

# **EMIBAU**

## **Vorsorgliche Emissionsminderungsmaßnahmen bei Bauinvestitionen in der Landwirtschaft**

### **Schlussbericht**

**Autor**

Michael Zähler

Agroscope FAT Tänikon  
Eidgenössische Forschungsanstalt für  
Agrarwirtschaft und Landtechnik  
CH-8356 Ettenhausen

Teilfinanziert und im Auftrag von  
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)

Tänikon, 8. Februar 2005

# Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	5
Abkürzungen .....	6
Zusammenfassung .....	7
1 Einleitung .....	8
1.1 Problematik .....	8
1.2 Zielsetzung.....	8
1.3 Auftrag .....	8
2 Literaturübersicht .....	9
2.1 Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung.....	9
2.2 Haltungssysteme von Milchkühen in der Schweiz .....	9
2.3 Ammoniakemissionen verschiedener Haltungssysteme.....	11
2.4 Einflussfaktoren auf die Ammoniakemissionen .....	11
3 Minderungsmaßnahmen der Ammoniakemissionen .....	14
3.1 Fütterungsmaßnahmen .....	14
3.2 Flüssigmistbehandlung .....	18
3.3 Organisatorische Maßnahmen .....	21
3.4 Bauliche Massnahmen.....	22
3.5 Weitere Massnahmen .....	23
4 Umsetzbarkeit der Minderungsmaßnahmen.....	26
5 Typische Stallkonzepte .....	27
5.1 Beschreibung der verschiedenen Stalltypen.....	27
5.2 Ammoniakemissionen der verschiedenen Stalltypen .....	31
6 Empfehlungen für die Praxis .....	35
7 Forschungsbedarf und offene Fragen.....	36
8 Literaturverzeichnis .....	37

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verteilung der Ammoniakmissionen nach Quelle, Tierart und Entstehungsort in der Schweiz im Jahr 2000 (BUWAL 2004, Reidy und Menzi 2004). .....	9
Abbildung 2:	Vor- und Nachteile von Aussenklimaställen, teilweise auch von Laufställen allgemein, ermittelt anhand einer Umfrage auf 74 Praxisbetrieben (Zähner et al. 2000).....	10
Abbildung 3:	Verschiedene Stallkonzepte, verändert nach der Entscheidungspyramide von Van Caenegem et al. (1996).....	10
Abbildung 4:	Anteil des aufgenommenen Stickstoffs in Kot, Harn, Milch und Reserven bei unterschiedlichem Rohproteingehalt im Futter (Kröber et al. 2000). .....	16
Abbildung 5:	Ammoniakkonzentration in der Luft aus Rindergülle mit und ohne Futterzusatz Bentonit (Hörnig et al. 1994). .....	17
Abbildung 6:	Einrichtung für das Reinigen und Spülen der Lauffläche mit Schieber und Düsen (rechts) sowie dem Kompressor mit Dosiereinheit für Formaldehyd und Steuerung (links) (Ogink and Kroodsma 1996).....	19
Abbildung 7:	Emissionen von Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) beim Spülen der Spalten und mit bzw. ohne Zusatz von Salpetersäure (Kroodsma und Ogink 1997).....	20
Abbildung 8:	Emissionen von Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) mit und ohne Zusatz von Bio-Aktiv-Pulver auf der Basis Quarzmehl (Frosch und Büscher 2002). .....	20
Abbildung 9:	Emissionen von Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) als Funktion der Anzahl Stunden auf der Weide (Webb et al. 2003). .....	21
Abbildung 10:	Perforierte Bodenelemente (links) und geneigte (3 %) planbefestigte Bodenelemente mit einer zentralen Abflussrinne und Führungsschiene (rechts), (Swierstra et al. 1995). .....	22
Abbildung 11:	Rillenbodenelemente eingebaut auf Gülle Keller mit Schieberentmischung (links) und der Aufbau eines Elementes im Detail, (Swierstra et al. 1999, 2001). .....	23
Abbildung 12:	Rillenbodenelemente, eingebaut in den Laufgängen eines Stalles in den Niederlanden (Foto: Van Caenegem, Agroscope FAT Tänikon, 2004). .....	23
Abbildung 13:	Offenes Stallgebäude mit isoliertem Dach reduziert die Temperatur im Stall, eine Abtrennung mit Windschutznetz mindert die Luftgeschwindigkeit im Laufhof (Fotos: Zähner, Agroscope FAT Tänikon, 2004, 1999). .....	24
Abbildung 14:	Fütterungsbuchten, eingebaut im Stall einer Forschungsstation in Deutschland (Foto: Kaufmann, Agroscope FAT Tänikon, 2004). .....	24

Abbildung 15: Der V-förmige Kanal in der Schweinehaltung reduziert die Gülleoberfläche und somit die Kontaktfläche von Gülle zu Luft (Boussery 2003).	25
Abbildung 16: Die Sprühkühlung reduziert die Temperatur im Laufhof (Foto: Zähler, Agroscope FAT Tänikon, 2004).	25
Abbildung 17: Betriebe mit Silofütterung: a. Offener Mehrgebäudestall mit Liegeboxen, integriertem Laufhof u. Selbstfütterung, b. Offener Mehrgebäudestall mit Liegeboxen, integriertem Laufhof u. Futtertenn, c. Offener Mehrgebäudestall mit Liegeboxen als Veloständer, integriertem Laufhof u. Futtertenn, d. Geschlossener Eingebäudestall mit Liegeboxen, Futtertenn u. angebautem Laufhof (Gazzarin und Hilty 2002).	28
Abbildung 18: Betriebe ohne Silofütterung: e. Offener Mehrgebäudestall mit Liegeboxen, integriertem Laufhof u. Futtertenn, f. Geschlossener Mehrgebäudestall mit Liegeboxen, integriertem Laufhof u. Futtertenn, g. Geschlossener Eingebäudestall mit Liegeboxen, Futtertenn u. angebautem Laufhof, h. Geschlossener, wärmegeämmter Eingebäudestall mit Liegeboxen, Futtertenn u. angebautem Laufhof (Gazzarin und Hilty 2002).	29
Abbildung 19: Offener Mehrgebäudestall mit Liegeboxen und integriertem Laufhof (Typ b): Ansicht (links oben), Fressplatz (rechts oben) und Liegehalle (links unten).	30
Abbildung 20: Eingebäudestall mit Spaceboard und Windschutznetzen als Wände sowie mit Liegeboxen und angebautem Laufhof (Typ d): Ansicht (links oben), Fressplatz (rechts oben) und Liegebereich (links unten).	30

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ammoniakemissionen aus verschiedenen Haltungssystemen von Milchvieh (verändert nach Brose 2000 und Berry et al. 2005).....	11
Tabelle 2:	Flächenvorgaben für Liegeboxenlaufställe gemäss der Schweizer Tierschutzverordnung (TSchV, EVD 1981), der Tierhaltungsprogramme RAUS (BLW 1998a) und BTS (BLW 1998b) sowie der Labelprogramme IP-Suisse (2004), BIO-Suisse (2004) und Kagfreiland (2001). ....	12
Tabelle 3:	Fütterungsmassnahmen zur Verminderung der Ammoniakemissionen aus der Milchviehhaltung. ....	14
Tabelle 4:	Zusammensetzung einer ausgeglichenen und proteinreichen Ration (Smits et al. 1995).....	15
Tabelle 5:	Nährwert von Rau- und Krafffutter, frisch, siliert und getrocknet, intensiv und mittelintensiv je kg TS (RAP 1999). ....	17
Tabelle 6:	Ammoniakreduktion durch Behandlung des Flüssigmistes mit Zusätzen sowie Verdünnen.....	18
Tabelle 7:	Reinigungsfrequenz und Weidegang zur Reduktion der emittierenden Flächen und somit der Ammoniakemissionen aus dem Stallbereich. ....	21
Tabelle 8:	Bauliche Gestaltung der Laufflächen und Auswirkungen auf die Ammoniakemissionen. ....	22
Tabelle 9:	Verschiedene Minderungsmassnahmen bei Laufställen für Milchvieh mit Angaben zum Reduktionspotenzial, zur Umsetzbarkeit in der Praxis bei bestehenden Gebäuden und Neubauten und über zusätzliche Kosten. ....	26
Tabelle 10:	Beschreibende Merkmale der verwendeten Stalltypen a bis h. ....	27
Tabelle 11:	Nach Vorgaben der Tierschutzverordnung (TSchV), der BTS- und RAUS-Verordnung vorgeschriebene Flächen bzw. gebaute Flächen der Stalltypen a bis h total und nicht überdacht. ....	27
Tabelle 12:	Rangierung der acht Stalltypen anhand emissionsrelevanter Kriterien (tiefe Punktzahl entspricht niedriger Emissionen, hohe Punktzahl hoher Emissionen). ....	32
Tabelle 13:	Rangierung der acht Stalltypen anhand emissionsrelevanter Kriterien inklusive dem Potential von Massnahmen bei Bau und Management zur Minderung der Ammoniakemissionen (tiefe Punktzahl entspricht niedriger Emissionen, hohe Punktzahl hoher Emissionen).....	34

