

13 Stallklima

Zum Stallklima zählen die **Lufttemperatur**, **Bauteiloberflächentemperatur**, **Wärmeleitfähigkeit** der Liegefläche, **Luftbewegung**, der **Luftfeuchtigkeitsgehalt**, der Gehalt der Luft an **Schadgasen** sowie die **Mikroorganismen** und **Staubteilchen**, im erweiterten Sinn auch **Beleuchtungsverhältnisse**, **Lärm** und **elektromagnetische Felder**. Die meisten Stallklimafaktoren wirken auf die Tiere über die Stallluft. Das Stallklima wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst (Tabelle 48).

Tabelle 48: Faktoren, die das Stallklima beeinflussen

- **meteorologische:** Außenklimabedingungen, die über die Lüftung und den Baukörper auf das Stallklima einwirken
- **tierphysiologische:** Wärme, Feuchtigkeit und Gase, die von den Tieren abgegeben werden
- **technische:** Größe und Form des Stalls, Wärmeschutz der Bauteile, Lüftung, Heizung, Beleuchtung

13.1 Wärmeproduktion und Wärmebilanz

Der Gesamtwärmeinhalt der Luft (Tabelle 49) wird als **Enthalpie** bezeichnet und setzt sich aus der **sensiblen** und **latenten Wärme** zusammen. Die sensible oder fühlbare Wärme ist die Wärmemenge (thermische Energie), die sich bei Zufuhr oder Abfuhr unmittelbar in Änderungen der Temperatur äußert und somit direkt fühl- bzw. messbar ist. Die latente Wärme oder nicht fühlbare Wärme ist die bei einem Phasenübergang (Wechsel des Aggregatzustandes) aufgenommene oder abgegebene Wärmemenge. Die Aufnahme bzw. Abgabe dieser Wärme führt zu keiner Temperaturänderung. In Tierställen haben hierbei vor allem Verdunstungs- und Kondensationsvorgänge praktische Bedeutung. Bei der Verdunstung geht sensible Wärme in latente Wärme über, so dass die messbare Temperatur abnimmt (Abkühlung durch Verdunstung). Beim umgekehrten Prozess der Kondensation wird diese Wärmemenge wieder als sensible Wärme frei (Kondensationswärme).

Tabelle 49: Wärmeinhalt (Enthalpie) der Luft in Wh/m³ in Abhängigkeit von der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte (Beispiele)

Temperatur (°C)	relative Luftfeuchtigkeit				
	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %
30	31,2	28,9	26,8	24,5	22,3
20	18,6	17,4	16,3	15,0	13,7
10	9,9	9,3	8,5	7,9	7,3
0	3,4	3,0	2,7	2,4	2,0
-10	-2,1	-2,2	-2,3	-2,4	-2,6

Der Wärmeinhalt der Stallluft wird vor allem von der Wärmeproduktion im Stall, vom Wärmeinhalt der Außenluft und von der Lüftung bestimmt. Die **Wärmeproduktion im Stall** erfolgt durch die Tiere, durch Heizung, in geringem Maße durch Beleuchtungskörper, Maschi-

nen sowie durch biologischen Abbau organischer Substanzen. Die von den Tieren produzierte Wärme entsteht beim **Energieumsatz** (Bild 12). **Homoiotherme Lebewesen** können die Körpertemperatur auf einem Wert konstant halten, der in der Regel erheblich über der Umgebungstemperatur liegt. Die **Thermoregulation** erfolgt durch Wärmebildungs- und Wärmeabgabemechanismen (Bild 13) sowie durch thermoregulatorisches Verhalten. Der Hauptanteil der von den Tieren erzeugten Wärme wird zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur verwendet, die überschüssige Wärme wird abgegeben.

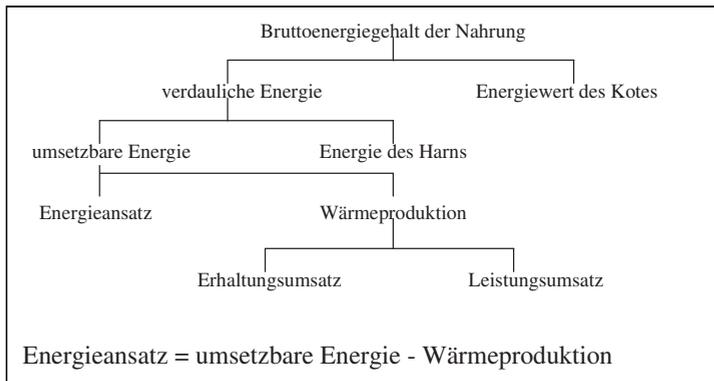


Bild 12: Energieumsatz bei Nutztieren

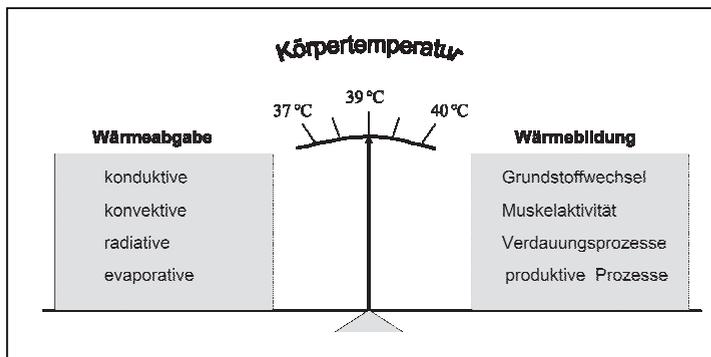


Bild 13: Wärmebildung und -abgabe

Bei der **Wärmeabgabe** ist das Oberflächen-Volumen-Verhältnis von Bedeutung. Je größer das Verhältnis, umso größer ist die Wärmeabgabe pro Masseinheit. Sie ist bei kleinen Tieren bzw. Jungtieren besonders groß. Es sind verschiedene Wärmeabgabemechanismen bekannt (Tabelle 50).

