätigt die wesentlichen Feststellungen des 3. Evaluierungsberichts aus dem Jahr 2001, enthält jedoch zahlreiche neue Erkenntnisse aus neuen Beobachtungen und besseren Modellen. Demnach wirkt sich der jüngste Klimawandel weltweit bereits stark auf die Ökosysteme, Wasserressourcen und Küstengebiete aus. Einige beobachtete Wirkungen traten früher ein als erwartet. Mensch und Tier sind beispielsweise durch zunehmenden Wassermangel, höhere Sterblichkeitsraten bei Hitzewellen, eine Veränderung der Verbreitungsgebiete der durch Überträger verbreiteten Krankheiten, die Gefährdung der heimischen Existenzsicherung und eine höhere Waldbrandgefahr betroffen. Dabei können viele der beobachteten Wirkungen des jüngsten Klimawandels nun den anthropogenen Treibhausgasemissionen zugeschrieben werden. Durch den künftigen Klimawandel steigt in vielen Gegenden die Dürre- und Hochwassergefahr, die Wasserressourcen in semiariden und ariden Gebieten nehmen ab, das Überleben zahlreicher Küstensiedlungen in der ganzen Welt wird bedroht, ein weit verbreitetes Artensterben setzt ein, die Ernteerträge in den meisten Tropengebieten nehmen ab und das Hungerrisiko steigt. Die künftigen klimatischen Veränderungen führen u. a. zu einer deutlichen Zunahme des Wasserstress in Mittel- und Südeuropa sowie zu klimaabhängigen Gesundheitsrisiken aufgrund von Hitzewellen (zusammengefasst nach IPCC 2007).

## **Grundlagen der Thermoregulation**

Vor dem Hintergrund abnehmender Wasserressourcen und steigenden Temperaturen ergeben sich auch für die Haltung von landwirtschaftlichen Nutztieren entsprechende Konsequenzen, die auch nicht auf die Tropenregionen und aride bzw. semiaride Gebiete beschränkt bleiben werden. Im Folgenden sollen deshalb die physiologischen Reaktionen von Nutztieren auf Hitzestress näher beleuchtet werden. Im Fokus stehen hierbei die Warmblüter (Geflügel und Säugetiere), die ihre Körpertemperatur konstant halten müssen, wobei erhebliche Gradienten zwischen der Umwelt- und der Körpertemperatur bestehen können. Man unterscheidet zwischen dem Körperkern, dessen Temperatur durch Regulation konstant gehalten wird, und der Körperschale, deren Temperatur ja nach dem Abkühlungsverhältnis und den Bedürfnissen der Temperaturregulation mehr oder weniger stark schwanken kann. Da in den einzelnen Regionen des Körpers somit unterschiedliche Temperaturen herrschen können ist man übereingekommen, als Vergleichswert und zur Beurteilung der Tiergesundheit die im Rektum gemessene Temperatur zu wählen. Normalwerte der Körpertemperaturen verschiedener Tierarten sind in Abb. 1 zusammengefasst.

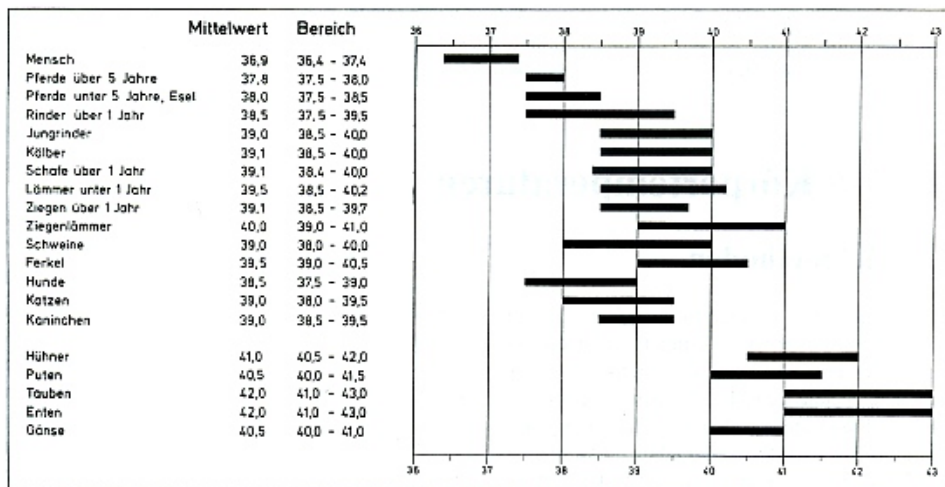


Abbildung 1: Normalwerte der Körperkerntemperaturen verschiedener Tierarten (SCHEUNERT und TRAUTMANN 1987)

Eine konstante Körpertemperatur ist dann gegeben, wenn Wärmebildung und Wärmeabgabe im Gleichgewicht sind. Die endogene Wärmebildung resultiert aus den biochemischen Umsetzungsprozessen des Organismus; z. B. aus Verdauungs- und Stoffwechselfvorgängen im Ruhezustand oder aus Muskelarbeit bei körperlicher Aktivität. Die Abgabe von Wärme an die Umgebung erfolgt durch Strahlung, Leitung, Konvektion und Verdunstung, wobei der Umfang der Wärmeabgabe auf jedem dieser vier Wege durch Regulation beeinflusst werden kann. Die durch **Strahlung** abgegebene Wärmemenge hängt von der Temperaturdifferenz zwischen der Körperoberfläche und den umgebenen Oberflächen ab. Liegt die Temperatur der umgebenden Oberflächen höher als die Hauttemperatur, so nimmt der Körper Strahlungswärme auf. Das ist vor allem bei intensiver Sonneneinstrahlung der Fall. Wärmeverluste durch **Leitung** entstehend bei direktem Kontakt mit den umgebenden Medien, z. B. wird einem Körper in Wasser mehr Wärme entzogen als in Luft, weil Wasser eine höhere Wärmeleitfähigkeit hat. Auch bei der Gestaltung von Liegeflächen ist die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Materialien von Bedeutung. Durch **Konvektion** wird die mit der Haut in Verbindung stehende Luftschicht abgeführt und durch neuere, kühlere Luft ersetzt. Die Wärmeabgabe durch Konvektion kann durch Wind und durch Körperbewegung begünstigt werden. Weil das Haar- oder Federkleid Leitungs- und Konvektionsverluste einschränkt, kann z. B. eine Schur die Wärmeabgabe entsprechend begünstigen. **Verdunstung** (Evaporation) stellt den wirksamsten Weg der Wärmeabgabe dar, aus Gründen der Wasserökonomie werden Mechanismen zur Steigerung der Verdunstung erst dann eingesetzt, wenn die Wärmeabgabe über die anderen genannten Wege nicht mehr ausreicht. Die Haut ist nicht vollständig wasserundurchlässig, deshalb verdunstet ständig Wasser in die angrenzende Luftschicht. Der Umfang dieses Wärmeverlustes hängt von der Wasserdampfdruckdifferenz zwischen Haut und Luft ab, er ist somit in trockener Luft größer. Auch die Ausatemluft ist wasserdampfgesättigt und trägt zur Wasser- und damit Wärmeabgabe bei. Diese Arten des Feuchteverlusts (*Perspiratio insensibilis*) können nicht regulativ verändert werden; sie machen im Allgemeinen nur etwa 10 bis 20% der Gesamtwärmeabgabe aus. Thermoregulatorisch bedeutsam ist hingegen die (sensible) Verdunstung über Schweißsekretion, Hecheln oder verstärkten Speichelfluss.

Abb. 2 zeigt schematisiert die Temperaturbereiche, innerhalb derer keine aktive Thermoregulation nötig ist (Zone thermischer Neutralität), sowie die kälteren und wärmeren Bereiche, in denen durch Regulation die Körperkerntemperatur aufrechterhalten werden kann.

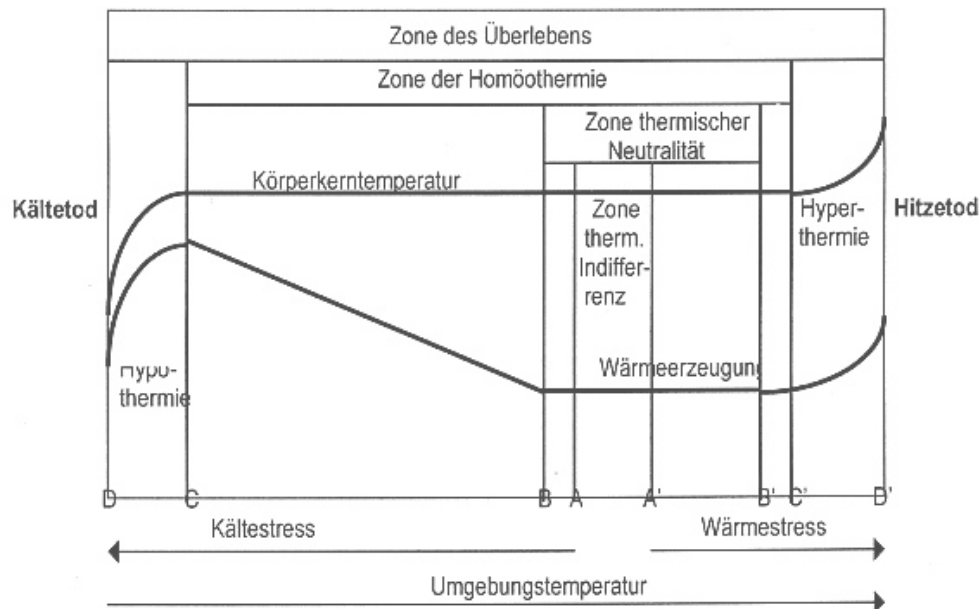


Abbildung 2: Kritische Temperaturen und Zonen (nach BIANCA 1968)

Aus den oben genannten Mechanismen der Wärmeabgabe wird deutlich, dass neben der Umgebungstemperatur auch die Luftfeuchte für die Belastung eines Organismus bedeutsam ist. Um dem Rechnung zu tragen, wurden zur Beurteilung der aktuellen Belastungssituation in der Tierhaltung verschiedene Temperatur-Luftfeuchte (engl.: humidity) -Indices (THI) entwickelt, so ist z. B. im Bereich der Milchviehhaltung der von JOHNSON (1965) vorgestellte THI gebräuchlich. In Tabelle 1 sind am Beispiel der Milchkuh die Anzeichen zusammengefasst, die zu erkennen sind, wenn das Tier Hitzestress zeigt.