## Abkürzungen

APD	Absorbierbares Protein Darm
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
BIO Suisse	Vereinigung Schweizer Biolandbau-Organisationen
BTS	Besonders Tierfreundliche Stallhaltungssysteme
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
BVET	Bundesamt für Veterinärwesen
CHPT	Cyclohecyll-Phosphor-Triamid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	Harnstoff
FAT	Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon, neu: Agroscope FAT Tänikon
GVE	Grossvieheinheit
H <sub>2</sub> O	Wasser
IP Suisse	Schweizerische Vereinigung integriert produzierender Bauern und Bäuerinnen
Kagfreiland	Labelorganisation für eine artgerechte Tierhaltung
LRV	Luftreinhalte-Verordnung
Met	Methionin
N	Stickstoff
NBPT	N-(n-butyl)thio-Phosphor-Triamid
NEL	Netto Energie Laktation = Nettoenergie des Futters für die Bildung von Milch und Körperansatz
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ammonium
OEB	Pansen-Proteinbilanz
OH <sup>-</sup>	Hydroxid
PM10	Staub (Particulate Matter) mit Partikeldurchmesser < 10 µm
PME	Fermentierbare Energie
PMN	Abbaubares Protein
PPDA	Phenyl-Phosphor-Diamidat
RAP	Eidgenössische Forschungsanstalt für Nutztiere, Posieux, neu: Agroscope Liebefeld-Posieux ALP
RAUS	Regelmässiger Auslauf
RP	Rohprotein
TAN	Gesamter ammoniakalischer Stickstoff (Summe NH <sub>3</sub> und NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )
TS	Trockensubstanz
TSchV	Tierschutzverordnung

## Zusammenfassung

Die Ammoniakemissionen im Stallbereich werden hauptsächlich von der Menge ausgeschiedenen Harnstoffs, von der verschmutzten Fläche sowie von der Temperatur und Luftgeschwindigkeit im Stall beeinflusst. Die vermehrte Haltung der Milchkühe in Laufställen mit Auslauf hat das Flächenangebot im Vergleich zum Anbindestall verdoppelt. Die grösseren verschmutzten Flächen, speziell auch bei Laufhöfen, haben deutlich höhere Ammoniakemissionen zur Folge. Auftrag war, Massnahmen zur Emissionsminderung für neue Stall-systeme und Laufhöfe, basierend auf dem aktuellen Stand der Technik und des Wissens, zusammenzustellen und für die Praxis übersichtlich darzustellen.

Minderungs-massnahmen lassen sich in Fütterungsstrategien, Flüssigmistbehandlung, organisatorische und bauliche Massnahmen einteilen. Verschiedene Autoren konnten mit einer Reduktion des Rohproteingehaltes im Futter eine Verminderung der Ammoniakemissionen in Praxisversuchen um 21 bis 39 % nachweisen. Dies beruht auf der niedrigeren Harnstoffkonzentration in Kot und Harn. Untersuchungen in Deutschland fanden bei Zugabe von 80 %iger Milchsäure zum Flüssigmist eine Reduktion der Ammoniakemissionen von 23 % infolge des niedrigeren pH-Wertes des Flüssigmistes. Vermehrte Weidehaltung konnte gemäss britischen Untersuchungen die Ammoniakemissionen vom Stall je nach Aufenthaltsdauer im Stall mehr oder weniger stark verringern. Im Vergleich zu 24 Stunden Stallhaltung waren die Emissionen bei 12 Stunden Weidehaltung um 20 % reduziert, bei 18 Stunden um 57 % und bei 22 Stunden um 79 %. Bauliche Massnahmen sind vor allem im Bereich der Laufflächengestaltung bekannt. In den Niederlanden wurden mit einem patentierten Rillenboden mit Ablauföffnungen die Ammoniakemissionen zwischen 46 und 50 % reduziert.

Die Datengrundlage von Emissionsmessungen aus der Rinderhaltung ist sehr gering, da es sich bei den betroffenen Ställen überwiegend um solche mit natürlicher Lüftung handelt. Einige Empfehlungen zu ammoniakreduzierenden Massnahmen lassen sich dennoch ableiten.

Eine ausgeglichene Fütterung nach Energie und Protein ist angezeigt und lässt sich anhand von Fütterungsplänen errechnen. Vermehrte Weidehaltung oder die nur zeitweise Nutzung von Laufhöfen können je nach Stallsystem ohne grossen zusätzlichen Aufwand umgesetzt werden. Die Sauberkeit der Laufbereiche kann durch erhöhte Reinigungsfrequenz verbessert werden. Schutz vor hohen Temperaturen und hohen Luftgeschwindigkeiten im Stall können genügend Vordach und Schatten im Stall, angrenzende Gebäude, Bäume, Sträucher oder Windschutznetze bieten. Emissionsarme Laufflächen als bauliche Massnahme wie Rillenelemente und optimierte Schiebersysteme eignen sich nur bei Neubauten zur Reduktion von Ammoniakemissionen.

# 1 Einleitung

## 1.1 Problematik

Gemäss Luftreinhalte-Verordnung (LRV) sind Emissionsminderungsmassnahmen bei diffusen Emissionsquellen dann vorzusehen, wenn sie technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar sind. Steigende Bestandesgrössen, arbeitswirtschaftliche, vor allem ergonomische Vorteile und die vermehrte Teilnahme an Direktzahlungsprogrammen (BTS/ RAUS) fördern den Trend zu Laufstallsystemen und Ausläufen. Diese Systeme haben gegenüber der traditionellen Anbindehaltung Vorteile für das Tierwohl und die Rationalisierung der Arbeitsabläufe. Dieser Entwicklung steht als Nachteil eine wesentliche Erhöhung der verschmutzten Flächen gegenüber, was zu vergleichsweise höheren Ammoniak-Emissionen führen muss.

Funktionelle und betrieblich sinnvolle bauliche Emissionsminderungsmassnahmen, die auch wirtschaftlich vertretbar sind, sind schon bekannt. Es fehlt jedoch eine praxistaugliche, übersichtliche Zusammenstellung.

Aus der Sicht der landwirtschaftlichen Praxis ist ein solcher Massnahmenkatalog wünschenswert: Der bauwillige Landwirt muss seine Bauinvestitionen sinnvoll auch auf zukünftige Anforderungen der Emissionsminderung ausrichten können. Er hat Interesse an der Optimierung der N-Effizienz auf dem Betrieb. Heute begangene Fehler lassen sich nur in den üblicherweise langen Amortisationszyklen korrigieren.

Aus der Sicht des LRV-Vollzugs dient ein solcher Massnahmenkatalog als Arbeitsinstrument zur Verhinderung von Fehlinvestitionen.

## 1.2 Zielsetzung

Massnahmen zur Emissionsminderung sind für neue Stallsysteme und Laufhöfe, basierend auf dem aktuellen Stand der Technik und des Wissens, zusammenzustellen und für die Praxis übersichtlich darzustellen.

Der Bericht beschränkt sich auf Rindvieh bzw. auf Milchkühe, da diese den grössten Anteil an den Ammoniakemissionen ausmachen (Kapitel 2.1) und da der Bereich Schweinemast im Projekt Emissionen von Staub (PM10) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>) aus neuen Stallsystemen ESAS bearbeitet wurde (Berry et al. 2005).

## 1.3 Auftrag

- Literaturlaufbereitung und Interpretation mit Blick auf die Fragestellung.
- Analyse häufiger Stall- und Laufhofkonzepte sowie der entsprechenden Managementmassnahmen im Hinblick auf deren zu erwartende Emissionswirkung.
- Zusammenstellen von praktischen Bau- und Managementmassnahmen mit emissionsminderndem Effekt:
  - In Berichtform (Zielpublikum: Luftreinhaltefachstellen, Planungsbüros, Beratung),
  - In Form eines praxistauglichen Massnahmenkatalogs (Zielpublikum: Planungsbüros, Beratung, Landwirte).