Tabelle 50: Wärmeabgabemechanismen

- **Konduktion:** Wärmeabgabe durch direkten Kontakt des Körpers mit einem anderen Medium (z.B. Liegefläche, Wasser)
- **Konvektion:** Wärmeabgabe durch ein sich bewegendes Medium (z.B. Luft)
- **Radiation:** Übertragung durch elektromagnetische Wellen (Infrarotstrahlen) vom Körper zu Oberflächen in der Umgebung
- **Evaporation:** Wärmeabgabe über Haut und Schleimhaut des Respirationstraktes (Hecheln) durch Verdunstung (ca. 2400 kJ/l Wasser); funktioniert auch, wenn die Umgebungstemperatur über der Hauttemperatur liegt, wird begrenzt durch die maximale Wasseraufnahmekapazität der Luft

Bei der Evaporation entsteht latente Wärme. Mit ansteigender Lufttemperatur gewinnt die Wärmeabgabe durch Evaporation an Bedeutung (Bild 14).

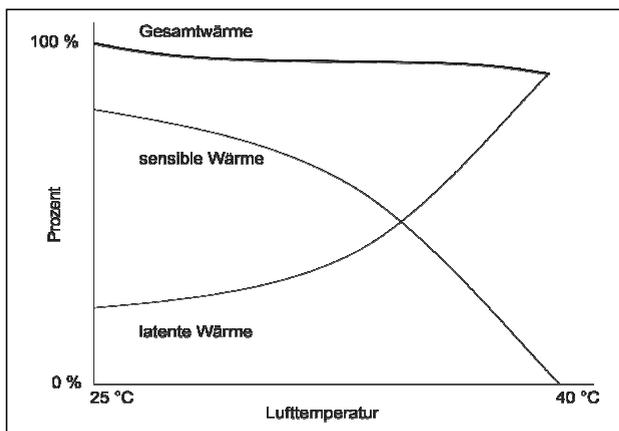


Bild 14: Beziehungen zwischen sensibler und latenter Wärmeabgabe in Abhängigkeit von der Lufttemperatur

Wärmebilanzen (Wärmehaushaltsberechnungen) haben zum Ziel, den Wärmeinhalt der Stallluft so zu gestalten, dass er für die Tiere in allen Jahreszeiten möglichst optimal ist. Als Grundlage dient die Stallbaunorm DIN 18910 (2004): Wärmeschutz geschlossener Ställe, Wärmedämmung und Lüftung - Planungs- und Berechnungsgrundlagen. Pro Zeiteinheit gelangt eine bestimmte Menge Luft mit einem bestimmten Wärmeinhalt von außen in den Stall. Dort wird sie mit der von den Tieren und anderen Quellen erzeugten sensiblen und latenten Wärme angereichert, wodurch die Enthalpie zunimmt. Die Wärme verlässt den Stall über die Lüftung und durch raumumschließende Bauteile. Ähnliches gilt auch für die Bilanz auf der Grundlage der Wasserdampf- und CO₂-Produktion.

Wärmeschutz ist die Summe der Maßnahmen zur Verringerung der Wärmeübertragung durch raumumschließende Bauteile (Transmissionswärme). Er ist von Bedeutung für die Gesundheit und Leistung der Tiere und für die Senkung des Energieverbrauchs. Es wird unterschieden zwischen

- **Wärmedämmung:** Wärmeleitfähigkeit (Baumaterial) bzw. Wärmedurchgangskoeffizient (Bauteil)

- **Wärmespeicherung:** Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung der Wärmeübertragung.

Fußböden bzw. Liegeflächen werden auf der Grundlage ihres Wärmedurchgangskoeffizienten in berührungswarm und berührungskalt unterteilt. Kaltställe (**Außenklimaställe**) besitzen keine nennenswerte Wärmedämmung. Sie werden in der Rinder-, Pferde- und Schafhaltung eingesetzt.

13.2 Stalllufttemperatur

Die Stalllufttemperatur ist abhängig von der sensiblen Wärme in der Außenluft, von der sensiblen Wärmeproduktion im Stall, von der Lüftung und vom Wärmeschutz der raumschließenden Bauteile sowie von den Vorgängen der Verdunstung und Kondensation. Neben der relativen Luftfeuchte nimmt auch die Luftbewegung Einfluss auf die Stalllufttemperatur und auf das Temperaturempfinden, weshalb diese drei Faktoren auch als **hydrothermischer Komplex** oder als Klimasummenmaß bezeichnet werden. Der Lufttemperaturbereich, in dem die Thermoregulation der Tiere den geringsten energetischen Aufwand erfordert, wird als **thermoneutrale Zone** bezeichnet (Tabelle 51). Für die praktische Anwendung werden Optimaltemperaturen abgeleitet (Tabelle 52).

Tabelle 51: Thermoneutrale Zone

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Zone des geringsten Einsatzes umsetzbarer Energie für die Thermoregulation - Zone für hohe Leistung - Zone des thermischen Wohlbefindens bzw. der thermischen Behaglichkeit - Zone wird von der Luftbewegung, Luftfeuchte, Oberflächentemperatur, Wärmedämmung der Liegefläche, von Haltungsfaktoren, der Leistung und dem Fütterungsniveau beeinflusst - Zone ist bei jungen und bei kranken Tieren höher als bei erwachsenen und gesunden Tieren (bis zu 10 °C). |
|--|

Unter- und Überschreitungen der thermisch neutralen Zone sind mit **Minderleistungen** verbunden. Ebenfalls können **Gesundheitsbeeinträchtigungen** auftreten. Beispielsweise kann bei Mastschweinen bei Unterschreitung der thermoneutralen Zone mit einer täglichen Minderzunahme von 10 bis 20 g/°C gerechnet werden. Milchkühe reagieren auf Lufttemperaturen über 25 °C mit einer Reduzierung der Milchleistung. Bei Schweinen können Lufttemperaturen über 25 °C zu einer Verschlechterung der Besamungsergebnisse führen. Ist der Organismus nicht mehr in der Lage, die Homoiothermie aufrecht zu halten, kommt es zur Hypothermie oder Hyperthermie und im Extremfall zum Kälte- oder Hitzetod. Hypothermie ist häufige Todesursache bei neugeborenen Tieren. Beim Hitzschlag tritt der Tod durch Gehirnschädigung ein, beim Hitzekollaps durch Herz-Kreislaufversagen. Chronische thermische Belastung führt zur **Immunsuppression**. Erkältungskrankheiten entstehen durch Drosselung der Blutversorgung infolge thermoregulatorischer Kontraktion peripherer Gefäße einschließlich konsensueller Gefäßreaktionen. Dadurch kommt es zur Schwächung der Barrierefunktion betroffener Zellen und Gewebe gegenüber Infektionserregern. Besonders bei jungen Tieren spielt die Umgebungstemperatur eine entscheidende Rolle. So zeigen neugeborene Ferkel bei 18 °C Umgebungstemperatur deutliche Schwächen bei der Bewältigung einer Infektions- bzw. Endotoxinbelastung im Vergleich zu 34 °C. Kälber, die niedrigen (4 °C) oder hohen

Lufttemperaturen (35 °C) ausgesetzt wurden, zeigen eine erhöhte Erkrankungsrate an Rinder-grippe.