Tabelle 1: Anzeichen für Hitzestress bei Milchkühen (nach NRC 1981)

Atemfrequenz > 80/min (bei 7 von 10 Tieren)
Rektaltemperatur > 39,2 °C (bei 7 von 10 Tieren)
Futteraufnahme um > 10% reduziert
Milchleistung um > 10% reduziert
Vermehrter Wasserverbrauch
Vermehrtes Schwitzen
Veränderte Milchezusammensetzung (% Protein↓, % Fett ↓)
Veränderte Hormonwerte (Prolaktin ↑)
Verändertes Verhalten (suchen Schatten, stehen zusammen, liegen weniger ab, stehen am/im Wasser)

### **Einflussfaktoren auf das Anpassungsvermögen von Nutztieren gegenüber Hitze**

Die Fähigkeit von Tieren sich steigenden Umgebungstemperaturen anzupassen, hängt zum einen von den ihnen zur Verfügung stehenden regulativen Mechanismen ab; zum anderen werden aber diese Mechanismen auch durch verschiedene andere Faktoren auf Seiten des Tieres beeinflusst. Die generell verfügbaren Reaktionen auf akute oder chronische Hitzebelastungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Thermoregulatorische Reaktionen auf Hitzebelastung (nach NRC 1981)

<u>akut:</u>	Periphere Vasodilatation
	Schweisssekretion
	Speichelsekretion
	Aktivität des sympathischen Nervensystems
	Schilddrüsenaktivität
<u>chronisch:</u>	Haarwachstum
	Zahl der Blutgefäße in der Subcutis
	Schichtdicke der Epidermis
	Länge der Extremitäten
	Kamm- u. Kehllappengrösse (Geflügel)
	Schwanzlänge (Maus)



Hinsichtlich der Wärmeabgabe durch Verdunstung unterscheiden sich die einzelnen Tierarten deutlich: während der Mensch, das Pferd, auch das Kamel und das Rind primär zur Evaporation schwitzen, nützen Vögel, Kaninchen, Hund, Katze und das Schwein mehr die Wärmeabgabe über das Hecheln. Die kleinen Wiederkäuer nutzen beide Mechanismen in etwa gleichem Maße. Der Mensch und die verschiedenen Tierarten können durchaus unterschiedliche thermoneutrale Bereiche haben, zudem gibt es Art- und Rassenunterschiede. Zudem kann der physiologische Status (Alter, Gravidität und Laktation) den thermoneutralen Bereich verschieben. So ist bekannt, dass der thermoneutrale Bereich von Neugeborenen und Jungtieren im Allgemeinen höher liegt als bei adulten Tieren der gleichen Art. Die Aufnahme von Wärme über Strahlung ist u. a. auch von der Haut- bzw. Fellfarbe abhängig: je stärker die Reflexion, d. h. umso heller die Farbe, umso geringer ist die Absorption und damit umso höher die Toleranz gegenüber Sonneneinstrahlung. Der sogenannte Albedo-Wert, d. h. das Verhältnis zwischen reflektierter und aufgenommener Strahlung ist z. B. bei Rindern mit hellem Fell mehr als dreimal so hoch wie bei solchen mit dunklem Fell, wobei die Farbvariation auch innerhalb einer Rasse gegeben sein kann (z. B. helle und dunkle Jersey und Afrikander). Des Weiteren kann auch ein bestimmter Haartypus, der sogenannte „Slick Hair Coat“ Phänotyp, den einige tropische Rinderrassen wie z. B. die Senepol Rinder aufweisen, zu einer besseren Hitzetoleranz beitragen. Senepol Rinder verfügen über ein besonders kurzes, glattes Fell, ein Merkmal, welches genetisch determiniert ist (MARAISEGARAM et al. 2007, OLSON et al. 2003). Innerhalb der Gattung Rind (*Bovinae*) gibt es unabhängig davon auch offenbar genetisch bedingte Unterschiede im Regulationsvermögen bei steigenden Umgebungstemperaturen. So gelten das europäische Rind (*Bos taurus*) sowie Wisent (*Bison bonasus*), Bison (*Bison bison*) und Yak (*Bos grunniens*) als stark wärmeempfindlich, während Wasserbüffel (*Bubalus bubalis*) und Gayal (*Bos frontalis*) nur mäßig hitzeempfindlich sind. Die höchste Wärmetoleranz weisen Zeburassen (*Bos primigenius indicus*) sowie Kreuzungen mit Zeburassen auf (HANSEN 2004). Auch innerhalb der Europäischen Rinderrassen ergeben sich Unterschiede in der Wärmetoleranz: beispielsweise ist das Regulationsvermögen bei Holstein Frisians schon bei niedrigeren Umgebungstemperaturen erschöpft als das von Jersey oder von Ayrshire (LEGATES et al. 1991). Inwieweit diese Unterschiede tatsächlich rassespezifisch sind, oder aber lediglich die Höhe der Milchleistung widerspiegeln, ist nicht bekannt. Je höher die Milchleistung ist, umso höher ist die Stoffwechselaktivität und damit die Wärmeproduktion. Die Abgabe dieser mit steigender Milchleistung erhöhten Wärme an die Umwelt ist bei relativ kalter Umgebungstemperatur deutlich weniger problematisch als bei höheren Temperaturen und hohen Luftfeuchten. So muss beispielsweise eine Kuh mit 700 kg Lebendgewicht und 10000 l Laktationsleistung zu Beginn der Laktation (ca. 40 kg/Tag) Wärmeenergie von etwa 1700 Watt vom Körper abführen. Bei 10°C können 80 % direkt abgegeben werden, der Rest wird mit Wasser verdampft. Bei 30°C werden nur mehr 30% der Wärmeenergie direkt abgegeben, während 70% verdampft werden müssen. Dies entspricht dann einer Menge von rund 30 l Wasser pro Tag (SCHNEEBELI 2006).

### **Effekte auf Leistung und Gesundheit**

Hitzestress-bedingte Risiken für Leistung und Gesundheit können Wachstum, Milchleistung und Eutergesundheit, Verdauungsfunktionen und Fruchtbarkeit landwirtschaftlicher Nutztiere betreffen.

Einbußen das **Wachstum** betreffend sind beispielsweise bei Mastschweinen bei erhöhten Umgebungstemperaturen durch eine geringere Futtermittelaufnahme und einen geringeren Energieansatz bei sinkendem energetischen Wirkungsgrad zu beobachten (THORBECK 1975).

Auch bei Milchkühen kommt es bei erhöhten Umgebungstemperaturen zu einer reduzierten Futtermittelaufnahme. Steigt die Umgebungstemperatur, muss die Kuh auch vermehrt Wasser abgeben. Daraus resultiert eine erhöhte Wasseraufnahme. Da die Thermoregulation ebenfalls ein energieaufwändiger Prozess ist, ist die aufgenommene Nährstoffmenge nicht länger ausreichend, um das Leistungsniveau zu halten, die **Milchleistung** sinkt (TAMMINGA und SCHRAMA 1998, Abb. 3).

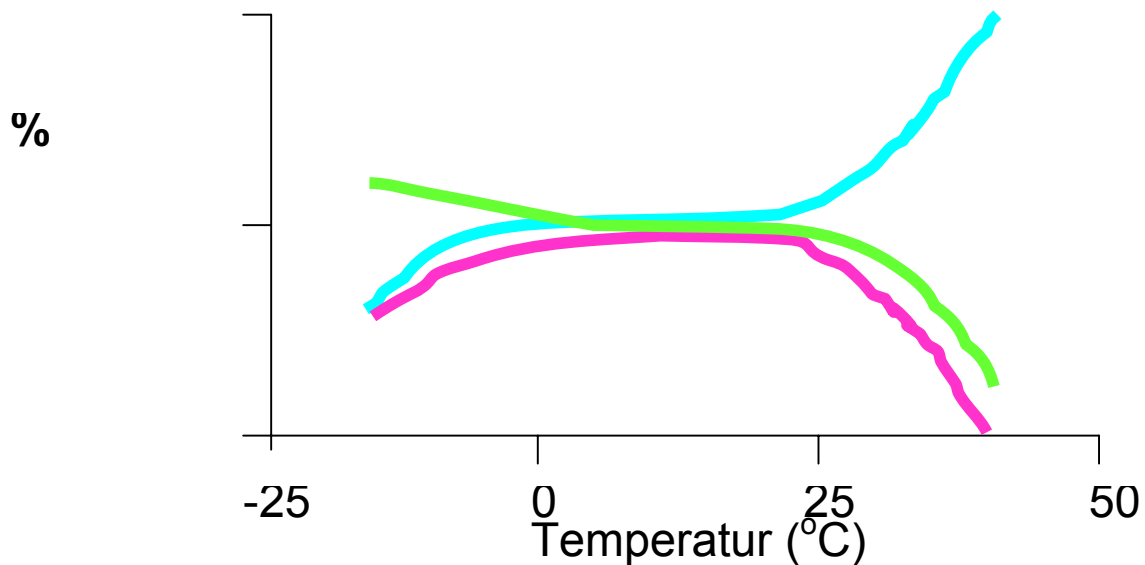


Abbildung 3: Trockensubstanzverzehr (-), Wasseraufnahme (-) und Milchleistung (-) bei Milchkühen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (nach TAMMINGA und SCHRAMA 1998)