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung

Die gesamten Ammoniakemissionen (NH<sub>3</sub>) der Schweiz betragen im Jahr 2000 47000 Tonnen Stickstoff. Die Landwirtschaft trägt dabei mit einem Anteil von 92 % am meisten dazu bei (Abb. 1, BUWAL 2004). Von der Tierhaltung verursachte Ammoniakemissionen stammen in erster Linie von der Ausbringung von Hofdüngern sowie der Stallhaltung. Rindvieh macht aufgrund seines Anteils an der gesamten Tierhaltung (Grossvieheinheiten GVE) mit 75 % den grössten Teil der NH<sub>3</sub>-Emissionen aus (Abb. 1, Reidy und Menzi 2004).

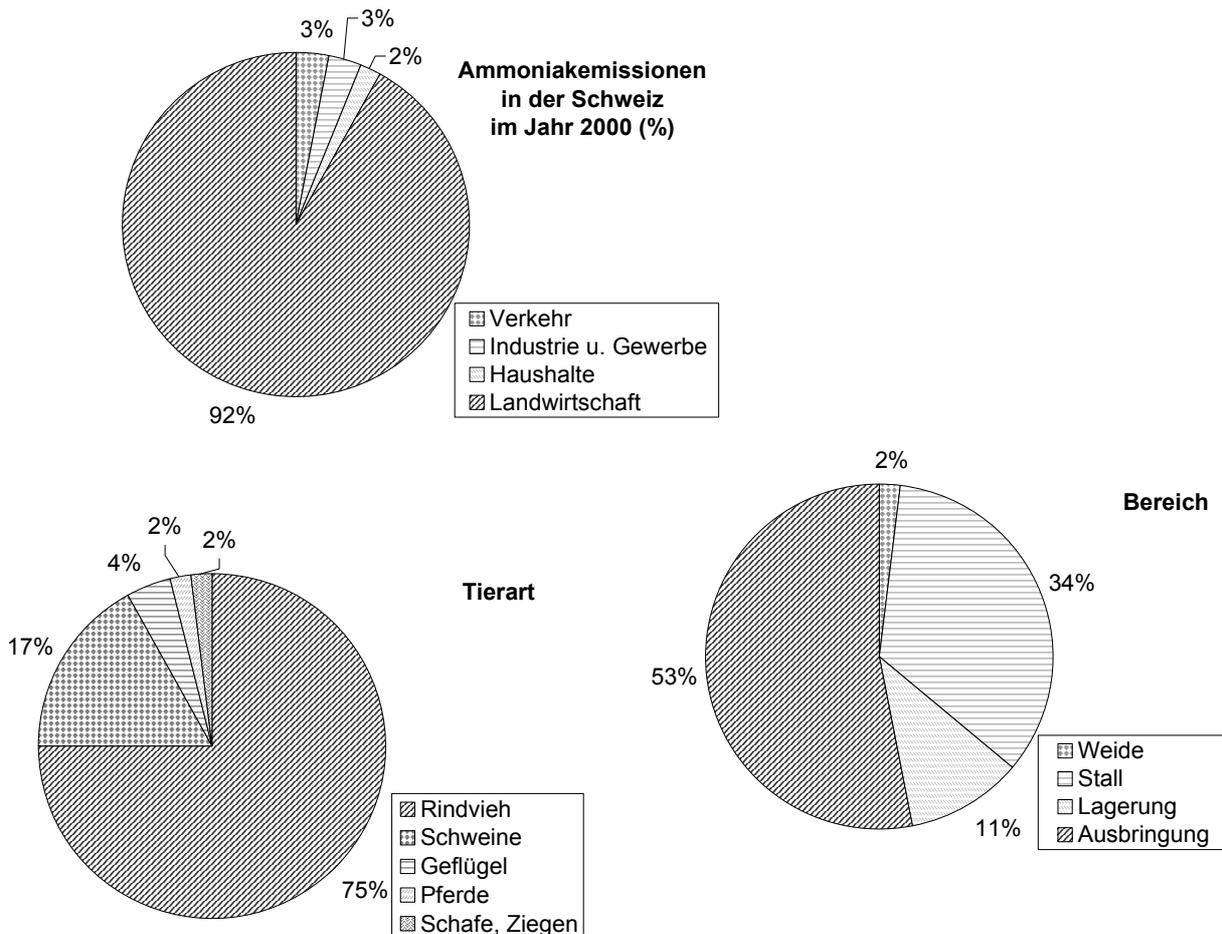


Abbildung 1: Verteilung der Ammoniakmissionen nach Quelle, Tierart und Entstehungsort in der Schweiz im Jahr 2000 (BUWAL 2004, Reidy und Menzi 2004).

### 2.2 Haltungssysteme von Milchkühen in der Schweiz

In den letzten 15 Jahren veränderten sich die Haltungssysteme für Milchvieh deutlich. 1990 wurden noch 97 % der Milchkühe in einem Anbindestall und nur 3 % im Laufstall gehalten. Im Jahr 1996 war das Verhältnis von Anbindestall zu Laufstall 93 % zu 7 % und 2001 82 % zu 18 %. In den letzten Jahren wurden nahezu nur noch Laufställe gebaut. So wird für das Jahr 2010 ein Verhältnis von Anbindestall zu Laufstall mit 60 % zu 40 % angenommen (BLW 2003).

Die Haltung von Milchkühen vermehrt auch in Aussenklimaställen gewinnt in der Schweiz an Bedeutung (Abb. 2). Gründe dafür sind ein arbeitswirtschaftlich verbessertes, tiergerechtes Stallsystem, eine kostengünstige und flexible Baulösung sowie die Möglichkeit zur Teilnahme an Tierhaltungs- (BTS, RAUS) und Labelprogrammen. Die Beteiligung an den beiden Tierhaltungsprogrammen „Regelmässiger Auslauf von Nutztieren im Freien“ (RAUS) und „Besonders Tierfreundliche Stallhaltungssysteme“ (BTS) nimmt seit ihrer Einführung im Jahre 1993 bzw. 1996 stetig zu. 2002 nahmen 59,6 % der Milchviehbetriebe mit einem Anteil von 65,5 % der GVE am RAUS-Programm und 12,7 % der Milchviehbetriebe mit einem Anteil von 19,0 % am BTS-Programm teil (BLW 2003).

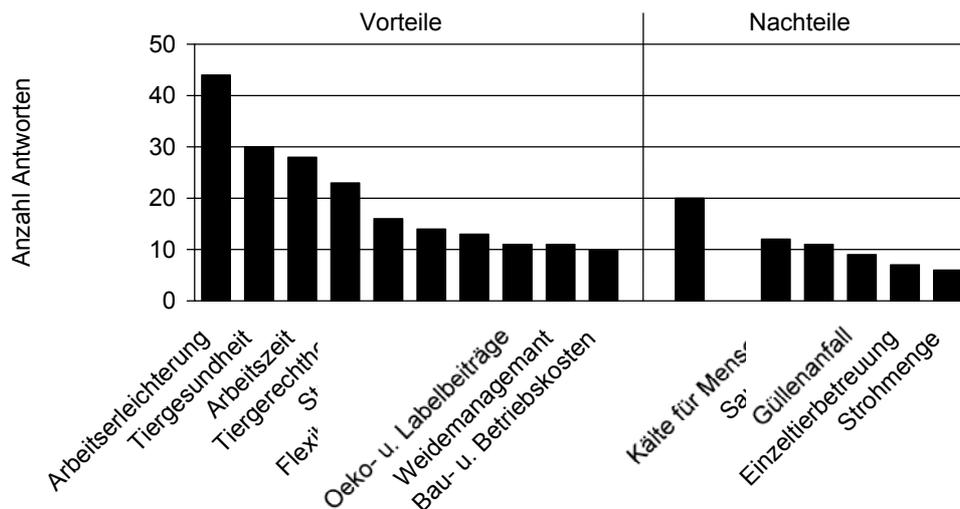


Abbildung 2: Vor- und Nachteile von Aussenklimaställen, teilweise auch von Laufställen allgemein, ermittelt anhand einer Umfrage auf 74 Praxisbetrieben (Zähler et al. 2000).