Tabelle 52: Beispiele für leistungsorientierte Optimalbereiche der Lufttemperatur

Tierart	Optimalbereich
Sauen, Eber	10-18 °C
Sauen mit Ferkeln	12-20 °C
Ferkel – Zonenheizung	32-20 °C
Mastschweine 20 bis 100 kg	22-14 °C
Kälber bis 60 kg	16-20 °C
Mastkälber bis 150 kg	20-10 °C
Jungrinder, Mastrinder, Milchkühe	0-20 °C
Reitpferde	12-16 °C
Arbeitspferde	10-14 °C
Mastlämmer 10 bis 40 kg	18-10 °C
Schafe	8-18 °C

13.3 Luftfeuchte

Es gibt mehrere Kenngrößen zur Charakterisierung der Luftfeuchte (Tabelle 53). Für Berechnungen von Lüftungsraten wird die absolute Feuchte verwendet. Zur tierhygienischen Beurteilung dient die relative Feuchte.

Die Wasserdampfmenge (**absolute Luftfeuchte**) in der Stallluft ist abhängig von der Wasserdampfmenge der Außenluft, von Verdunstungsprozessen im Stall, von der Stalllufttemperatur (Tabelle 54) und der Lüftungsrate. Die Wasserdampfproduktion im Stall erfolgt durch die Tiere und von feuchten Flächen. Bei der Verdunstung von Wasser wird ein Teil der im Stall vorhandenen sensiblen in latente Wärme umgewandelt, wodurch die Stalllufttemperatur sinkt, aber die im Stall vorhandene Gesamtwärme unverändert bleibt.

Tabelle 53: Luftfeuchte

- **absolute Feuchte:** Wasserdampfmenge in g pro m³ Luft (begrenzt durch die Sättigungsfeuchte)
- **maximale feuchte (Sättigungsfeuchte):** Wasserdampfmenge, die bei einer gegebenen Lufttemperatur maximal aufgenommen werden kann
- **relative Feuchte:** Verhältnis der absoluten Feuchte zur Sättigungsfeuchte in %
- **Taupunkt:** Lufttemperatur, bei der für eine gegebene Situation die Sättigungsfeuchte erreicht ist

Die **relative Luftfeuchte** beeinflusst den Wärmehaushalt der Tiere erheblich. Außerdem begünstigt erhöhte relative Luftfeuchte die Überlebensfähigkeit von Mikroorganismen, wodurch es u.a. zu einer Infektionsgefährdung der Atemwege kommen kann. Die relative Feuchte der Stallluft sollte bei optimalen Lufttemperaturen 50 bis 90 % betragen. Sie sollte nicht unter 40 % fallen (Austrocknen der Schleimhäute, erhöhte Staubbildung). Bei hoher relativer Luftfeuchte und niedriger Lufttemperatur kann es zur erhöhten Wärmeabgabe der Tiere kommen. Hohe relative Luftfeuchtigkeit bei hoher Lufttemperatur (**Schwüle**) erschwert die evaporative Wärmeabgabe der Tiere. **Kondenswasserbildung** an Fenstern, Wänden und Decken tritt auf, wenn an den Flächen der Taupunkt erreicht wird. Eine **Dampfsperre** verhindert, dass Luft-

feuchte und Kondensat in die Bauteile (Poren) eindringt und dadurch deren Wärmedämmeigenschaften reduziert werden.

Tabelle 54: Wasserdampfgehalt der Luft (g/m³) in Abhängigkeit von der Lufttemperatur bei verschiedenen Luftfeuchten (Beispiele)

Temperatur (°C)	absolute Feuchte (g/m ³) in Abhängigkeit von Lufttemperatur (°C) und relativer Luftfeuchte (%)				
	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %
30	28,95	26,05	23,16	20,26	17,37
20	16,49	14,84	13,19	11,54	9,89
10	6,96	8,07	7,17	6,27	5,38
0	4,62	4,16	3,70	3,24	2,77
-10	2,05	1,85	1,39	1,44	1,23

13.4 Luftbewegung

Im Optimalbereich der Lufttemperatur soll die **Luftgeschwindigkeit** 0,1 bis 0,3 m/s betragen. Steigt die Luftgeschwindigkeit, nimmt die Wärmeabgabe durch Konvektion zu und die Grenzen der thermoneutralen Zone verschieben sich nach oben. Die Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von 0,1 auf 0,8 m/s erhöht den Gesamtwärmeverlust bei einem 70 kg schweren Mastschwein um 13 %. In Tiernähe soll eine turbulente und keine gerichtete Strömung vorliegen. Unter **Zugluft** versteht man einen gerichteten Luftstrom, der das Tier partiell trifft und kälter als die sonst umgebende Luft ist. Unter Zuglufteinfluss können besonders Tiere stehen, die angebunden sind und deshalb nicht ausweichen können. Zugluft führt häufig zu Erkältungskrankheiten.

13.5 Luftverunreinigungen

Hygienische bedeutsame Verunreinigungen der Stallluft sind vor allem Gase, Staub, Mikroorganismen und Endotoxine. Kein Körperorgan steht in so starker Wechselwirkung mit seiner Umwelt wie das Atmungssystem, weshalb Luftverunreinigungen besonders dieses Organsystem schädigen können.