Weiterhin hat Hitzstress auch Auswirkungen auf die **Eutergesundheit** von Milchkühen. Die Immunantwort auf euterpathogene Erreger kann anhand der Anzahl somatischer Zellen pro Milliliter Milch (Somatic Cell Count, SCC) dargestellt werden. So führte ein chemotaktischer Stimulus bei hitzestressierten Tieren zu einem weit geringeren Anstieg der SCC im Vergleich zu Tieren, die keinem Hitzestress ausgesetzt waren (ELVINGER et al. 1992). Die SCC ist dabei ein Maß für die unspezifische Immunabwehr im Euter, je geringer die Immunantwort nach einem Stimulus ausfällt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer Infektion des Euters kommen kann. Hitzestressierte Tiere sind demnach empfänglicher für Infektionen des Euters.

Hohe Umgebungstemperaturen können auch in Einschränkungen der Verdauungsfunktionen resultieren, wobei vor allem subakute Pansenacidosen (SARA: sub-acute rumen acidosis) aktuell diskutiert werden. Hitzestress führt zu einer reduzierten Futtermittelaufnahme, zu verminderter Wiederkäuen und dadurch auch zu einem reduzierten Speichelfluss in den Pansen. Zudem ist während des Hechelns bei Hitzebelastung der Speichelabfluss nach außen (engl.: drooling) erhöht und somit erreicht insgesamt weniger Speichel den Pansen. Dort ist damit

die Pufferwirkung des Speichels auf den pH-Wert reduziert. Des Weiteren hechelt die Kuh bei hoher Temperatur, um ihre Wärmeabgabe über die Atemluft zu maximieren, ein Vorgang, bei dem zusätzlich CO<sub>2</sub> abgeatmet wird. Dies führt wiederum zu einer Reduzierung der Pufferkapazität (COLLIER et al. 1982, MISHRA et al. 1970, NILES et al. 1980). SARA steht wiederum in Zusammenhang mit verschiedenen Gesundheitsstörungen, vor allem aber mit Reheartigen Klauenproblemen (Laminitis) (NOCEK 1997, VERMUNT 2000).

Durch Hitzestress wird auch die **Reproduktionsleistung** landwirtschaftlicher Nutztiere negativ beeinflusst. Sind Kühe erhöhten Temperaturen ausgesetzt, führt dies zu geringeren Brunstintensitäten und -dauer und zu einer geringeren Oozytenqualität (DOBSON und SMITH 2000). So ist der Besamungserfolg bei Milchkühen in den USA im klimatisch gemäßigtem Minnesota im Jahresverlauf gleich bleibend hoch, während in Arizona mit seinem wüstenähnlichen Klima der Besamungserfolg in den heißen Sommermonaten von Juli bis September auf etwa die Hälfte der Winterwerte zurück geht. Im subtropischen Florida mit seinem feucht-heißen Klima liegt die Konzeptionsrate im gesamten Jahresverlauf deutlich unter der in Minnesota und Arizona, wobei auch hier in den Sommermonaten wiederum deutlich geringere Besamungserfolge zu verzeichnen sind (HANSEN 1997).

In Wochen mit hohen bis sehr hohen Umgebungstemperaturen, die dann noch gekoppelt sind mit hoher Luftfeuchtigkeit, sind Kühen für die Wärmeabgabe sehr enge Grenzen gesetzt, sodass sie im Sommer auch bei den hierzulande noch eher gemäßigten klimatischen Bedingungen schnell in eine Hitzestresssituation geraten können.

### Fazit

Hitzestressbelastungen bei Nutztieren sind schon jetzt zumindest zeitweise auch in den hiesigen Breiten durchaus relevant; von einer Erhöhung der Belastungszeiten ist auszugehen. Deshalb sind geeignete Abhilfemaßnahmen bzw. Linderungsstrategien in Stallbau und Fütterung weiter zu entwickeln und auch entsprechende Berücksichtigungen in den Zuchtzielen zu prüfen.

### Literaturverzeichnis

BIANCA, W. (1968): Thermoregulation. In: *Adaptation of Domestic Animals*. E.S.E. Hafez (ed.), Lea & Febiger, Philadelphia, 97–118.

COLLIER, R. J., BEEDE, D. K., THATCHER, W. W., ISRAEL, L. A. und WILCOX, C. J. (1982): Influences of environment and its modification on dairy animal health and production. *J Dairy Sci.* **65**, 2213–2227.

DOBSON, H. und SMITH, R. F. (2000): What is stress, and how does it affect reproduction? *Anim Reprod Sci.* **60-61**, 743-52.

ELVINGER, F., NATZKE, F. P. und HANSEN, P. J. (1992): Interactions of heat stress and bovine somatotropin affecting physiology and immunology of lactating cows. *J Dairy Sci.* **75(2)**, 449-62.

HANSEN, P. J. (1997): Interactions between the immune system and the bovine conceptus. *Theriogenology* **47**, 121-130.

HANSEN, P. J. (2004): Physiological and cellular adaptations of zebu cattle to thermal stress.

Anim Reprod Sci. **82-83**, 349-60

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2007): Klimabericht des IPCC 2007 [http://www.awi.de/de/aktuelles\\_und\\_presse/selected\\_topics/klimawandel/ipcc\\_bericht\\_2007](http://www.awi.de/de/aktuelles_und_presse/selected_topics/klimawandel/ipcc_bericht_2007).

JOHNSON, H. D. (1965): Environmental temperature and lactation (with special reference to cattle). *Int J Biometeor.* **9**, 103–116.

LEGATES, J. E., FARTHING, B. R., CASADY, R. B. und BARRADA, M. S. (1991): Body temperature and respiratory rate of lactating dairy cattle under field and chamber conditions. *J Dairy Sci.* **74(8)**, 27695-7621

MARASEGARAM, M., CHASE, C. C. JR., CHAPARRO, J. X., OLSON, T. A., BRENNEMAN, R. A. und NIEDZ, R. P. (2007): The slick hair coat locus maps to chromosome 20 in Senepol-derived cattle. *Anim Genet.* **38(1)**, 54-9.

MISHRA, M., MARTZ, F. A., STANLEY, R. W., JOHNSON, H. D., CAMPBELL, J. R. und HILDERBRAND, E. (1970): Effect of diet and ambient temperature-humidity on ruminal pH, oxidation reduction potential, ammonia and lactic acid in lactating cows. *J Anim Sci.* **30**, 1023-28.

NILES, M. A., COLLIER, R. J. und CROOM, W. J. (1980): Effects of heat stress on rumen and plasma metabolite and plasma hormone concentrations of Holstein cows. *J Anim Sci.* **50** (Suppl. 1), 152.

NOCEK, J. E. (1997): Bovine acidosis: Implications on laminitis. *J Dairy Sci.* **80**, 1005-28.

NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, COMMITTEE ON ANIMAL NUTRITION) (1981): Effect on environment on nutrient requirements of domestic animals. National Academy Press, Washington DC, USA, 137-52

OLSON, T. A., LUCENA, C., CHASE, C. C. JR. und HAMMOND, A. C. (2003): Evidence of a major gene influencing hair length and heat tolerance in *Bos taurus* cattle. *J Anim Sci.* **81(1)**, 80-90.

SCHEUNERT, A. und TRAUTMANN, A. (1987): Thermophysiologie. In: SCHEUNERT, A. und TRAUTMANN, A.: *Lehrbuch der Veterinärphysiologie*, 7. Auflage, Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg. 144

SCHNEEBELI, H. (2006): Frischer Wind im Stall. *UFA-Revue* 5/06, Union des Fédérations Agricoles, Switzerland : 54-57.

TAMMINGA, S. und SCHRAMA, J. W. (1998): Environmental effects on nutrient and energy metabolism in ruminants. *Arch Tierernähr.* **51(2-3)**, 225-35.

THORBECK, G. (1975): Studies on nitrogen energy metabolism in growing pigs. *Beret. Forsogslab.* 159.

VERMUNT, J. J. (2000): Risk factors of laminitis- an overview. In: *Proc III Int Conf on Bovine Lameness*, MORTELLARO, C. M., DE VECCHIS, L. und BRIZZI, A., eds. Parma, Italy, 34-45

**Kontakt**

Prof. Dr. Dr. Helga Sauerwein, Dr. Petra Regenhard  
Institut für Tierwissenschaften  
Physiologie & Hygiene  
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn  
Katzenburgweg 7 - 9  
53115 Bonn

Tel.: +49 228 732804

Fax: +49 228 737938

E-Mail: [sauerwein@uni-bonn.de](mailto:sauerwein@uni-bonn.de)

## **Stressminderung durch baulich-technische Maßnahmen beim Rind**

Stress reduction in dairy cow houses by technical and construction means

W. Büscher

### **1 Einleitung**

Milchkühe haben in den Sommermonaten oft das Problem, dass sie durch ein hohes Produktionsniveau die hiermit zwangsläufig verbundene Körperwärme nicht in ausreichendem Umfang abgeben können. Bevor es zu Stresssituationen bei hohen Umgebungstemperaturen kommen kann, sollten alle vorbeugenden baulichen und technischen Möglichkeiten ausgeschöpft werden, die mit vertretbarem Umbauaufwand möglich sind. Hierzu zählen alle Maßnahmen, die den natürlichen Luftwechsel steigern und für einen verminderten Wärmeeintrag in den Stall sorgen. Die Installation von Umluftventilatoren oder der Einsatz von Sprühbefeuchtungsanlagen werden als nachträgliche Maßnahmen diskutiert, wenn alle baulichen Möglichkeiten ausgeschöpft sind.