Neue Stallgebäude erfordern je nach Konzept unterschiedlich hohe Investitionen und Jahreskosten. Zudem unterscheiden sich die einzelnen Konzepte in den verfahrenstechnischen Abläufen, im Arbeitszeitbedarf und –belastung sowie in der Tiergerechtheit und Möglichkeit zur Teilnahme an Tierhaltungsprogrammen sowie in den Emissionen. Vor dem Bauentscheid sollte sich der Landwirt deshalb genügend Zeit für die Konzeptwahl nehmen (Abb. 3).

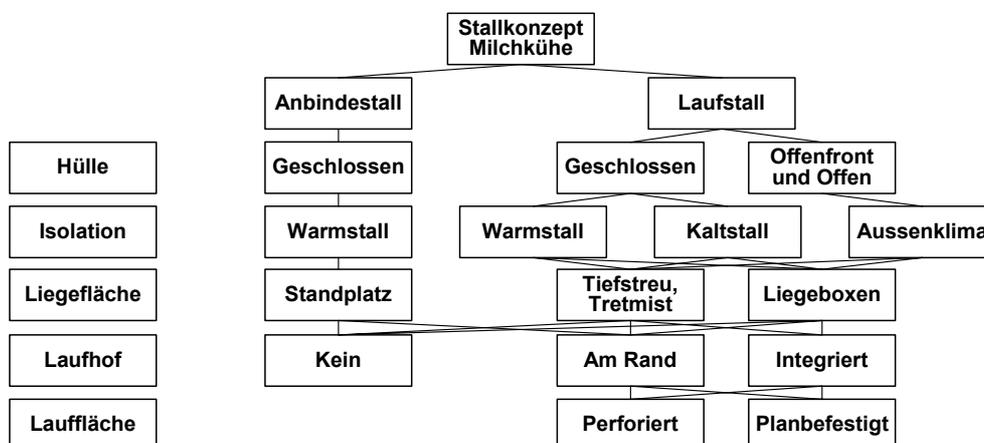


Abbildung 3: Verschiedene Stallkonzepte, verändert nach der Entscheidungs pyramide von Van Caenegem et al. (1996).

### 2.3 Ammoniakemissionen verschiedener Haltungssysteme

In Tabelle 1 sind Literaturwerte der Ammoniakemissionen für die verschiedenen Stall-systeme dargestellt. Die Ammoniakemissionen aus Anbindehaltung schwanken zwischen zirka 4 und 21 g pro GVE und Tag. Im Vergleich dazu liegen die Werte aus Laufstallhaltung mit einem Bereich von zirka 5 bis 86 g pro GVE und Tag im Mittel wesentlich höher.

Tabelle 1: Ammoniakemissionen aus verschiedenen Haltungssystemen von Milchvieh (verändert nach Brose 2000 und Berry et al. 2005).

Haltungssystem	Lüftung	Temperatur	NH <sub>3</sub> -Emissionen	Autoren
Anbindestall	Zwang	8,1-22,1 °C	4-7 g/GVE·d	Amon 1998, Amon et al. 1998
	Zwang	15,4-19,2 °C	9-14 g/Tier·d	Groenestein und Montsma 1991, Groenestein 1993
	Zwang / Frei	8,4-10,5 °C	6-21 g/GVE·d	Groot Koerkamp et al. 1998
Laufstall Tretmist	Zwang		17 g/GVE·d	Amon et al. 1998, 2000
	Frei		86 g /GVE·d	Seipelt 1999
Laufstall Liegeboxen	Frei		5-20 g/GVE·d	Brose 2000
	Frei		32-47 g/GVE·d	Demmers et al. 1998, 2001
	Zwang / Frei		20-42 g/GVE·d	Groot Koerkamp et al. 1998
	Zwang		32-50 g/Tier·d	Kroodsma et al. 1993
	Frei	3,6-22,4 °C	8-76 g/GVE·d	Rom et al. 2004
	Frei		39-57 g/GVE·d	Seipelt 1999, Seipelt et al. 1999
	Frei		43-44 g/GVE·d	Van der Heiden-de Vos et al. 1994 Van't Ooster et al. 1994
Laufhof			220 mg/m <sup>2</sup> ·h	Keck 1997
Warteraum		3,9-16,5 °C	54-447 mg/m <sup>2</sup> ·h, 219-557 mg/m <sup>2</sup> ·h	Misselbrook et al. 1998, Misselbrook et al. 2001

### 2.4 Einflussfaktoren auf die Ammoniakemissionen

Die Ammoniakemissionen im Stallbereich werden hauptsächlich von der Menge Harnstoff im Harn, von der verschmutzten Fläche im Stall und Laufhof bzw. vom Stallsystem und von der Temperatur und Luftgeschwindigkeit im Stall beeinflusst.

Nach Empfehlungen der RAP (1999) ist für ein optimales Mikroorganismenwachstum im Pansen und somit auch für eine optimale Verdauung der Nährstoffe ein minimaler Rohproteingehalt von 20 g pro MJ NEL (Netto Energie Laktation) notwendig. Zugeführtes, nicht abgebautes Futtermittelweiss (Rohprotein) kann nur in kleinen Mengen vom Tier gespeichert werden. Überschüsse werden als Harnstoff im Harn ausgeschieden. Nach Tamminga (1992) können die Tiere nur zirka 2 % vom zugeführten Stickstoff als Reserven speichern, zirka 19 % verbleiben in der produzierten Milch und 29 % gehen im Kot und 50 % im Harn verloren.

Die vermehrte Haltung der Milchkühe in Laufställen mit Auslauf hat das Flächenangebot im Vergleich zum Anbindestall verdoppelt, dies vor allem infolge erhöhter Anforderungen von Seiten der Tierhaltungs- und Labelprogramme (Tabelle 2). Die grösseren verschmutzten Flächen und vor allem die nicht überdachten Flächen der Laufhöfe der Programme RAUS, Bio-Suisse und Kagfreiland von 6,6 m<sup>2</sup> bzw. 2,5 m<sup>2</sup> haben deutlich höhere Ammoniak-

emissionen zur Folge als die Programme IP-Suisse und BTS mit 3,4 bis 4,2 m<sup>2</sup> und somit auch als die Ammoniakemissionen in der Literatur (Tabelle 1).

Tabelle 2: Flächenvorgaben für Liegeboxenlaufställe gemäss der Schweizer Tierschutzverordnung (TSchV, EVD 1981), den Tierhaltungsprogrammen RAUS (BLW 1998a) und BTS (BLW 1998b) sowie den Labelprogrammen IP-Suisse (2004), Bio-Suisse (2004) und Kagfreiland (2001).

Fläche [m <sup>2</sup> ]	Vorgaben	
	TSchV / IP-Suisse / BTS	RAUS / Bio-Suisse / Kagfreiland
Pro Tier Total	6,8-7,6 (je nach Tier-Fressplatz-Verhältnis)	10
davon Lauffläche	3,4-4,2 (je nach Tier-Fressplatz-Verhältnis)	6,6
davon nicht überdachte Lauffläche	-	2,5

Bei Rindviehhaltung dominieren Stallsysteme mit freier Lüftung. In geschlossenen Laufställen (Kaltställe) wird das Aussenklima im Winter noch etwas abgepuffert, in Offen- und Offenfrontställen entspricht das Stallklima im ganzen Jahr dem Aussenklima. (Keck et al. 2004). Die Ammoniakemissionen im Stall sind bei hohen Temperaturen im Sommer dreimal so hoch wie im Winter bei tiefen Temperaturen (Brose 2000).

Die Menge an gebildetem Ammoniak wird somit hauptsächlich beeinflusst durch

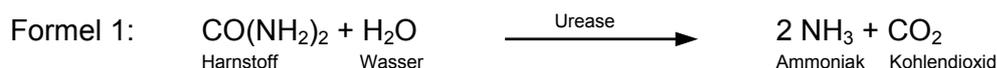
- Menge und Zusammensetzung stickstoffhaltiger Ausscheidungen sowie
- Stickstoffumwandlung in den Exkrementen (Harn und Kot).

An der Bildung und Freisetzung von Ammoniak sind (ausgehend von Harnstoff) die folgenden Prozesse beteiligt (Brose 2000, Monteny 2000):

- Bildung von Ammoniak durch enzymatische Harnstoffspaltung (Ammonifizierung),
- Dissoziationsgleichgewicht zwischen Ammonium und gelöstem Ammoniak und
- Freisetzung von Ammoniak durch Stoffübergang von der flüssigen Phase in die Luft.