13.5.1 Gase

Nicht verunreinigte Luft besteht etwa zu 78 Vol % aus Stickstoff, zu 21 Vol % aus Sauerstoff, zu 0,035 Vol % aus Kohlendioxid, der Rest sind Edelgase. Quelle für gasförmige Verunreinigungen der Stallluft sind außer beim CO₂, das primär von den Tieren abgeatmet wird, Gärungs- und Fäulnisprozesse im Stall lagernder Tierausscheidungen. Als **gesundheitsgefährdende Gase** (Tabelle 55) sind Ammoniak und Schwefelwasserstoff zu nennen. Ammoniak, Kohlendioxid, Methan und Lachgas sind **umweltrelevante Gase** (Kapitel 14). Der **Geruch** ist ein Summeneffekt vieler Geruchsstoffe (Osmogene). Besondere Geruchs- und Ekelstoffe sind beispielsweise Indol, Skatol, Merkaptane sowie sekundäre Amine. Einzelne Gase sind für die Ermittlung der Intensität des Geruchs der Stallluft nicht geeignet. Staubpartikel spielen als Geruchsträger eine Rolle. Nehmen Futterstoffe Stallgeruch an, werden diese vermindert aufgenommen, was besonders bei Schweinen beobachtet werden kann.

Tabelle 55: Gase in der Stallluft und deren Wirkungen auf Tiere (1 Vol % = 10⁴ ppm)

Gas	Außenluft Normalwert	Stallluft Richtwert	Wirkung erhöhter Konzentration
Ammoniak	0 Vol %	20 ppm	ab 30 ppm Schleimhautreizung ab 50 ppm erhöhte Infektionsrate ab 300 ppm Krampfneigung
Schwefelwasserstoff	0 Vol %	5 ppm	ab 10 ppm Leistungsminderung ab 150 ppm ZNS-Störungen ab 500 ppm tödlich
Kohlendioxid	0,035 Vol %	3000 ppm	4 Vol % in der Expirationsluft ab 3 Vol % Atembeschleunigung ab 4 Vol % Schläfrigkeit ab 8 Vol % Bewusstlosigkeit
Kohlenmonoxid	0 Vol %		ab 20 % CO-Hb klinische Symptome ab 60 % CO-Hb Tod
Sauerstoff	21 Vol %		16 Vol % in der Expirationsluft ab 12 Vol % Atembeschwerden ab 10 Vol % Bewusstlosigkeit

Ammoniak

Ammoniak ist ein farbloses, stechend riechendes Gas, leichter als Luft und sehr gut wasserlöslich. Es ist das **Hauptschadgas** in der Stallluft und entsteht bei Fäulnis eiweißhaltiger Verbindungen (Gülle, Jauche, Einstreu). Die Aktivität der beteiligten Bakterien ist im basischen Milieu sowie bei sommerlichen Temperaturen am stärksten. Hohe NH₃-Konzentrationen können bei mangelhafter Sauberkeit, großen emittierenden Oberflächen, fehlerhafter Lüftung und bei Güllebewegung (Zerstörung der Schwimmdecke) auftreten. Durch Protein-angepasste Fütterung kann die NH₃-Bildung reduziert werden und die NH₃-Konzentration durch Versprühen von Wasser oder durch Verstreuen von Superphosphat gesenkt werden. Auf Schleimhäuten wird NH₃ in Ammoniumhydroxid umgewandelt, das zur Schädigung der Zellen führt. Besonders betroffen sind die Schleimhäute der Atemwege, wodurch die **Lungen-clearance** herabgesetzt wird und Krankheitserreger leichter in das geschädigte Gewebe eindringen können. Außerdem kommt es zu Ödemen, Hämorrhagien und Emphysemen in den Bronchien und Alveolen. Die Alveolenwände verdicken und es wird eine Lipoidschutzschicht gebildet. Dies führt zu einer Hemmung des **Gasaustauschs**, wodurch es zu Leistungsminderungen kommt. Als Richtwert gelten maximal **20 ppm** NH₃ in der Stallluft. Bei Konzentrationen über 30 ppm treten reduzierte Futtermittelaufnahme, Minderzunahmen und reduziertes Ruheverhalten auf. Beim Menschen können durch erhöhte NH₃-Konzentrationen Übelkeit, Kopfschmerzen, Verdauungsstörungen und chronischer Bronchialkatarrh auftreten. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) beträgt 20 ppm. Ammoniak ist am sauren Regen, an Waldschäden und an der Gewässereutrophierung beteiligt.

Schwefelwasserstoff

Schwefelwasserstoff ist ein farbloses Gas, das nach faulen Eiern riecht und etwas schwerer ist als Luft. Es ist hoch toxisch und entsteht durch Fäulnis schwefelhaltiger eiweißreicher Stoffe. Hohe Temperaturen begünstigen die Entstehung des Gases. Durch regelmäßige Reinigungsmaßnahmen sind Fäulnisprozesse im Stall zu unterbinden. Bei der Bewegung von Gülle (Zerstörung der Schwimmschicht) werden größere Gasmengen freigesetzt. Deshalb ist beim Lee-

ren der Güllebehälter der Schieber zum Stall zu schließen. Als Richtwert gelten **5 ppm**. Bei etwa 20 ppm kommt es bei längerer Exposition zu **Reizerscheinungen** in den Atemwegen und zu Inappetenz. Schwefelwasserstoff gilt als **Blut- und Nervengift**. Im Blut wird das im Hämoglobin enthaltene Eisen in Eisensulfid überführt. Es entsteht Sulfhämoglobin, das Sauerstoff nicht binden kann. Ab 200 ppm kommt es zur Schädigung der Geruchsnerve und dadurch nicht mehr zur Wahrnehmung des Geruchs von Schwefelwasserstoff. Bei 500 ppm tritt der Tod durch Lähmung des Atemzentrums ein. Beim Aufrühren bzw. Pumpen von Gülle können Konzentrationen von 1500 bis 2000 ppm auftreten, ebenso in entleerten Güllebehältern, weshalb bei Reparaturarbeiten Vergiftungsgefahr besteht. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) beträgt 10 ppm. Todesfälle bei Menschen und bei Sauen sind beschrieben.