### **2 Wärmetechnische Zusammenhänge**

Bei der Milcherzeugung entstehen Stoffwechselbedingt große Mengen an Wärme bei den Kühen; wobei Hochleistungstiere im ersten Laktationsdrittel etwa 2000 Watt Wärme abgeben (CIGR, 1984). Je nach mikroklimatischen Bedingungen wird diese Wärme direkt oder indirekt an die Umgebung abgegeben. Die direkte Wärmeabgabe, sogenannte sensible Wärme, erfolgt durch folgende Mechanismen:

- Wärmeleitung (Konduktion) vom Körper der Kuh zu kälteren Körpern, z. B. Liegeboxen
- Wärmeübergang zu vorbei strömender Luft (Konvektion)
- Wärmestrahlung (Radiation), wie z. B. die Strahlung der Sonne, die sich erst am bestrahlten Körper in Wärme umsetzt.

Die evaporative Wärmeabgabe ist der dominierende Mechanismus zur „Entwärmung“ der Milchkühe bei hohen Umgebungstemperaturen (s. Tabelle 1). Die Wasserverdunstung erfolgt durch Feuchtigkeitsabgabe über die Atemluft und durch Schwitzen. Erfahrungsgemäß liegt für Milchkühe der optimale Temperaturbereich der Umgebung zwischen +4 und +16 °C (ALBRIGHT U. ARAVE 1997). In diesem Bereich erfolgt die beste Verwertung des Futters. Bis etwa 22 °C verschlechtert sich zwar die Futtermittelverwertung, mit Leistungsdepressionen ist aber noch nicht zu rechnen. Erst über diese Temperatur kommt es zu einer verminderten Futteraufnahme.

Tabelle 1: Wärmeproduktion und Wasserdampfabgabe einer Hochleistungskuh (10000 kg Milch je Jahr) im ersten Laktationsdrittel (nach DIN 18 910, 2004)

Umgebungs- temperatur in °C	Gesamtwärme- produktion in Watt	Wärmeabgabe (sens. Wärme) in Watt	Wasserdampfproduktion (latente Wärme) in g/h
-10	ca. 3500	ca. 2800	ca. 1054
0	ca. 2200	ca. 1800	ca. 650
10	1800	1400	600
20	1730	1120	880
30	1650	540	1640
35	1490	60	2100

Für den Tierhalter sind durch Beobachtung folgende Symptome für Hitzestress bei den Milchkühen wahrnehmbar, die seit vielen Jahren bekannt sind (RAY U. ROUBICEK 1971):

#### **Symptome für leichten Stress:**

- Liegende Tiere pumpen, haben eine erhöhte Atemfrequenz (über 80 pro Minute).
- Die Tiere liegen weniger, stehen auf den Gängen, bevorzugt an offenen Toren und den Tränken
- Die Körpertemperatur steigt (Rektaltemperatur über 39 °C).

#### **Symptome für erheblichen Stress:**

- Die Tiere hecheln mit langem Hals und offenem Maul.
- Die Futteraufnahme sinkt (10 bis 25 %).
- Nach einer gewissen Zeit (etwa 3 Tage) sinkt die Milchleistung.
- Das Brunstgeschehen wird vermindert.

## **2 Lüftungsplanung für den Sommer**

Nach DIN 18910 (2004) werden die zur Abfuhr der Wärme notwendigen Sommerluftraten je Tier bei einer Außentemperatur von 30°C errechnet. Für eine Hochleistungskuh ergibt sich hieraus eine zu installierende Luftleistung von 480 m<sup>3</sup>/Tier und Stunde; im ersten Laktationsdrittel sogar 570 m<sup>3</sup>/Kuh und Stunde. Bei diesen Temperaturen tritt aber bereits erheblicher Hitzestress auf. Um auch bei Umgebungstemperaturen von etwa 22°C einen ausreichenden Luftwechsel ohne wesentlichen Anstieg der Stalltemperaturen zu erreichen, sind weitaus höhere Luftraten zu fordern, als bisher bei der Planung von Lüftungsanlagen berücksichtigt wurden (s. Tabelle 2 unten).

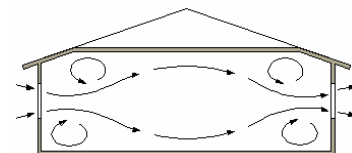
Tabelle 2: Lufraten für Hochleistungskühe mit 700 kg Lebendmasse  
(nach CIGR, 1984 und DIN 18 910, 2004)

Leistungsgruppe	Leistung in kg	Durchschnitt	1.Lakt.-drittel	2.Lakt.-drittel	3.Lakt.-drittel	Trockensteher
Mindestlufrate in m <sup>3</sup> /h	10.000	136	159	132	115	94
Sommerlufrate in m <sup>3</sup> /h	5.000 (DIN)	366	410	363	343	334
30 °C, delta t = 3 K	10.000	477	569	473	412	334
	12.000	521	632	517	439	334
	14.000	565	696	562	466	334
22 °C, delta t = 3 K	10.000	890	1062	884	769	624

Neben den in Tabelle 2 aufgelisteten Lufraten sind in vielen Außenklimaställen zusätzliche Wärmeeinträge durch das Dach zu berücksichtigen. Bei voller Sonneneinstrahlung sind Dachtemperaturen bis zu 60°C möglich. Diese Temperaturen führen zu einem erheblichen Wärmeeintrag in den Stall. Dabei können Temperaturerhöhungen von 4 bis 5 Kelvin<sup>16</sup> am bestrahlten Körper auftreten, also auch auf dem Fell der Kühe. Im Bereich der Sonneneinstrahlung durch Lichtwellplatten sind sogar Temperaturerhöhungen von mehr als 10 Kelvin möglich (HEIDENREICH 2002; HERKNER 2002).

Tabelle 3: Empfohlene Zu- und Abluftflächen für Milchviehställe mit Querlüftung  
(Leistung > 8000 kg Milch pro Jahr; mittlere Außenwindgeschwindigkeit: 1,0 m/s)

Quer belüfteter Außenklimastall	
einzelnd stehend Queranströmung	von anderen Gebäuden beeinflusst bzw. ungünstige Lage
0,40 m <sup>2</sup>	0,60 - 0,80 m <sup>2</sup>



<sup>1</sup> Temperaturdifferenzen werden in Kelvin angegeben; 1 Kelvin entspricht 1° Celsius



Außenklimaställe mit Querlüftung erfreuen sich in der Milchviehhaltung zunehmender Beliebtheit und setzen sich mehr und mehr als Standard-Bauform durch. Diesen Ställen ist gemeinsam, dass sie große Seitenwandöffnungen über die gesamte Längsachse des Stalles aufweisen (Tabelle 3). Bei Neubauten wird diesem Umstand unmittelbar Rechnung getragen; bei Umbauten von „alten“ Ställen kann aus konstruktiven Gründen nicht immer die gesamte Seitenwand geöffnet werden. Auch aus energetischer Sicht ist es sinnvoll, das maximale bauliche Potenzial des Stalles für die Unterstützung des Luftwechsels zu nutzen (BÜSCHER 2004).

Folgende bauliche Empfehlungen haben sich bei der Querlüftung allgemein bewährt:

- Lage des Stalles möglichst quer zur Hauptwindrichtung,
- Schaffung zusätzlicher Zu- und Abluftflächen im Wandbereich (Jalousielüftung),
- Vermeidung Lüftungshemmender Anbauten,
- Traufhöhen von mindestens 4 Meter,
- Vermeidung von Sonneneinstrahlung durch Lichtplatten im Aufenthaltsbereich der Tiere,
- Einsatz heller Faserzementplatten als Dacheindeckung,
- Bei Einsatz von Blech als Dacheindeckung möglichst wärmegeämmte Ausführung (z. B. Sandwichelemente)

### **3 Wirksamkeit höherer Luftgeschwindigkeiten**

Sinkt die Windgeschwindigkeit unter 1 m/s, ist bei großflächigen Ställen trotz offener Wände meist kein ausreichender Luftwechsel mehr gegeben. Besonders kritisch sind der Melkstand und der Vorwarte Hof sowie Ställe, die von anderen Gebäuden beeinflusst werden. Gerade im Warte Hof und im Melkstand fallen aufgrund des geringen Volumens und der hohen Tierdichte große Mengen an Wärme und vor allem Wasserdampf an.

Unter diesen Bedingungen ist es sinnvoll, die Luftbewegung künstlich zu erhöhen. Wichtig ist dabei, eine gleichmäßige Luftströmung in den Aufenthaltsbereichen der Kühe zu erzeugen, um das Wärmepolster der Luft um den Körper der Kuh aufzulösen und auf diesem Wege die konvektive Wärme- und Wasserdampf abgabe der Tiere zu unterstützen. Die gefühlte Temperatur (Tabelle 4) ergibt sich aus den Faktoren Temperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit. In Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit und der Luftfeuchte können von den Kühen unterschiedlich große Mengen an Wasser über die Haut abgegeben werden. Durch die Verdampfung entsteht Verdunstungskälte, die eine Kühlwirkung an der Haut der Tiere erzeugt.