#### 2.4.1 Enzymatische Harnstoffspaltung

Die Bildung von Ammoniak aus Harnstoff wird in der flüssigen Phase durch das von Mikroorganismen im ausgeschiedenen Kot gebildete Enzym Urease unterstützt (Formel 1). Die Harnstoffspaltung ist in der Regel bereits nach zwei Stunden vollständig abgeschlossen (Monteny 2000). Die Geschwindigkeit des Prozesses wird von der Harnstoffkonzentration und der temperaturabhängigen Ureaseaktivität beeinflusst. Unter Praxisbedingungen ist die Ureaseaktivität sehr hoch, so dass die Harnstoffkonzentration als limitierender Faktor bei der Harnstoffspaltung angesehen wird.



#### 2.4.2 Dissoziationsgleichgewicht zwischen Ammonium und gelöstem Ammoniak

In der flüssigen Phase herrscht ein Dissoziationsgleichgewicht zwischen Ammoniak NH<sub>3</sub> und ionisiertem Ammonium NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Formel 2). Der Anteil von Ammoniak am gesamten ammoniakalischen Stickstoff (TAN: Summe von NH<sub>3</sub> und NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) hängt positiv von der Temperatur (T) und vom pH-Wert ab. Nach Elzing und Monteny (1997) liegt der pH-Wert von Harn auf einem mit Kot und Harn verschmutzten Boden bei zirka 8,6. Die Höhe der



### 3 Minderungsmaßnahmen der Ammoniakemissionen

Die Minderungsmaßnahmen lassen sich demnach gemäss den massgeblichen Bildungs- und Freisetzungsschritten einteilen (verändert nach Monteny und Erismann 1998):

#### Fütterungsmassnahmen

- bedarfsangepasste N-Gehalte im Futter (Balancierte oder N-reduzierte Ration),
- reduzierte Harnstoffkonzentration in Kot und Harn (Fütterungszusätze),

#### Flüssigmistbehandlung

- Verdünnung des Harns auf den verschmutzten Laufflächen (Spülen mit Wasser oder Formaldehyd),
- Verminderung der Harnstoffspaltung auf den Laufflächen (Güllezusätze, Urease-Inhibitoren),
- Senkung des pH-Wertes mit Säuren,

#### Organisatorische Massnahmen

- Verminderung der Freisetzung von Ammoniak aus Kot und Harn (Vermehrte Weidehaltung, zeitweise geschlossener Laufhof),
- Schnelle Entfernung des Harns auf den verschmutzten Laufflächen (Automatische Schiebersysteme),

#### Bauliche Massnahmen, Haltungssystem

- Verminderung der Freisetzung von Ammoniak aus Kot und Harn (Geneigte Bodensysteme, Perforierte Laufflächen, Windschutz am oder um Gebäude, wärmegeprägtes Dach),
- Wenig verschmutzte Fläche (Fütterungsbuchten).

#### 3.1 Fütterungsmassnahmen

In Tabelle 3 sind Fütterungsstrategien bzw. –massnahmen wie bedarfsangepasste N-Gehalte sowie Zusätze im Futter zur Verminderung der Ammoniakemissionen dargestellt.

Tabelle 3: Fütterungsmassnahmen zur Verminderung der Ammoniakemissionen aus der Milchviehhaltung, (N = Stickstoff, NH<sub>4</sub> = Ammonium, RP = Rohprotein, Suppl. = Ergänzung, Met = Methionin, OEB = Pansen-Proteinbilanz, K = Konzentration, E = Emission).

Minderungsmaßnahme	Ration Referenz / Maßnahme	Reduktion [%]	Ort	Autoren
Bedarfsangepasste N-Gehalte im Futter  Einfluss auf die Harn- stoffkonzentration	RP 17 / 13 % +/- Suppl., RP 19 / 14 %	46-55 (K) 63-65 (K/E)	Labor, Labor	Frank et al. 2002a, Frank et al. 2002b
	RP 17,5 / 15 / 12,5 % +/- Met (Vollgülle)	68 (E)	Labor	Kröber et al. 2000, Külling et al. 2001
	RP 22,9 / 11,2 % (Vollgülle)	55 (E)	Labor	Külling et al. 2003
	RP 16,4 / 15,3 / 12,3 %, RP 18,3 / 16,7 / 15,3 %	40 (E), 32 (E)	Labor	Paul et al. 1998
	OEB 1060 / 40 g, RP 20 / 15 %, OEB 1060 / 260 g, RP 20 / 16 %	39 (E), 21 (E)	Praxis	Smits et al. 1995, Smits et al. 1997
Zusätze im Futter	Bentonit (Montmorillonit)	20 (E)	Labor	Hörnig et al. 1994, Hörnig et al. 1996
Einfluss auf das NH <sub>4</sub> -N zu Gesamt-N-Verhältnis	Zeolith (Clinoptilolit), Bentonit (Montmorillonit)	- -	Labor	Hörnig et al. 1998

### 3.1.1 Stickstoffangepasste Fütterung

Mit einer Reduktion des Rohprotein Gehaltes im Futter konnten verschiedene Untersuchungen die Ammoniakemissionen in Laborversuchen um 32 bis 68 %, in Praxisversuchen um 21 bis 39 % vermindern (Tab. 3).

Smits et al. 1995 verglichen dabei zwei Rationen aus Gras, Mais, Zuckerrüben und Konzentraten (Tab. 4). Die eine Ration war ausgeglichen nach Energie und Protein (OEB = 0), die andere Ration hatte einen Proteinüberschuss (OEB = 1000, rumen-degradable protein balance OEB, Tamminga et al. 1994, Yu et al. 2003). Dies entspricht der Differenz des Mikroorganismen-Proteins aus der fermentierbaren Energie PME und des abbaubaren Rohproteins PMN (RAP 1999). Er weist darauf hin, dass proteinreiche Rationen vor allem auf Betrieben mit intensiv genutztem Grasland und Gras als Hauptbestandteil in der Ration vorkommen (Tab. 6). Untersuchungen und Modellrechnungen von De Boer et al. (2002) und Monteny et al. (2002) zeigten, dass die Ammoniakemissionen bis 80 % reduziert werden könnten, wenn Rationen mit hohem OEB-Gehalt durch Rationen mit ausgeglichenem OEB-Gehalt ersetzt werden.

Tabelle 4: Zusammensetzung einer ausgeglichenen und proteinreichen Ration (Smits et al. 1995), (OEB = Pansen-Proteinbilanz).

Komponente	Ausgeglichene Ration %		Proteinreiche Ration %	
	(OEB = 0)		(OEB = 1000)	
Grassilage	20		50	
Maissilage	20		10	
Maiskleber	0		10	
Maiskolben	10		0	
Zuckerrübenschnitzel	20		0	
Konzentrat I	0		30	
Maiskleber				30
Lupinenmehl				25
Palmkernmehl				20
Soja				7
Konzentrat II	30		0	
Alfaalfamehl		21		
Palmkernmehl		20		
Soja		20		
Sonnenblumenextrakt		10		
Maiskleber		6		
Sojabohnenextrakt		5		

Paul et al. (1998) untersuchten in zwei Versuchsdurchgängen die Ammoniakkonzentration im Flüssigmist bei unterschiedlichen Rohprotein-Gehalten im Futter sowie ausgeglichener Passage- und Abbaurate von Protein und Energie (The Cornell Net Carbohydrate and Protein System CNCPS, Fox et al, 2004). Fisher et al. (2000) zeigten, dass je nach Proteinquelle und -konzentration die Stickstoffeffizienz und -ausscheidung unterschiedlich sind. Die Ration mit der Hauptproteinquelle Gerste schnitt dabei besser ab als Rapsextraktions-Mehl und Maiskörner-Destillat und besser als Sojaextraktions-Mehl und Maiskleber-Mehl. Dinner et al. (1998) konnten die Effizienz von Rohprotein bei ausgeglichener Passage- und Abbaurate von Protein und Energie mit den pansenstabilen Aminosäuren Lysin und Methionin verbessern.

Kröber et al. (2000) und Külling et al. (2001) variierten den Rohproteingehalt zwischen 175 g/kg TS mit Methionin angereichert (+Met), 150 g/kg TS +Met, 125 g/kg TS +Met und 125 g/kg TS ohne Methionin (-Met). Neben der absoluten Reduktion des Stickstoffs im Harn nahm der Anteil Stickstoff im Harn ab und in der Milch zu (Abb. 4). Külling et al. (2003) untersuchte verschiedene für die Schweiz typische Sommer- und Winterrationen mit Gras und Heu. Die Ammoniakemissionen, untersucht im Labor, waren bei Gras mit tiefem Rohproteingehalt im Vergleich zu jungem Gras mit hohem Rohproteingehalt signifikant tiefer.