Kohlendioxid

Kohlendioxid (CO_2) ist ein farbloses Gas, schwach säuerlich im Geruch und Geschmack und schwerer als Luft. Etwa 80 % des Kohlendioxids in der Stallluft stammen von den Tieren als Produkt des Stoffwechsels (3 - 4 Vol % CO_2 in der Expirationsluft). Es bestehen enge Beziehungen zwischen der CO_2 - und der Wärmeproduktion (kalorisches Äquivalent). Die CO_2 -Menge im Stall kann zur Berechnung der **Lüftungsrate** (CO_2 -Maßstab) bzw. zur Kontrolle des Luftaustausches genutzt werden. Kohlendioxid ist in den Konzentrationen, die im Stall normalerweise vorkommen, kein Schadgas. 3000 ppm (0,3 Vol %) sind als Richtwert für eine funktionstüchtige Lüftung zu betrachten. Schädwirkungen treten bei Tieren erst bei extrem hohen Konzentrationen auf, die im Stall kaum erreicht werden. Um 3 Vol % CO_2 kommt es zu einer Erregung des Atemzentrums sowie zu verringerter Futteraufnahme und zum Leistungsabfall, ab 4 Vol % zu Schläfrigkeit, ab 8 Vol % kann Bewusstlosigkeit auftreten. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) beträgt 5000 ppm. CO_2 ist am **Treibhauseffekt** beteiligt.

Kohlenmonoxid

Kohlenmonoxid (CO) entsteht bei unvollständiger Verbrennung. Es hat eine stärkere Affinität zu Hämoglobin als Sauerstoff (CO-Hb), wodurch der **Sauerstofftransport** beeinträchtigt wird.

Methan

Methan (CH_4) ist ein farb- und geruchloses Gas, brennbar und leichter als Luft. Es entsteht durch anaerobe bakterielle Zersetzung organischer Materie, besonders von Zellulose. Hauptproduzenten in der Tierhaltung sind die Rinder (Pansengase). Methan tritt auch in Jauche- und Dunggruben, in Güllelagerbehältern und gezielt bei der Biogasgewinnung auf. Gesundheitsschädigende Wirkungen des CH_4 sind nicht bekannt. Bei ausreichender Lüftung besteht keine Gefahr der Entstehung explosiver Methan-Luft-Gemische. Methan ist am **Treibhauseffekt** und an der Zerstörung der **Ozonschicht** beteiligt.

Lachgas (Distickstoffoxid)

Lachgas (N_2O) ist an der Zerstörung der **Ozonschicht** und am **Treibhauseffekt** beteiligt. Eine Schädwirkung bei Tieren ist nicht bekannt. Lachgas entsteht in Einstreumaterialien beson-

ders in der thermophilen Phase, wenn die Temperaturen für das Wachstum der nitrifizierenden Bakterien zu hoch sind. Einstreusysteme emittieren im Vergleich zu Spaltenbodenhaltungen zehnmal mehr Lachgas.

13.5.2 Staub und Mikroorganismen

Bioaerosole (organischer Staub) sind disperse Verteilungen von Partikeln biologischen Ursprungs (u.a. Pilzsporen, Konidien, Hyphenbruchstücke, Bakterien, Viren, Pollen sowie deren Zellwandbestandteile und Stoffwechselprodukte) in Gasen. Der aerodynamische Durchmesser von Bioaerosolen schwankt zwischen 0,5 und 100 µm.

Tabelle 56: Zusammensetzung von Stallstaub

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Kot-, Futter-, Einstreu-, Haut-, Haarpartikel - Bakterien (Antibiotikaresistenz), Pilze, Viren - Endotoxine, beta-Glukane, Mykotoxine - Allergene (Staubeiweiße), biogene Amine - Gase, Geruchsstoffe - Medikamente |
|--|

Quellen für **Staub** im Stall sind hauptsächlich getrocknete Fäkalien, Einstreu, Tieroberflächen (Hautschuppen, Haare, Federn) und Futterreste. Staubpartikel im Stall enthalten Mikroorganismen, Medikamente und auch Geruchsstoffe (Tabelle 56). Das Staubvorkommen ist abhängig von der Tierart, der Besatzdichte, der Jahres- und Tageszeit sowie vom Haltungsverfahren. Die Konzentration an Partikeln in der Stallluft wird von einer Anzahl von Faktoren beeinflusst, wie Zuluft, Abluft und Sedimentation auf Oberflächen. Die Sedimentation auf Oberflächen ist meist nur vorübergehend, da die Partikel wieder in die Stallluft gelangen können („**reentrainment**“). Die Partikel fungieren auch als Kondensationskerne für Wassermoleküle. Staub kann auf die Haut und den Atemtrakt von Menschen und Tieren infektiös (airborne diseases) sowie toxisch und allergisch (Dämpfigkeit, Asthma) wirken. Hohe NH₃-Konzentrationen können die negativen Effekte einer Staubbelastung verstärken.

Im Bereich der Arbeitsmedizin wird je nach Größe der Staubpartikel zwischen **einatembarem** und **alveolengängigem Staub** unterschieden. Kleinere Partikel (< 5 µm) sind größtenteils alveolengängig. Der Anteil des alveolengängigen Staubs am einatembaren Staub der Stallluft beträgt 9 bis 12 %. Ultrafeinstäube (Partikel mit Durchmesser < 0,1 µm) können in das Interstitium eindringen und in der Lunge zu schweren Entzündungen führen. Hohe Staubkonzentrationen treten in der Schweine- und Geflügelhaltung, insbesondere bei der Einstreuhaltung auf. Als maximale Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK-Wert) werden für den einatembaren Staub 4 mg/m³ und für den alveolengängigen Staub 1,5 mg/m³ angegeben. In der Umweltanalytik werden Staubpartikel auf Grundlage des aerodynamischen Durchmessers eingeteilt. PM₁ PM_{2,5} oder PM₁₀ bedeutet particulate matter kleiner als 1, 2,5 bzw. 10 µm.

Indirekt wird durch Staub die Wirkung von Lüftung und Beleuchtung beeinträchtigt (Ablagerung auf Lüfterschaukeln, Verschmutzen von Lampen).