Tabelle 4: Chill-Effekt; Temperaturwahrnehmung von Luft mit ähnlichem Wärmeinhalt aber unterschiedlicher Geschwindigkeit (verändert nach BARNWELL 2002)

Ist-Temp. °C	Rel. Luftfeuchte %	<i>Temperaturwahrnehmung</i> bei einer Luftgeschwindigkeit von m/s					
		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
35	50	35	32,2	26,6	24,4	23,3	22,2
29,5	50	29,5	26,6	24,4	22,8	21,1	20,0
24	50	24	22,8	21,1	20	17,7	16,6

#### 4 Steigerung der Wärmeabgabe durch Ventilatoren-Einsatz

Um die gewünschte Luftbewegung bei nicht ausreichender Windgeschwindigkeit und hohen Umgebungstemperaturen zu erzeugen, werden zunehmend Ventilatoren im Stall eingesetzt. Die gesamte zu installierende Luftleistung der Ventilatoren ist abhängig von der Stalllänge, der jeweiligen Kuhgruppe und, wie bereits oben erwähnt, vom Dach des Stalles. Sie schwankt entsprechend zwischen 500 - 1.200 m<sup>3</sup> je Kuh und Stunde, explizit der Ventilatoren für den Melkstand und den Wartehof (BÜSCHER 2004).

Grundsätzlich muss man zwischen der Installation von zuschaltbaren Abluft- und reinen Umluftventilatoren unterscheiden. Bei der Installation von zuschaltbaren Abluftventilatoren in der Stirnwand des Stalles spricht man beispielsweise von einer „Tunnellüftung“, die auch in Geflügelmast-Ställen eingesetzt wird. Bei der Verwendung von reinen Umluftventilatoren muss man klären, ob man die Wirkung des Windes unterstützen (Steigerung des Luftaustausches) oder eine verbesserte Zirkulation der Raumluft (ohne Steigerung des Luftaustausches) erreichen will.

Die Bezeichnung der sich hieraus ergebenden Lüftungssysteme ist nicht einheitlich. Es scheint sinnvoll, sich bei der Bezeichnung an der Wirkung auf die Raumluft zu orientieren, die man erreichen will. Bei der Entscheidung sind auch der Baukörper und der Standort des Stalles von Bedeutung. Bei in der Nähe liegender Wohnbebauung oder Stickstoff-empfindlichen Biotopen sollte die Ventilator-technik so gewählt werden, dass keine Steigerung des Luftaustausches erfolgt. Hier ist die Kreisanordnung von Umluftventilatoren zu empfehlen (Abbildung 1). Zur Steigerung des Luftaustausches bietet sich die Parallelanordnung in Hauptwindrichtung an (Abbildung 2).

Tabelle 5: Techniken der Unterstützungslüftung, Prinzipien, Ziele, Ausführungen  
(HEIDENREICH et. al. 2005)

	<b>Unterstützungslüftung</b>			
<b>Prinzip</b>	Zuschaltung von <b>Ab- luft</b> -Ventilatoren	Zuschaltung von <b>Umluft</b> -Ventilatoren		
<b>Ziel</b>	Steigerung des Luft- <b>Austausches</b> , Erhöhung der Luft- <b>Geschwindigkeit</b> im Stall	Erhöhung der Luft- <b>Geschwindigkeit</b> im Stall, Steigerung des Luft- <b>Austausches</b>	Steigerung der Luft- <b>Zirkulation</b>	
<b>Ausführung</b>	Axialventilatoren in Stirn- oder Seitenwänden (z. B. Tunnellüftung)	Axialventilatoren mit parallel <b>gerichteter Raumströmung</b> (längs oder quer zur Stallhauptachse)	<b>Oszillierende</b> Axialventilatoren oder in <b>kreisförmiger Anordnung</b>	Deckenventilatoren mit <b>vertikaler Raumströmung</b>

Bei der *Kreisanordnung der Umluftventilatoren* werden bewegliche Ventilatoren im Innern des Gebäudes so installiert, dass die gesamte Raumluft nach dem Rührkesselprinzip in Bewegung versetzt wird. Durch die kreisende Bewegung wird die Luft im Stall verwirbelt, was zu einer Abkühlung an der Haut der Tiere führt. Bei unzureichend natürlichem Luftwechsel kann es aber zu einer Erhöhung der Luftfeuchte im Stall kommen, so dass die Kühlwirkung leicht reduziert ist (Abbildungen 1).

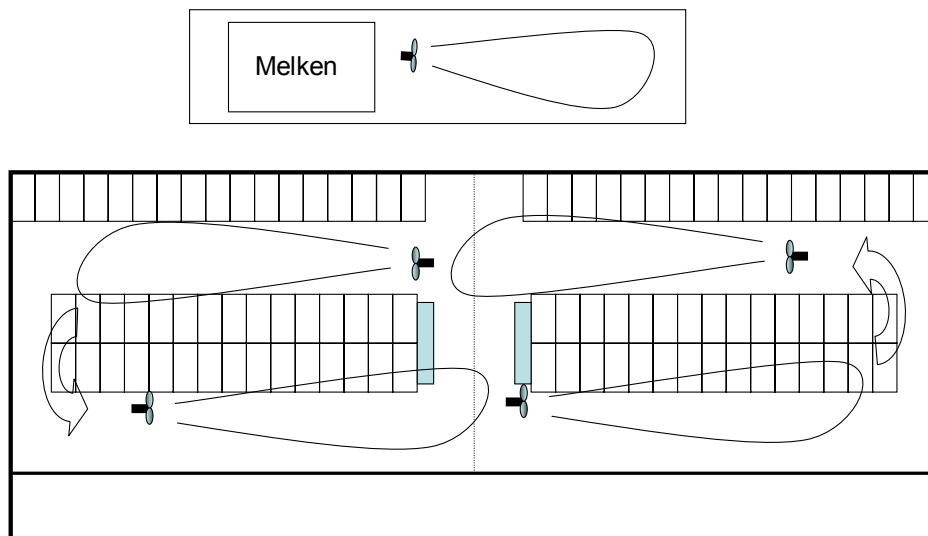


Abbildung 1: Anordnung der Umluftventilatoren im „Kreis“ zur Steigerung der Luftzirkulation (HEIDENREICH et. al. 2005)

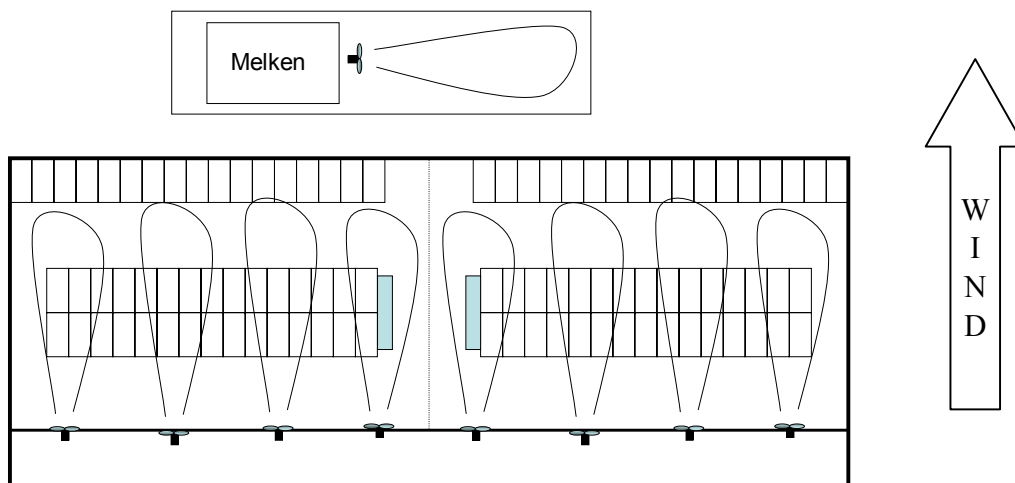


Abbildung 2: Parallelanordnung der Ventilatoren in Hauptwindrichtung zur Steigerung des Luftdurchsatzes (HEIDENREICH et. al. 2005)

Bei der Parallelanordnung (Abbildung 2) werden mehrere große Ventilatoren im Stall mit gleicher Strömungsrichtung ausschließlich in Längs- oder Quer-Richtung installiert, um den natürlichen Luftwechsel durch den Wind zu unterstützen. Bei dieser Anordnung kann man sowohl den Saug-, als auch den Druckbereich der Ventilatoren nutzen. Durch eine Anordnung mehrerer Ventilatoren in Reihe, meist in Längsrichtung des Stalles, wird die Luft Schritt für Schritt (step-by-step) durch den Stall transportiert. Die Ventilatoren sind so anzuordnen, dass sie die Umluft entsprechend der Hauptwindrichtung möglichst durch den Tierbereich transportieren (HEIDENREICH et. al. 2005).