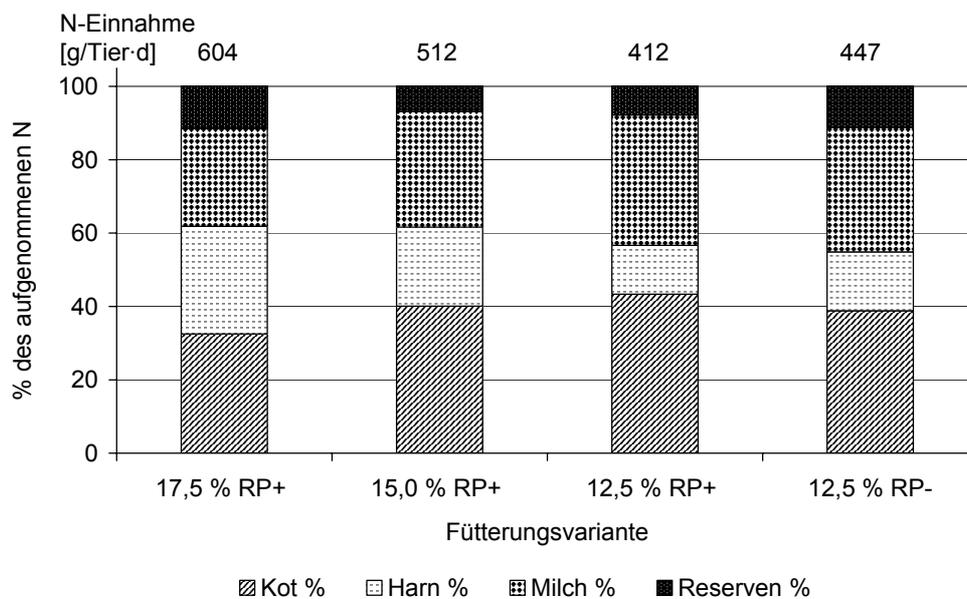


Abbildung 4: Anteil des aufgenommenen Stickstoffs in Kot, Harn, Milch und Reserven bei unterschiedlichem Rohproteingehalt im Futter (Kröber et al. 2000), (N = Stickstoff, g = Gramm, d = Tag, RP = Rohprotein, + = mit Methionin angereichert, - = ohne Methionin).

Frank et al. (2002a, 2002b) verglichen zwei verschiedene Rohproteingehalte im Futter und drei Krafffutter miteinander. Das Krafffutter mit Leinsamenkuchen verursachte dabei einen höheren Stickstoffgehalt im Flüssigmist und dadurch höhere Ammoniakemissionen als das Basiskrafffutter mit Gerste, Hafer, Weizen und als das Krafffutter mit einem höheren Anteil Rapssamen.

Die Versuche zeigten, dass der Anteil Rohprotein im Futter und die Qualität des Rohproteins eine Rolle spielen. Daneben spielt auch das Fütterungsmanagement eine Rolle. So mindern eine häufige Vorlage des Futters und eine Mischration die Ammoniakemissionen (Tamminga 1992, Valk 1994).

Nährwerttabellen (RAP 1999) geben unter anderem Auskunft über den Energie- und Proteingehalt von Rau- und Krafffutter (Tab. 5). Dabei unterscheiden sich diese Gehalte bei Grünfutter zwischen einzelnen Beständen (gräserreich, ausgewogen, leguminosenreich) und vor allem zwischen den Nutzungsintensitäten bzw. zwischen den Entwicklungsstadien (Stadium 1 = intensiv, sehr früh, Hauptgras Beginn Schossen, Löwenzahn Beginn Blüte, Stadium 5 = mittelspät, Hauptgras Ende Rispenschieben, Löwenzahn Blütenstängel verdorrt). Junges, intensiv genutztes Gras hat ein hohes Rohprotein-Energie-Verhältnis (RP/NEL), altes, mittel intensiv genutztes Gras sowie Maissilage, Zuckerrübenschnitzelsilage und Gerste ein tiefes RP/NEL. Mit einer Kombination von verschiedenen Futterkomponenten kann eine ausgeglichene Ration (RP/NEL 20 g für Mikroorganismenwachstum) zusammengestellt werden.

Tabelle 5: Nährwert von Rau- und Kraffutter, frisch, siliert und getrocknet, intensiv und mittelintensiv je kg TS (RAP 1999), (TS = Trockensubstanz, NEL = Netto Energie Laktation, MJ = Megajoule, APD = Absorbierbares Potein Darm, RP = Rohprotein, g = Gramm).

Futter		TS [%]	NEL [MJ]	APD [g]	RP [g]	RP/NEL
Gräserreiches Grünfutter	intensiv, Stadium 1	10-20	6,6	111	197	29,2
	mittel, Stadium 5	10-20	5,7	85	94	16,5
Ausgewogenes Grünfutter	intensiv; Stadium 1	10-20	6,8	115	212	31,2
	mittel, Stadium 5	10-20	6,0	92	115	19,2
Leguminosenreiches Grünfutter	intensiv; Stadium 1	10-20	6,7	118	237	35,4
	mittel, Stadium 5	10-20	5,8	96	145	25,0
Gräserreiche Silage	intensiv; Stadium 1	30-40	6,4	85	209	32,7
	mittel, Stadium 5	30-40	5,5	65	98	17,8
Leguminosenreiche Silage	intensiv; Stadium 1	30-40	6,7	88	246	36,7
	mittel, Stadium 5	30-40	5,6	73	150	26,8
Gräserreiches Dürrfutter	intensiv; Stadium 1	88	6,0	100	173	28,8
	mittel, Stadium 5	88	5,3	76	85	16,0
Leguminosenreiches Dürrfutter	intensiv; Stadium 1	88	6,1	107	204	33,4
	mittel, Stadium 5	88	5,2	85	128	24,6
Maissilage	Teigreife	30	6,4	72	85	13,3
	Gelbreife	33	6,5	72	84	12,9
Zuckerrübenschnitzelsilage		19	7,1	101	106	14,9
Gerste	Körner mittel	87	7,7	100	116	15,1

### 3.1.2 Futterzusätze

Futterzusätze brachten nur eine geringe Reduktion von Ammoniakemissionen (Tab. 2). Die Hypothese war, dass die Bindung von im Stoffwechsel gebildetem Ammoniak an ein Tonmineral die Harnstoffsynthese und damit die Harnstoffausscheidung im Harn verringert. Das von Hörnig et al. (1994, 1996) untersuchte Tonmineral Bentonit zeigte zu Beginn der Verabreichung an das Tier eine deutliche positive Wirkung von 18 bis 28 %, ab dem elften Versuchstag eine schwach positive Wirkung von 0 bis 5 % auf die Ammoniakkonzentration der Luft (Abb. 5). Versuche auf zwei Praxisbetrieben zeigten, dass der Zusatz Bentonit eine puffernde Wirkung auf die Parameter des Säure-Basen-Haushaltes hat.

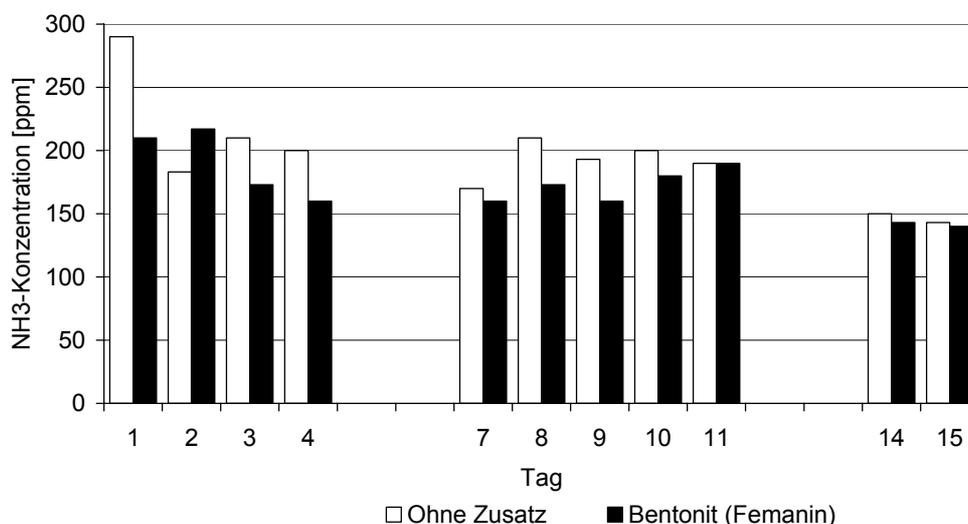


Abbildung 5: Ammoniakkonzentration in der Luft aus Rindergülle mit und ohne Futterzusatz Bentonit (Hörnig et al. 1994), (NH<sub>3</sub> = Ammoniak).