Der **Keimgehalt** ist in der Milchviehhaltung geringer als in der Schweinehaltung und bei der Bodenhaltung mit Einstreu von Geflügel besonders hoch (Tabelle 57). Die Zahl der Außenluftkeime im ländlichen Raum liegt bei 0,002 bis 4 Kbe/l, dagegen in der Hühnerhaltung bis

5000 Kbe/l. Etwa 80 % der luftgetragenen Bakterien, Pilze, Viren und Protozoen sind an Staubpartikeln (Cluster) angelagert. Durch Bindung im feuchten Staub wird die Überlebensfähigkeit der Keime durch Schutzwirkung des Staubs sowie durch verfügbares Wasser und Nährstoffe erhöht. Der aerodynamische Durchmesser der Stallkeime liegt bei etwa 2 µm (0,5 bis 5 µm). Die mittlere Verweildauer in der Luft beträgt etwa 10-15 min. Luftgetragene Bakterien setzen sich in der Rinder-, Schweine- und Geflügelproduktion zu 80 % aus Staphylokokken und Streptokokken zusammen und stammen hauptsächlich von den Hautoberflächen der Tiere. Schimmelpilze und Hefen nehmen einen Anteil von über 1 % und gramnegative Bakterien einen Anteil von 0,02 bis 5,2 % ein. Sie stammen vor allem aus dem Futter und dem Kot. Die dominierende gramnegative Bakterienfamilie ist die der Enterobacteriaceae. Um das Infektionsrisiko (Infektionsdruck) einschätzen zu können, ist die Bestimmung von Indikatorbakterien in der Stallluft möglich. Resistenzspektren von Staphylokokken stellen ein Spiegelbild der im Stall angewendeten Antibiotika dar.

Tabelle 57: Durchschnittlicher Gehalt aerober Bakterien in der Stallluft

Tierart	Keimgehalt (Kbe/l Luft)	akzeptable Werte (Kbe/l Luft)
Rinder	< 560	50 bis 400
Kälber	< 85	50 bis 100
Schweine		
- Abferkelstall	< 1400	800 bis 1000
- Maststall	< 600	300 bis 500
Hühner		
- Bodenhaltung	< 5000	1500 bis 3000
- konventionelle Käfighaltung ¹	< 365	50 bis 200

¹ in der EU seit 2012 verboten

Endotoxine in der Stallluft rufen in der Lunge Entzündungen, vermehrte Schleimbildung, bronchiale Obstruktionen sowie Surfactant-Fehlfunktion hervor (Lungeninsuffizienz). Sie stimulieren Makrophagen, die zahlreiche Zytokine wie Tumor-Nekrose-Faktor-Alpha und Interleukine (IL) freisetzen. Die durchschnittlichen Endotoxinkonzentrationen liegen in Rinderställen bei 140 EU/m³, in Schweineställen bei 670 EU/m³ und in Geflügelställen bei 2000 EU/m³. **Beta-Glukane** sind Zellwandbestandteile von Pilzen. Diese können ebenfalls zur Freisetzung von Zytokinen führen und entzündliche Reaktionen auslösen. **Mykotoxine** sind Sekundärmetaboliten von Pilzen. Sie wirken u.a. immunsuppressiv sowie karzinogen. **Aeroallergene** sind hauptsächlich Pilzsporen, Pollen oder tierischer Herkunft (z.B. Proteine, Epithelien, Haare). **Biogene Amine** können auch im Staub enthalten sein. Sie entstehen durch bakteriell-enzymatische Decarboxylierung von Aminosäuren und erhöhen die Kapillarpermeabilität. Außerdem können sie allergische Reaktionen sowie Bronchokonstriktionen auslösen. Auch **Arzneimittel**, die von behandelten Tieren stammen, können in die Stallluft gelangen.

Bioaerosole in der Stallluft stellen auch für Menschen eine Gefahr dar. 60 % der Beschäftigten in der Schweineproduktion berichten über Beschwerden nach Arbeiten im Stall (Entzündung der Atemwege, Asthmaanfälle, Fieber, Kopfschmerzen). Als typische Erkrankungen können die toxische Pneumonitis (Organic Dust Toxic Syndrome,) chronische Bronchitis und die allergische Alveolitis auftreten. Bei hohen Staubkonzentrationen müssen Atemschutzmasken getragen werden. Die artgerechte Haltung mit viel Einstreu führt zu einer stärkeren Belastung der Beschäftigten mit biologischen Stoffen im Vergleich zu einstreulosen Ställen.

13.6 Lüftung

Durch die Lüftung des Stalles sollen überschüssige Wärme (sensible und latente) und Luftverunreinigungen, die in erster Linie von den Tieren stammen, an die Außenluft abgeführt und frische Außenluft zugeführt werden.

Im Winter hat die Lüftung hauptsächlich die Aufgabe, den entstehenden Wasserdampf ausreichend und die in der Stallluft vorhandene sensible Wärme so wenig wie möglich abzuführen. Hieraus ergibt sich die Mindestlüftungsrate, die auf der Grundlage der **Wasserdampfbilanz** berechnet wird. Für den Sommer wird die maximale Lüftungsrate auf der Grundlage der **Wärmebilanz** berechnet. Die Lüftung hat im Sommer die vorrangige Aufgabe, die überschüssige sensible Wärme abzuführen. Die Differenz zwischen **minimaler** und **maximaler Lüftungsrate** ist die Regelbreite der Lüftungsanlage. Neben der Berechnung der Lüftungsrate auf der Grundlage der **Wasserdampf-** oder **Wärmebilanz** kann sie auch auf der Basis der **Kohlendioxidbilanz** berechnet werden (Tabelle 58). Unter Berücksichtigung der maximalen Lüftungsrate je Tier (Tabelle 59) und der Anzahl der Tierplätze im Stall ergibt sich der maximale Luftvolumenstrom für den jeweiligen Stall, der für die Dimensionierung der Lüftungsanlagen (Querschnitt der luftführenden Bauteile, Auswahl der Ventilatoren) von grundlegender Bedeutung ist. Der niedrigere Lüftungsbedarf in den Wintermonaten ist über die Lüftungssteuerung zu regeln.