## 5 Steuerung der Ventilatoren

Beim Einsatz einzelner großer Ventilatoren kann eine Regelung mittels Trafosteuerung sinnvoll sein. Allerdings führt diese Steuerung zu einer Erhöhung des spezifischen Leistungsbedarfs der Anlagen. Bei Blockanordnung von 2 - 3 Ventilatoren ist der Einsatz einfacher thermostatischer Regelgeräte möglich, die in Stufen die Ventilatoren ohne Abregelung zuschalten. Das Einschalten der ersten Ventilatoren sollte aber in jedem Fall bereits vor den ersten Anzeichen von Hitzestress erfolgen, damit sich die Tiere an die Strömung gewöhnen können. Bei offenen Ställen sind in den Nachtstunden auch Lärmbelastigungen zu berücksichtigen. Sofern die Ventilatoren auf Grund hoher Temperaturen nicht vollständig abgeschaltet werden sollen, empfiehlt sich hier der Einsatz von Drehstromventilatoren mit implementierter Stern-Dreieckschaltung. Durch das Umschalten von Dreieck- auf Sternschaltung verringert sich die Drehzahl auf etwa die Hälfte ohne weitere Regelgeräthbedingte Energieverluste in Kauf nehmen zu müssen. Gleichzeitig wird der Geräuschpegel der Ventilatoren erheblich reduziert (HEIDENREICH et. al. 2005).

## 6 Energiebedarf / Verfahrenskosten

Der Energiebedarf kann bei einer Luftleistung von 800 – 1200 m<sup>3</sup>/Kuh\*Stunde mit etwa 40 bis 50 kWh/Kuh und Jahr bezogen auf einen Einsatzzeitraum von etwa 170 Tagen angesetzt werden. Bei einem durchschnittlichen Strompreis in Höhe von etwa 13 ct/kWh ergeben sich damit Stromkosten von 5,20 – 6,50 € / Kuh und Jahr. Die gesamten Verfahrenskosten betragen je nach Ausführung 10 bis 15 €/Kuh und Jahr. Damit erweist sich die Unterstützungslüftung bereits bei einer Milchleistungssteigerung von etwa 60 kg/Kuh und Jahr als sinnvoll. Verbesserungen der Tiergesundheit und Einflüsse auf das Reproduktionsgeschehen sind dabei noch nicht berücksichtigt.

## 7 Fazit

Sind die baulichen Möglichkeiten der Gebäude-Öffnung ausgeschöpft, bleibt oft nur die Verwendung von Unterstützungsventilatoren zur Vermeidung von Hitzestress bei den Milchkühen. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass es diverse Umluftventilatoren gibt, die ihre Aufgaben zufriedenstellend erfüllen. Insgesamt scheint es für die Vermeidung von Hitzestress wichtiger zu sein, viel Raumluft umzuwälzen als diese verstärkt mit Frischluft auszutauschen. Zusatzventilatoren können daher als Umluftlösungen im Stall platziert werden und müssen nicht zwangsläufig in die Stirnwände (wie bei der Tunnellüftung) eingebaut werden. Hinsichtlich der Geräuschentwicklung sind langsame Flügelgeschwindigkeiten günstig zu bewerten; allerdings leidet darunter die Wurfweite der Luft und somit der Einwirkungsbereich des Ventilators am Bo-

den. Akuter Forschungsbedarf besteht zu den Fragen der Anordnung der Ventilatoren im Raum und der zu installierenden Luftleistung, um das Wohlbefinden der Tiere bei Extremwetterlagen zu gewährleisten.

### **Literaturverzeichnis:**

ALBRIGHT, J. L., ARAVE, C. W. (1997): *The Behaviour of Cattle*. Centre for Agriculture and Bioscience International, Printed and bound in the UK at the University Press, Cambridge ISBN 0 85199 196 3.

BARNWELL, R. (2002): *Effective Temperatures*. COBB-Vantress, Inc; Pittsburg, Texas.

BÜSCHER, W. (2004): Unterstützungslüftung – Die Luft im Stall in Bewegung bringen. DGS-Magazin, H. **23**, S. 11 – 13.

CIGR-Report 1 (1984): *Climatization of animal houses*. Scottish Farm Buildings Investigation, Aberdeen.

DIN 18910 (2004): *Wärmeschutz geschlossener Ställe - Wärmedämmung und Lüftung, Planungs- und Berechnungsverfahren*. Beuth Verlag, Berlin.

HEIDENREICH, T. (2002): Lüftungsprobleme in Offenställen. *Landtechnik*, H. **4**, S. 228 – 229.

HERKNER, S. et al. (2002): Mindestsommerluftvolumenströme für Hochleistungskühe. *Landtechnik*, H. **5**, S. 286 – 287.

RAY, D. E., ROUBICEK, C. B. (1971): Behaviour of feedlot cattle during two seasons. *Journal of Animal Science* **33**, S. 72-76.

HEIDENREICH, T., BÜSCHER, W., CIELEJEWSKI, H. (2005): *Vermeidung von Wärmebelastungen für Milchkühe*. DLG-Merkblatt **336**. DLG-Verlag Frankfurt.

### **Kontakt**

Prof. Wolfgang Büscher  
Universität Bonn  
Institut für Landtechnik  
Nußallee 5  
53 115 Bonn

## Stressminderung durch Zuluftkonditionierung in der Schweinehaltung

Stress reduction in pig houses by inlet air conditioning

B. Feller

Hohe Außentemperaturen stellen für die Klimagegestaltung in Schweineställen eine große Herausforderung dar. Schweine haben keine Schweißdrüsen, und können sich daher nicht durch die Absonderung und Verdunstung von Schweiß entwärmen. Die Auswirkungen zu hoher Temperaturen stören nicht nur das Wohlbefinden der Tiere, sondern haben auch einen hohen Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit der Schweinehaltung. Mastschweine fressen weniger und zeigen geringere Tageszunahmen. Säugende Sauen nehmen nicht mehr ausreichend Futter auf, geben weniger Milch und können ihre Ferkel nicht mehr ausreichend versorgen. Abgesetzte Sauen rauschen später oder um, die Samenqualität der Eber verschlechtert sich.

Schon bei der Bauplanung und Bauausführung sollten alle Möglichkeiten zur geringeren Erwärmung des Stalles ausgenutzt werden. Die Ausrichtung des Stalles zur Sonneneinstrahlung und die Dämmung des Daches verhindert ein starkes Aufheizen des Dachraumes und damit des Stalles. Die Beschattung der Traufseiten durch das Anpflanzen von Laubbäumen vermindert eine Erwärmung des Stalles, sorgt gleichzeitig für kühlere Zuluft.

Werden Schweine in größeren Gruppen gehalten, kann die Einrichtung einer Dusche, zeitgesteuert oder von den Tieren bedient, den Hitzestress senken. Zur Verdunstung eines halben Liter Wasser in der Stunde wird so viel Körperwärme benötigt, wie eine Sau je Stunde abgibt. Durch das Versprühen von Wasser im Zuluftstrom kann die Stallluft gekühlt werden. Die Lufttemperatur sinkt zwar um einige Grad, die relative Luftfeuchtigkeit steigt dabei aber an. Die fühlbare Wärme der Luft ist in latente Wärme umgewandelt worden. Schweine können aber bei feuchter, warmer Luft nur wenig Wärme über die Atmung abgeben. Daher ist der Einsatzbereich einer Luftbefeuchtung an heißen, trockenen Tagen eine Möglichkeit, an schwülwarmen Tagen nur in sehr engen Grenzen sinnvoll.

Erdwärmetauscher bieten eine sehr effiziente Methode die Zuluft abzukühlen. Die Zuluft wird dabei durch in der Erde neben oder unter dem Stall verlegten Rohren hindurchgeführt. Dabei werden Tag- und Nachtschwankungen der Zuluft wirkungsvoll ausgeglichen. Die baulichen Möglichkeiten sind dabei vielfältig. Sie reichen vom klassischen Röhrenwärmetauscher über Unterflurbetriebsganglüftung bis hin zum Opti-Air System.

Die Temperaturverläufe in Schweineställen werden den Bedürfnissen der Schweine unter Einbeziehung der Außentemperatur ständig angepasst. Trotz dieser spezifisch reagierenden Lüftungstechnik kommt es in den Sommermonaten teilweise zu erhöhten Temperaturen die den Komfortbereich der Schweine überschreiten. Bei der Betrachtung der Temperaturverteilung über einen Jahresverlauf erkennt man dabei, dass diese Belastungsphasen mit zu hohen Temperaturen für die Schweine aber nur einen relativ kurzen Zeitraum einnehmen.

Schweine werden entsprechend ihrer aktuellen Körpergewichten durch erhöhte Temperaturen unterschiedlich stark beeinträchtigt. So können leichtere Tiere hohe Temperaturen wesentlich besser ertragen als schwerere Schweine. Die Begründung hierfür liegt in den unterschiedlichen Temperaturansprüchen der Schweine in den einzelnen Gewichtsabschnitten.

Zusätzlich ist bei schweren Tieren noch zu unterscheiden, ob sie bezogen auf ihr Tiergewicht nach Erhaltungsbedarf oder stark darüber hinaus “auf Mast“ gefüttert werden. Denn ein hoher Stoffwechsel beansprucht zusätzlich das Tier bei hohen Temperaturen.

Es lässt sich also festhalten: kleinere Schweine bis zu einem Gewicht von 30 kg werden bei Betrachtung der Optimaltemperaturen auch bei Überschreitung von 30 °C kaum belastet. Größere Tiere im Bereich von 50 bis 120 kg werden ab Temperaturen von oberhalb von 28 °C nicht mehr im Optimalbereich gehalten.

Temperaturbedingte Belastungen äußern sich in

- erhöhter Atemfrequenz,
- erhöhtem Wasserbedarf und
- Abnahme der Futteraufnahme.

Extreme Temperaturen können insbesondere bei Mastschweinen oberhalb von 80 kg Kreislaufversagen verursachen. Die natürliche Reaktion der Tiere ist der Versuch einen hohen Temperaturabfluss zu erreichen. Dazu zählt insbesondere das ausgestreckte seitliche Abliegen in der Bucht möglichst auf wärmeableitendem Material. Der dem Einzeltier zur Verfügung stehende Platz in einer Bucht spielt dann eine große Rolle.