In weiteren Versuchen mit Zeolith und Bentonit (Hörnig et al. 1998) konnte aus methodischen Gründen eine Reduktion der Ammoniakemissionen nicht nachgewiesen werden. Der Zusatz von 2 % Zeolith in der Trockensubstanz des Futters führte zu einer Reduktion des Ammoniumgehaltes im Kot von 11 bis 16 % und im Harn von 10 bis 21 %. Bei der Verabreichung von Bentonit konnte eine Reduktion des Ammoniumgehaltes im Kot und Harn von 15 % erreicht werden.

### 3.2 Flüssigmistbehandlung

In Tabelle 6 sind Behandlungen des Flüssigmistes mit verschiedenen Säuren, mit Urease-Inhibitoren und mit anderen Zusätzen sowie wie das Verdünnen des Flüssigmistes mit Wasser dargestellt. Diese Behandlungen wirken sowohl auf die Ammoniakemissionen im Stall (beim Spülen der Laufgänge oder bei der Lagerung der Gülle unter den Laufgängen) als auch auf die Ammoniakemissionen bei der Lagerung.

Tabelle 6: Ammoniakreduktion durch Behandlung des Flüssigmistes mit Zusätzen sowie Verdünnen (l = Liter, t = Tonne, Vol.-% = Volumen-Prozent, M = Milchsäure, S = Salpetersäure, Sch = Schwein, T = Tier, d = Tag, K = Konzentration, E = Emission).

Minderungsmaßnahme	Säureart, pH-Wert und Säuremenge	Reduktion [%]	Ort	Autoren
Zusätze im Flüssigmist, Säure	50 %ige Milchsäure, pH 4,5 ⇒ 3-5 Vol.-%	90 (K)	Labor	Berg et al. 1997, 1998
	60 %ige Salpetersäure, ca. 25 l/t Flüssigmist	35-40 (E)	Praxis	Bleijenberg et al. 1994, Kroodsma et al. 1994
	80 %ige Milchsäure, 1-1,5 Vol.-%	11-23 (E)	Praxis (Sch)	Frosch und Büscher 2001, 2002
Einfluss auf den pH-Wert	50 %ige Milchsäure M, 50 %ige Salpetersäure S, pH 4,5 ⇒ M 3-5, S 1,3 Vol.-%	70-80 (K)	Labor	Hörnig et al. 1998b
	Spülen mit Gemisch von Flüssigmist und Salpetersäure	51 (E), 60-61 (E)	Praxis	Kroodsma and Ogink 1997, Kroodsma et al. 1994, 1996
Zusätze im Flüssigmist, Mineral, Bakterien, Pilze, Mikroorganismen	Kalkstein- und Sandbasis	-	Praxis (Sch)	Frosch und Büscher 2001, 2002
	Lactobacillus plantarum, Weizen und Kartoffelstärke	45 (E)	Praxis (Sch)	Hendriks and Vrielink 1997
	Enzyme, Bakterien, Hefe- und Schimmelpilze	0-50 (E)	Praxis (Sch)	Hendriks et al. 1997
Einfluss auf den pH-Wert und die Keimflora	Bentonit, Zeolith, Gesteinsmehl, Bakteriensubstrat	-	Labor	Hörnig et al. 1994
	Spülen mit Wasser und Formaldehyd, 20 l/T·d mit 4 g/l	45-55 (E), 80 (E)	Praxis	Ogink and Kroodsma 1996, Bleijenberg et al. 1994
Zusätze im Flüssigmist, Urease-Inhibitor	Phosphor-Diamid PPDA 10 mg/l, Phosphor-Triamid CHPT 10 mg/l, Phosphor-Triamid NBPT 20 mg/l	28 mal langsamere Harnstoffspaltung	Labor	Varel 1996, Varel et al. 1997, 1999
Einfluss auf die Harnstoffkonzentration	Spülen mit Wasser, 19 l/T·d	17 (E)	Praxis	Bleijenberg et al. 1994
	Spülen mit Wasser, 50 l/T·d	17 (E)	Praxis	De Boer et al. 1994 (von Kroodsma et al. 1993)
	Spülen mit Wasser, 50-110 l/T·d	25-72 (E)	Praxis	Kroodsma et al. 1993
	Spülen mit Wasser, 20 l/T·d	9-19 (E)	Praxis	Ogink and Kroodsma 1996

In Holland wurden Mitte der 1990iger Jahre Praxis-Untersuchungen mit Zusätzen zum Flüssigmist durchgeführt. Dabei ergaben die einzelnen Massnahmen eine unterschiedliche Reduktion der Ammoniakemissionen. Das Spülen von perforierten Flächen mit Wasser nach dem Reinigen mit einem Schieber im Intervall von zwei Stunden reduzierte die Emissionen um 9 – 19 % (Bleijenberg et al. 1994, De Boer et al. 1994, Kroodsmas et al. 1993, Ogink and Kroodsmas 1996). Die Zugabe von Formaldehyd als Urease-Inhibitor zum Spülwasser erhöhte die Reduktion auf 45 bis 55 % (Ogink and Kroodsmas 1996) bzw. 80 % (Bleijenberg et al. 1994). Ein Nachteil durch Spülen mit Wasser mit und ohne Formaldehyd im Vergleich zu ohne Spülen war das um 45 % erhöhte Flüssigmist-Volumen. Weiter wurden die Konzentrationen von Formaldehyd nicht erhoben, das ein Risiko für die Gesundheit und Sicherheit darstellt. Die Einrichtung (Abb. 6) und der Betrieb einer automatischen Spüleinrichtung verursacht zusätzliche Kosten.

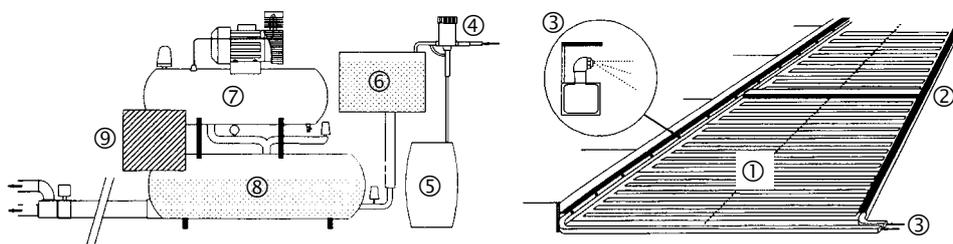


Abbildung 6: Einrichtung für das Reinigen und Spülen der perforierten Lauffläche ① mit Schieber ② und Spülleitungen mit Düsen ③ (rechts) sowie Dosiereinheit ④, Formaldehydbehälter ⑤, Mischtank ⑥ mit Kompressor ⑦, Drucktank ⑧ und Steuerung ⑨ (links) (Ogink and Kroodsmas 1996).

Bei Varel (1996) und Varel et al. (1997, 1999) verlangsamte sich die Harnstoffspaltung mit drei verschiedenen Urease-Inhibitoren (Phenyl-Phosphor-Diamidat PPDA, Cycloheptyl-Phosphor-Triamid CHPT, N-(n-butyl)thio-Phosphor-Triamid NBPT) im Labor und in der Praxis bei einmaliger Zugabe von 10 mg pro Liter Flüssigmist um einen Faktor von 28 (ohne Inhibitor 1 Tag, mit Inhibitor bis zu 28 Tagen). Bei wöchentlicher Zugabe von 10, 40 und 100 mg pro Liter Flüssigmist waren nach 28 Tagen noch 38, 48 und 70 % des Harnstoffs vorhanden. Ohne Zufuhr war nach einem Tag die Harnstoffspaltung abgeschlossen. Er folgerte, dass mit Urease-Inhibitoren die Ammoniak-Emissionen reduziert bzw. kontrolliert, die Umweltbelastung verringert und die Dünger aus Flüssigmist bezüglich Stickstoff-Phosphor-Verhältnis verbessert werden.