Tabelle 58: Bildung von sensibler Wärme und Gesamtwärme sowie Wasserdampf und Kohlendioxid

Tierart	Gewicht kg	Lufttemp. °C	Bildung von			
			sens. Wärme W/Tier	Gesamtwärme W/Tier	Wasserdampf g/Tier h	CO ₂ l/Tier h
Kuh	600	10	906	1123	323	149
Kalb	50	10	142	176	50	24
Pferd	700	10	758	937	265	124
Sau (säugend)	250	14	400	516	172	65
Ferkel	5	28	23	26	4,1	4
Mastschwein	100	15	222	286	95	36
Legehennen	2,0	18	11,4	15,2	5,6	1,85

Tabelle 59: Ausgewählte Lüftungsraten für den Sommer und den Winter nach DIN 18910

Tierart	Gewicht (kg)	Lüftungsrate (m ³ /Tier h)		
		Winter	Sommer	
			Temperaturzone > 26 °C	Temperaturzone < 26 °C
Milchkuh (30 l Milch)	600	81,8	322	241
Mastkalb	100	17,7	52	39
Pferd	500	36,2	213	160
Sau (säugend)	200	30	300	230
Läufer	20	5,4	40	26
Mastschwein	100	14,1	108	72
Legehennen	2	0,7	5,8	3,9

Als Lüftungsarten unterscheidet man die **freie Lüftung** und die **Zwangslüftung** (Tabelle 60). Bei der Zwangslüftung wird der notwendige Luftaustausch mit Hilfe von Ventilatoren realisiert. Entsprechend der Anordnung der Ventilatoren können Unter-, Über- oder Gleichdrucklüftung unterschieden werden. In der Praxis ist die Unterdrucklüftung am stärksten verbreitet und wird insbesondere in Geflügel- und Schweineställen eingesetzt. Bei der Freien Lüftung wird der Luftwechsel durch Druckunterschiede, die durch thermischen Auftrieb (Auftriebslüftung) und/oder Wind (windinduzierte Lüftung) bedingt werden, hervorgerufen.

Um Zugluft zu vermeiden, darf zugeführte Luft im Tierbereich nicht 5 °C oder 5 K (Kelvin) kälter sein als die Stallluft. Die Kühlwirkung durch Luftbewegung kann bei hohen Stalllufttemperaturen ausgenutzt werden. Bei Lüftungsanlagen muss sichergestellt sein, dass die Lärmemission im Aufenthaltsbereich der Tiere auf ein Mindestmaß begrenzt ist.

Tabelle 60: Lüftungsarten

Freie Lüftung:

- **windinduzierte Lüftung:** Fenster- oder Querlüftung, Stallgebäude sind mit der Längsachse quer zur Hauptwindrichtung zu errichten und sollten nicht breiter als 12 m sein, an der Luvseite strömt Frischluft in den Stall (Überdruck), an der Leeseite entweicht die Abluft (Sog), bei absoluter Windstille Einsatz von Umluftventilatoren notwendig
- **Offenfront-Lüftung:** in Offenfrontställen erfolgt der Luftaustausch im Wesentlichen über die offene Stallseite durch Wind und Temperaturunterschiede, die offene Stallseite kann mit Windschutznetzen versehen werden, damit die Zuluftgeschwindigkeit gebremst wird (vermeiden von Zugluft), bei heißen Wetter sollte die Möglichkeit der Öffnung der gegenüberliegenden Stallwand bestehen, wodurch eine Querlüftung entsteht (vermeiden von Hitzestau)
- **Auftriebslüftung:** Schwerkraft- oder Trauf-First-Lüftung, Wärmegradient zwischen Stallluft und Außenluft erforderlich, warme Luft (sowie mit Feuchtigkeit und Verunreinigungen beladene Luft) wird über Öffnungen im Dach an die Außenluft abgegeben, Außenluft strömt über Eintrittsöffnungen in den Stall, Kombination mit Querlüftung möglich, im Sommer eingeschränkte Funktion, eignet sich besonders für die Rinder- und Schafhaltung mit Weidebetrieb im Sommer

Zwangslüftung (Ventilatorlüftung):

- **Unterdrucklüftung:** Abluft wird durch Ventilatoren abgesaugt, Frischluft strömt nach
- **Überdrucklüftung:** Zuluft wird durch Ventilatoren in den Stall gedrückt, Abluft entweicht, Zuluft kann über Heizelemente geführt werden
- **Gleichdrucklüftung:** Ventilatoren drücken die Zuluft in den Stall, Abluft wird gleichzeitig durch Ventilatoren abgesaugt, diese Kombination kann sich bei sehr breiten Ställen als notwendig erweisen

13.7 Heizung und Kühlung

Insbesondere während der Wintermonate kann der Einsatz einer Heizung zur Aufrechterhaltung der Optimaltemperaturen im Stall notwendig sein. Hierbei kommen in der Regel Warmwasserheizungs-, Elektroheizungs- und Direktverbrennungssysteme auf Gas- und Ölbasis zum Einsatz. Um den unterschiedlichen Wärmeansprüchen von Jung- und Muttertieren gerecht zu werden, können sogenannte Zoonenheizungen eingesetzt werden, die eine gezielte Beheizung einzelner Stallbereiche (z.B. Ferkelnester) ermöglichen.

Energiesparend und umweltschonend sind Verfahren der **Wärmerückgewinnung**. Dabei sind die Abluft- und Zuluftströme voneinander zu trennen, um eine Kontamination der Zuluft zu

vermeiden. Ein zu starkes Aufwärmen des Stalls durch hohe Außenlufttemperaturen ist durch bauliche Maßnahmen des Wärmeschutzes sowie durch adäquate Lüftung zu vermeiden. Eine Abkühlung kann durch Befeuchtung der Zuluft (**adiabatische Kühlung**) oder von Stallflächen erreicht werden. Durch die Verdunstung wird die sensible Wärme reduziert. Es kann eine Senkung der Temperatur um 5 °C, bei Feinversprühung bis um 8 bis 10 °C erreicht werden. Bewährt haben sich auch so genannte cooling pads. Bei hohen Lufttemperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit kann es aber durch den Schwülefaktor zu extremen Belastungen der Tiere kommen. Die Kühlung der Luft reduziert auch die Gas- und Geruchsbildung. Eine Möglichkeit, die Luft im Sommer zu kühlen und im Winter aufzuwärmen, sind **Erdwärmetauscher** (im Erdreich verlegte, mit Zuluft durchströmte Rohre). Biogas kann im Winter zur Heizung und im Sommer zur Kühlung durch Antrieb einer Absorberkühlanlage eingesetzt werden. Zur Klimatisierung kann auch Sonnenenergie verwendet werden.