Besteht die Möglichkeit zum Suhlen wird die Hautoberfläche befeuchtet. Über die entstehende Verdunstung tritt dann zusätzliche Kühlung ein.

Der Hauptabkühleffekt der Schweine wird aber durch das vermehrte Atmen ausgelöst. Über die Sättigung der Atemluft mit Wasser in der Lunge wird eine Wärmeabfuhr durch die entstehende Verdunstungskälte erreicht.

### **Stallanlagen optimieren**

Moderne Schweinestallungen sind heute mit Zwangslüftungen ausgerüstet, die nach DIN 18910 bemessen sind. Zur Dimensionierung für den Sommerfall wird hiernach die Ventilatorleistung so ausgelegt, dass die Stallinnentemperatur maximal 2 K höher als die Außentemperatur sein soll.

In der Praxis sieht man aber häufig Abweichungen von diesem theoretischen Planungsinhalt. Entweder ist dann die geförderte Luftmenge zu gering oder die Luft, die eingeführt wird, hat häufig schon eine höhere Temperatur als die Außenluft. Dies geschieht, wenn die Zuluft, z. B. unter nicht isolierten Dachflächen, angesaugt wird und hierdurch eine zusätzliche Anwärmung erfolgt.

Moderne Zuluftsysteme (Verdrängungslüftungen) arbeiten mit geringen Luftgeschwindigkeiten. Der direkte Abkühleffekt ist dann über die Luftbewegung gegenüber früheren, freien Strahlöffnungen verringert.

Auch durch hohe Fensteranteile in den Wänden werden durch die direkte Sonneneinstrahlung zusätzliche Wärmebelastungen (Tierschutzschweinehaltungsverordnung: Fensterflächenanteil von 3 %) ausgelöst.



Nach bisherigen Erfahrungen sind Kühlungen über Erdwärmetauscher oder Sprenglersysteme für Mastschweinehaltungen nicht wirtschaftlich. Deshalb werden sie, wenn überhaupt, vorwiegend in der Zucht- und Sauenhaltung eingesetzt. In der Eberhaltung soll die Spermaqualität durch gleichmäßige Temperaturen wesentlich verbessert und in der Sauenhaltung soll die Resorption der Föten im Deckzentrum verringert sein. Dann ist ein hoher wirtschaftlicher Ansatz für die Kühlung gegeben.

### **Verfahren zur Kühlung von Ställen**

#### **Bautechnische Maßnahmen**

Durch die sachkundige Planung und Bauausführung einer Lüftungsanlage ist schon ein hoher Einfluss auf das Einhalten der Behaglichkeitstemperaturen gegeben. Als "Standardlüftungssystem" wird heute die Zuluftführung über Rieseldeckenstreifen oder die Futtergänge gewählt. Beide Zuluftsysteme haben den Vorteil, dass sich unterschiedliche Temperaturzonen innerhalb des Stalles ausbilden. Ihre Anordnung muss sinnvoll zum Liegeplatz positioniert werden.

Aber auch der Ort der Luftansaugung für die Frischluft spielt für die erreichbaren Kühleffekte eine große Rolle. So sollte die Luft von der Nord- und Ostseite bevorzugt ebenso wie aus dem Schattenbereich abgesaugt werden. Gesteigert wird diese Wirkung durch große Dachüberstände und die Ausrichtung des Zentralganges nach Norden oder Osten. Die Zuluftansaugung aus offenen, davor liegenden Hallen, ist ebenfalls günstig. Besonders ungünstig ist dagegen die Ansaugung der Luft aus dem unisolierten Dachraum des Stalles.

In diesen Fällen kann der Bau von Zuluftsammelkanälen, die dann wiederum in Richtung Norden oder Osten ausgerichtet sind, sinnvoll sein. Die Zulufttemperaturen können so auch in den kritischen sehr warmen Sommermonaten um 2 bis 3 K niedriger gehalten werden.

Eine weitere Verbesserung kann durch die Beschattung der Ställe selbst erzielt werden. Denn frei stehende Ställe ohne Bepflanzung erfahren über die Sonneneinwirkung auf die Außenwände eine höhere Aufheizung. Sehr gut bewährt hat sich auch die Bepflanzung um die Ställe mit schnellwachsenden niedrigen Büschen. Die Höhe der Büsche sollte 3 bis 4 m erreichen. Eine Baumbepflanzung bewirkt eine geringere Beschattung gegenüber Büschen.

Bei hohen Temperaturen muss die Regelung der Lüftungsanlage auch gleichzeitig die Temperaturschwankungen von Tag und Nacht mit berücksichtigen. Deshalb sollte in diesen Zeiten die Absenkautomatik aktiviert werden, die bewirkt, dass die kühlere Temperatur während der Nacht im Stall ausreichend abgepuffert wird. Über das Anheben des Sollwertes erreicht man gleichzeitig eine Verzögerung des Anstieges der Temperatur am Morgen.

Durch eine Kontrolle der Sauberkeit der Ventilatoren bei gleichzeitiger Kontrolle der Zuluftöffnungen wird sichergestellt, dass die geplanten Luftmengen an den warmen Tagen auch tatsächlich in den Stall gefördert werden.

#### **Indirekte Kühlung**

Zur indirekten Kühlung setzt man Befeuchtungs- oder Besprühungssysteme mit Wasser auf der Dachoberfläche der Ställe ein. Dadurch wird eine Temperaturabsenkung der Dachhaut bewirkt. Die absolute Luftfeuchtigkeit im Stall wird durch diese Maßnahme nicht beeinflusst,

die Zulufttemperatur aber gesenkt. Als technische Lösungen sind hierfür Gartensprenger, die auf dem Dach verteilt werden, geeignet, die über eine Zeitschaltuhr gezielt eingesetzt werden. Die Rasensprenger werden vorteilhaft auf dem First eingebaut.

Beim Betrieb ist darauf zu achten, dass möglichst wenig Wasser über die Dachrinne abfließt. Auf dem Weg vom First zur Traufe soll möglichst viel Wasser verdunsten, um hierdurch eine optimale Kühlwirkung zu erreichen.

#### Direkte Kühlung

Für die direkte Kühlung werden Luftbefeuchtungen innerhalb des Stalles oder im Vorraum eingesetzt. In Ausnahmefällen werden auch Erdwärmetauscher gebaut, bei denen die Zuluft durch Rohre innerhalb des Erdreichs angesaugt wird. Die geringe Temperaturen des Erdreiches wird so zur Kühlung genutzt.

Grundlage für die Regelung der Lüftung nach Temperatur und Luftfeuchte ist der Wärmeinhalt der Luft, die Enthalpie. Sie wird in kJ/kg Luft gemessen. Der Wärmeinhalt unterteilt sich danach in einen fühlbaren, sensiblen Teil und einen nicht wahrnehmbaren latenten Anteil. Durch eine Anhebung der relativen Feuchte wird der Anteil an sensibler Wärme gemindert. Im gleichen Maße steigt der Anteil der latenten Wärme.

Eine Zuluft mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von zum Beispiel 62 % und eine Temperatur von 28° C, hat einen Wärmeinhalt von 65 kJ/kg Luft. Durch die Anhebung der relativen Luftfeuchte auf 80 % bei gleichem Wärmeinhalt durch Versprühen von Wasser lässt sich die Temperatur der Zuluft hierdurch auf 24,5° C senken. Diese Absenkung wird von den Schweinen als Kühlung wahrgenommen.

Bei der Kühlung der Stallluft über die Luftbefeuchtung wird also ein Teil des Wärmeinhaltes durch das Verdunsten des Wassers gebunden.

Wird nur nach der relativen Luftfeuchte ohne Berücksichtigung des Zusammenspiels von Feuchte und Temperatur (Enthalpie) geregelt, kann es auch bei Einhaltung von 80 % Luftfeuchte zu Hitzestress kommen, nämlich dann, wenn z.B. die Temperatur im Stall 26° C überschreitet. Nur bei einer niedrigen relativen Luftfeuchte der Stallinnenluft macht deshalb eine Befeuchtung zur Kühlung überhaupt Sinn.

Aufgrund der Mechanik in den Feuchtefühlern ist es in der Vergangenheit in Verbindung mit der Stallluft häufig zu Ungenauigkeiten gekommen, die bei automatischen Regelsystemen zu Fehlern in der Befeuchtung geführt haben.

Bei automatischen Luftbefeuchtungssystemen ist es deshalb notwendig, die Fühler regelmäßig zu kontrollieren und abzugleichen. Ein einfaches Schleuderthermometer (Psychrometer) mit zwei Säulen, die eine feucht, die andere trocken, ist hierfür am besten geeignet. Diagramme oder Tabellen sind notwendig, um die Feuchte- und Trockentemperatur abzugleichen.

In der Landwirtschaft werden heute als Messfühler zumeist kapazitive Fühler eingesetzt. Bei diesem Verfahren werden die unterschiedlichen Widerstände von feuchter und trockener Stallluft als Messgrundlage verwendet. Aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit sind die Fühler

mit einem Bronze-Sinter-Filter vor äußeren Stalleinflüssen geschützt. Vor jeder Stallreinigung sollten sie geschützt oder entfernt werden. Die Kosten für derartige Feuchtefühler belaufen sich auf 200 bis 300 €.

### **Praktische Umsetzung**

#### Direkte Verneblung

Bei der direkten Verneblung von Wasser innerhalb des Stalles ist darauf zu achten, dass die Wasserteilchen so klein sind, dass sie möglichst schnell in der Luft verdampfen. Je kleiner die Tröpfchengröße ist, desto größer ist die Oberfläche des eingebrachten Wassers.

Nutzung von Einweichanlagen (Niederdrucksystem).

Normale Einweichanlagen für Schweineställe mit relativ großer Tropfenbildung (60 Micron) sind für die Kühlung von Schweineställen kaum geeignet. Da sie aber sehr häufig vorhanden und auch stationär eingebaut sind, werden sie in der Praxis dennoch für die Kühlungen eingesetzt. Beim Betrieb dieser Anlagen für die Kühlung ist deshalb darauf zu achten, dass möglichst feinerstäubende Düsen eingesetzt werden. Hierfür werden von den Herstellern auch spezielle Düsen für die Befeuchtung angeboten. Die Erhöhung des Pumpendrucks von 3 auf 5 bar - wenn die Leitungen es erlauben - verbessert ebenfalls das Vernebelungsergebnis.

Unter diesen Voraussetzungen sind "optimierte Einweichanlagen" bedingt geeignet, bei extremen Wärmebelastungen auch zur Kühlung eingesetzt zu werden. Die Anlagen werden in der Regel mit Zeitschaltuhren ein- und ausgeschaltet. Ein Nachtropfen der Düsen kann z.B. über Rückschlagventile, die vor jeder Düse eingebaut sind, verhindert werden. Aufgrund der Grobtropfigkeit mit ca. 60 Mikron ist die Wasseraufnahme der Luft (der Wirkungsgrad) eingeschränkt und deshalb sollte diese Art der Kühlung nur bis zu einer relativen Luftfeuchte von 70 % eingesetzt werden.

Wasseraufbereitung für Mittel- und Hochdruckanlagen.

Beim Einsatz von Mittel- und Hochdruckanlagen sind Feinfilter im Wasserzulauf einzusetzen, da sie sehr empfindlich auf verunreinigtes Wasser reagieren. Je nach standortbedingter Wasserqualität mit hohem Eisen-, Mangan- oder Kalkgehalt sind unterschiedliche Filterausführungen notwendig. So lässt sich z.B. sehr kalkhaltiges Wasser durch einen preiswerten chemischen Filter bis hin zu einem teuren Ionentauscher für ca. 1.500 € aufbereiten. Eine detaillierte Planung ist deshalb aufgrund der vorliegenden örtlichen Wasseranalyse notwendig.

#### Kühlung mit Mitteldruckanlagen

Bei Mitteldruckanlagen werden Pumpen mit einem Fördervolumen von 5 l/min bei einem Druck von bis zu 20 bar eingesetzt. Für die Wasserförderung eignen sich Kunststoffleitungen, die relativ preisgünstig und einfach zu installieren sind.

Zu große Wassertropfen und ein Nachtropfen der Düsen können bei Wasserverschwendung zu feuchten Ställen führen. Um das Nachtropfen der Düsen zu verhindern, ist zusätzlich ein Entleerungsventil am Ende des Leitungsstranges vorzusehen. Bei der Montage sollte auf einen ausreichenden Abstand zu den Stalleinrichtungen geachtet werden. Aufgrund der Grobtropfigkeit mit 30 Mikron ist der Wirkungsgrad auch hier eingeschränkt und sollte daher auch nur bis zu einer relativen Luftfeuchte von 70 % eingesetzt werden.

Im Vergleich zu Hochdruckanlagen treten Probleme durch sich zusetzende Düsen bei Mitteldruckanlagen relativ häufig auf. Besonders wenn preiswertere Düsen aus Messing anstelle von V<sub>2</sub>A Düsen verwendet werden. Messingdüsen korrodieren in der Stallluft sehr stark.

Hierdurch setzen sich die Düsenlöcher leicht zu. Werden andererseits Hochdruckdüsen verwendet, so können sich diese aufgrund ihrer feinen Lochung bei dem niedrigen Wasserdruck ebenfalls leicht zusetzen. Eine notwendige Reinigung kann dann mechanisch über eine Nadel oder über die Behandlung der Düsen in einem Zitronen- oder Essigsäurebad erfolgen.

#### Mit Hochdruckanlage kühlen

Als Pumpen werden für diesen Einsatzbereich gedrosselte Hochdruckreinigerpumpen eingesetzt, die dann einen Druck bis 70 bar erzeugen. Das Fördervolumen liegt zwischen 5 und 21 l/min. Je nach Literleistung der Pumpe können dann zwischen 60 bis 140 Düsen angeschlossen werden. Eine Hochdruckdüse kann einen Stallbereich von 6 bis 8 m<sup>2</sup> versorgen.

Der sehr feine Aerosolnebel mit 10 Mikron wird vollständig von der Luft aufgenommen, der Wirkungsgrad der Kühlung ist also optimiert. Da das eingesetzte Wasser insgesamt in der Luft verdampft, tritt keine Wasserverschwendung auf, ferner tritt kein Nachtropfen der Anlage nach dem Abschalten auf. Nachteilig ist der höhere Anschaffungspreis für die Hochdruckanlage. Um Störungen durch Korrosion zu vermeiden, sollten nur V<sub>2</sub>A-Düsen verwendet werden.

#### Kühlung durch Luftanfeuchtung im Vorraum

Eine Befeuchtung der Zuluft im Vorraum oder im Zuluftkanal hat den Vorteil, dass Fehler der Befeuchtung durch Verneblung sich nicht direkt auf das Tier auswirken. Dadurch, dass nur ein Fühler im Vorraum genutzt wird, der Gesamtstall aber über die Fühler in den Einzelabteilen geregelt werden kann, ist die Anlage technisch einfacher zu handhaben. Die direkte gezielte Steuerung einzelner Abteile nach relativer Feuchte und Temperatur (Enthalpie) ist dann zwar nicht möglich, aber auch nicht unbedingt notwendig.

Aufgrund der kleineren mit Wasser vernebelten Räume (Vorraum, Zentralgang, Zuluftkanal), sollten hierfür keine Einzeldüsen, sondern Düsenstöcke installiert werden. Das Wasser muss besonders fein vernebelt werden, um die größtmögliche Aufnahmefähigkeit für die Luft zu erreichen. Deshalb sind hierfür nur Hochdruckanlagen geeignet. Innerhalb der Kanäle oder des Vorraums dürfen keinesfalls Tropfwasserniederschläge entstehen.

#### Kühlung über Erdwärmetauscher

Diese Form der Kühlung für Schweineställe ist seit vielen Jahren erprobt. Der Vorteil dieser Anlagen liegt darin, dass im Sommer die Zuluft gekühlt und im Winter erwärmt wird. Sie haben sich aber in der Praxis wegen der hohen Kosten hinsichtlich Investition und Betrieb nicht durchsetzen können.

Hohe Luftwiderstände in den Rohren bei gleichzeitig zum Teil technischen Problemen bei der Abdichtung der Rohre haben dazu geführt, dass sie nur in Einzelfällen eingesetzt wurden. Bei der Planung sind diese Erkenntnisse zu berücksichtigen.

Wichtige Planungsdaten für Erdwärmetauscher sind:

- 200er Drainagerippenrohre
- Luftleistung je Rohr ca. 280 m<sup>3</sup>/h
- Rohrabstand mind. 50 cm untereinander

- Verlegetiefe ca. 2 m
- hoher Grundwasserstand vorteilhaft
- Druckverluste 30 bis 80 Pa

Bei der Nutzung der Erdkühle (Erdwärme) können geringere Lüfterleistungen installiert werden, die aber dann mit deutlich höheren Luftwiderständen belastet sind. Große Zuluftquerschnitte mit glattwandigen Rohren sollten gewählt werden. Ein maximaler Wirkungsgrad des Wärmeübergangs von ca. 25 % wird bei Verlegung der Rohre außerhalb des Stalles im Grundwasserspiegel erreicht. Sind die Rohre oberhalb des Grundwasserspiegels verlegt, so sind geringere Wirkungsgrade bekannt. Die Rohrverlegung mit der Zuluftführung in den Vorraum oder direkt in das Lüftungssystem sind baulich sehr aufwendig aber vorteilhaft. Die Erdwärmetauscherrohre können dabei neben oder unter dem Stall eingebaut werden.

Bei der Installation der Tauschrohre im Grundwasser ist bedeutet eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades, allerdings ist dann besonders auf die Dichtigkeit zu achten. Kondensatbildungen in den Rohren müssen über Gefälle und Pumpen abgeleitet werden, um Rohrverengungen, Dreck- und Keimanlagerungen zu verhindern. Die Lufteintritte müssen vor dem Eindringen von Ungeziefer geschützt sein.

Andere Alternativen ist das Kühlen der Zuluft durch Grundwasser. Dabei wird die Zuluft durch mit Grundwasser durchflossenen Kühlern geleitet und abgekühlt. Allerdings sind dabei sehr hohe Wassermengen und die Einrichtung sowohl von Saug- als auch von Schluckbrunnen erforderlich.

Einfacher ist da schon der Einsatz von Schotterwärmetauscher oder der Einbau von Unterflurzuluftkanälen. Auch dabei kann ein Abkühleffekt der Zuluft erreicht werden. Wesentlich bei dieser Art der Tauscher ist aber auch das Brechen von Temperaturspitzen, sowohl bei hohen Temperaturen, als auch bei niedrigen Temperaturen. Die Zulufttemperaturen werden dabei wesentlich gleichmäßiger gehalten.

## **Kontakt**

Bernhard Feller  
Landwirtschaftskammer NRW  
Nevinghoff 40  
48147 Münster