13.8 Licht und Beleuchtung

Die Wirkung des sichtbaren Lichtes erfolgt in erster Linie über die Epiphyse und das Hormon Melatonin. Der vom Menschen sichtbare Teil der Lichtstrahlung besitzt eine Wellenlänge von 400 bis 780 nm. Die UV-Strahlung umfasst den Strahlenbereich von 200 bis 400 nm (UV-A 325 bis 400 nm, UV-B 280 bis 325 nm, UV-C unter 280 nm). Die UV-C Strahlen dringen nicht bis zur Erdoberfläche vor. Durch die Verringerung der Ozonschicht in der oberen Atmosphäre vermindert sich deren Filterwirkung besonders für die UV-B Strahlung. Durch die **UV-Strahlung** wird Vitamin D₃ gebildet. Bei längerer Einwirkung kommt es durch Bildung von Histamin zum Hauterythem. Die **Infrarot-Strahlung** umfasst den Strahlenbereich von 780 bis 3000 nm. Deren Absorption hat Wärmewirkung und Hyperämie zur Folge.

Licht ist ein wichtiger Zeitgeber. Biologische Prozesse beim Menschen und Tier folgen dem 24-Stunden-Rhythmus (**circadianer Rhythmus**) oder einer Jahresperiodik (**circannuale Periodik**). Deshalb ist natürlicher Lichteinfall im Stall zu fordern. Das Verhältnis Fenster- zur Stallgrundfläche sollte mindestens 1:20 betragen. Bei landwirtschaftlichen Nutztieren ist der Einfluss des Lichts auf die Fortpflanzung, die Tiergesundheit, den Stoffwechsel und die Leistung hervorzuheben. Licht hemmt die Melatoninsekretion, womit die Hemmwirkung auf die Keimdrüsenfunktion aufgehoben wird. Lichtprogramme (Steuerung von Hell- und Dunkelphasen) können bei Stallhaltung die Gesundheit und Leistung fördern. Kunstlichtergänzung ist besonders im Winter erforderlich. Schädlich sind sehr hohe Lichtintensität und Dunkelhaltung.

Für die Tierhaltung werden in Ställen **Beleuchtungsstärken** für die Tagphase von 50 bis 80 lx, im Melkstand 200 lx empfohlen. Eine gute Ausleuchtung des Stallinnern ist besonders für die Pflege, Betreuung und Gesundheitskontrolle der Tiere notwendig. Kalkung der Wände verbessert die Lichtreflexion. Bei tierärztlichen Tätigkeiten sollen 250 lx, am Behandlungsstand 1000 lx vorherrschen. Lampen und Leuchten sollten in regelmäßigen Abständen entstaubt werden. Die Beleuchtungsstärke beträgt im Freien etwa 100 000 lx bei unbedecktem Himmel und bei Bewölkung etwa 5000 lx.

13.9 Lärm

Unter **Schall** versteht man mechanische Schwingungen und Wellen materieller Teilchen in elastischen Medien. Schwingungen in festen Körpern werden als Körperschall, Schwingungen der Luft als Luftschall bezeichnet. Mittels des Gehörsinns kann nur Luftschall wahrgenommen werden. Geräusche, Klänge und Töne sind Schallarten.

Die Wahrnehmung des Schalls ist von der Lautstärke und Entfernung der Quelle abhängig. Die **Lautstärke** (Phon) wird vom Schalldruck und der Frequenz bestimmt. Die Hörschwelle des Menschen für den Schalldruck liegt bei einer Frequenz von 1000 Hz bei 2×10^{-5} Pa, ab 20 Pa tritt Schmerzempfindung ein. In der Praxis der Schallmessung wird statt des Schalldrucks der Schalldruckpegel verwendet. Der Schalldruckpegel ist das logarithmische Maß für Schalldruck in dB (Dezibel). Daraus ergibt sich eine Skala für den Hörbereich des Menschen von 0 (Hörschwelle) bis 120 dB (Schmerzschwelle). Der gemessene Schalldruck wird mit Hilfe von Faktoren korrigiert (A, B, C). Gute Beziehungen zur frequenzabhängigen Wahrnehmung des menschlichen Ohres ergibt der nach der Lautstärke bewertete Schalldruckpegel A (dB (A)). Jede Zunahme um 10 dB (A) entspricht einer Verdopplung der Lautstärkewahrnehmung. Linien gleicher Lautstärke sind Isophone. Das menschliche Ohr empfindet Töne trotz objektiv gleichen Schalldrucks lauter oder leiser je nach Tonhöhe (Frequenz). Die Hörbreite liegt beim Menschen im Frequenzbereich zwischen 20 bis 20 000, beim Schaf zwischen 100 bis 40 000, beim Hund bis 30 000, bei der Katze bis 60 000 und bei der Maus bis 100 000 Hz.

Lärmschäden

Als **Lärm** wird Schall bezeichnet, der durch seine Lautstärke und Struktur gesundheitsschädigend oder störend bzw. belastend wirkt. Lärm kann über das zentrale und vegetative Nervensystem zu Schlafstörungen, Bluthochdruck, ischämischen Herzkrankheiten, Immunsuppression und Anhebung des Grundumsatzes führen, aber auch Hörschäden bewirken. Lärm kann Aggressionen auslösen, ablenken, zu Fehlleistungen führen und Unfälle begünstigen. Lautstärken über 120 dB (A) wirken direkt auf innere Organe und auf das zentrale Nervensystem. Sonst müssen sämtliche Geräusche zunächst das Ohr passieren, bevor sie ihre Wirkungen im Organismus entfalten können (Tabelle 61).

Tabelle 61: Beispiele für Lautstärken und Lärmstufen und deren Wirkung auf den Organismus

Lautstärken

- Ticken einer Uhr: 10-20 dB (A)
- normaler Wohnungslärm: 40-50 dB (A)
- Straßenlärm: 70-80 dB (A)
- Düsenflugzeug beim Start: 120-140 dB (A)
- Tierhaltung: ohne Ventilatoren 50- 60 dB (A), mit Ventilatoren 60-80 dB (A), Tier- und mechanische Geräusche bei der Fütterung bis 90-110 dB (A)

Lärmstufen

Entsprechend der Wirkung auf den Organismus können 4 Lärmstufen unterschieden werden:

- Lärmstufe I, 30-65 dB (A): Belästigung
- Lärmstufe II, 65-90 dB (A): Gefährdung, physiologische und pathologische Effekte
- Lärmstufe III, 90-120 dB (A): Schädigung, Hörstörungen bis Taubheit
- Lärmstufe IV, > 120 dB (A): mechanische Schäden, Schmerz