Bei Shi et al. (2001) waren die Ammoniakemissionen in einem Laborversuch (Plastikcontainer) mit einer Mischung aus Erde, Kot und Harn und N-(n-butyl)thio-Phosphor-Triamid NBPT) zirka 35 % tiefer als die Kontrolle ohne Zusatz. Dabei hat die Frequenz der Applikation (mind. alle acht Tage) und die eingesetzte Menge an NBPT (1,5 bis 3 g pro Tier und Tag) einen grossen Einfluss (Parker et al. 2004).

Das Ansäuern von Flüssigmist mit Salpetersäure nach dem Reinigen der Spalten mit einem Schieber brachte eine Reduktion der Ammoniakemissionen von 35 bis 40 % (Bleijenberg et al. 1994, Kroodsmas et al. 1994). Bei zusätzlichem Gezeitemsystem (Überspülen der Spalten mit angesäuertem Flüssigmist) erhöhte sich die Reduktion je nach Intervall des Überspülens auf 44 bis 61 % (Kroodsmas et al. 1994, 1996). Ein automatisches System zum Ansäuern des Flüssigmistes und zum Überspülen der Spalten brachte eine Reduktion von 51 % (Kroodsmas and Ogink 1997, Abb. 7). Nachteile von Salpetersäure sind erhöhte Emissionen von Lachgas und Methan sowie Risiken im Bereich Lagerung der Säure und Arbeitssicherheit.

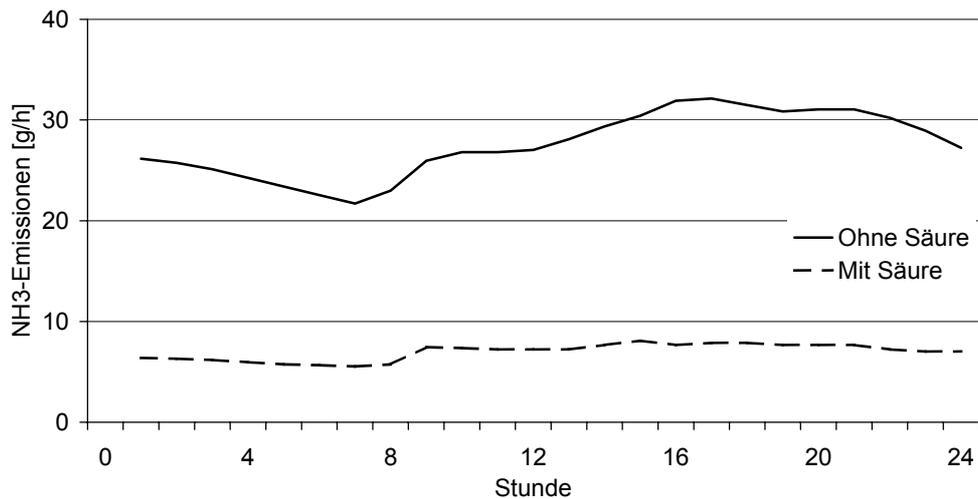


Abbildung 7: Emissionen von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) beim Spülen der Spalten und mit bzw. ohne Zusatz von Salpetersäure (Kroodsma und Ogink 1997).

Berg et al. (1997, 1998) und Hörnig et al. (1998b) führten im Labor Versuche mit 50 %iger Milchsäure durch. Bei einem pH-Wert von 4 bis 4,5 wurde im Vergleich zum normalen pH-Wert von zirka 7,5 eine 80 bis 90 %ige Reduktion der Ammoniakkonzentration erreicht. Frosch und Büscher (1002, 2002) fanden in der Praxis mit 80 %iger Milchsäure eine Reduktion der Ammoniakemissionen von 23 %. Milchsäure führte zudem zu keinen Lachgas-Emissionen und zu stark reduzierten Methan-Emissionen. Als Nachteil ist die grosse Menge an Milchsäure mit bis zu 5 Vol.-% zu nennen sowie auch die Risiken im Bereich Lagerung der Säure und Arbeitssicherheit.

Versuche mit stärkehaltigen Produkten als Nahrungsquelle von Mikroorganismen zur Produktion von organischen Säuren zeigten eine Reduktion von 45 % der Ammoniakemissionen (Hendrick and Vrielink 1997). Weniger Erfolg zeigten verschiedene Versuche mit Zusätzen bzw. Produkten auf der Basis von Mineralien (Gestein, Kalk, Sand), Enzymen, Bakterien und Pilzen, die heute im Handel angeboten werden (Frosch und Büscher 2001, 2002, Hendrick et al. 1997, Hörnig et al. 1994, Abb. 8).

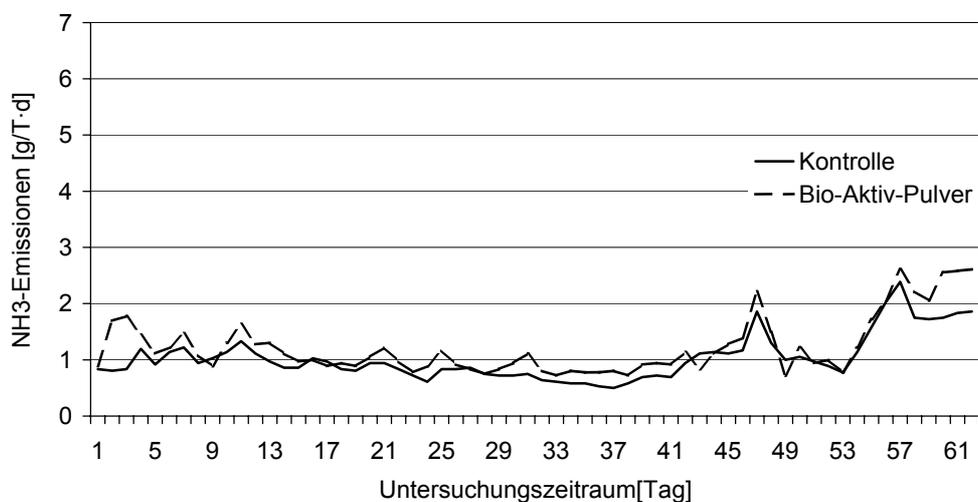


Abbildung 8: Emissionen von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) mit und ohne Zusatz von Bio-Aktiv-Pulver auf der Basis Quarzmehl (Frosch und Büscher 2002).

### 3.3 Organisatorische Massnahmen

Organisatorische Massnahmen wie die Reinigungsfrequenz von Laufflächen und die Dauer des Weidegangs sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Reinigungsfrequenz und Weidegang zur Reduktion der emittierenden Flächen und somit der Ammoniakemissionen aus dem Stallbereich (R = Reinigen, d = Tag, h = Stunde, E = Emission, Perf. = Perforiert, Planb. = Planbefestigt).

Minderungs-massnahme	Referenz / Massnahme	Reduktion [%]	Ort	Autoren
Reinigung Emittierende Fläche	Perf. / Perf. R.	27 (E)	Praxis	Andersson et al. 1994
	Perf. / Planb. 12 x R/d, Planb. 12x R/d / Planb. 96 x R/d	5 (E)	Praxis	Braam et al. 1997a
	Planb. / Planb. 1 x R/d	8 (E)	Labor	Keck 1997
	Perf. / Perf. R., Planb. / Planb. R.	9 (E), 6 (E)	Praxis	Kroodsma et al. 1993, Oosthoek et al. 1991
Weidegang Emittierende Fläche	Weide: 0 / 12 / 18 / 22 h/d	20 / 57 / 79 (E)	Labor, Praxis	Webb et al. 2003

Gereinigte perforierte und planbefestigte Laufflächen reduzierte die Ammoniakemissionen um 6 bzw. 9 % (Keck 1997, Kroodsma et al. 1993, Oosthoek et al. 1991). Eine häufigere Reinigung von planbefestigten Flächen mit 12 bzw. 96 Durchgängen pro Tag brachte im Vergleich zu Spaltenboden keinen Effekt bzw. einen zusätzlichen Effekt von 5 % (Braam et al. 1997). Vermehrte Weidehaltung verringerte unter kontrollierten Bedingungen in grossen Folientunnels und bei Zwangsbelüftung die Ammoniakemissionen je nach Aufenthaltsdauer im Stall mehr oder weniger stark. Im Vergleich zu 24 Stunden Stallhaltung waren die Emissionen bei 12 Stunden Weidehaltung um 20 % reduziert, bei 18 Stunden um 57 % und bei 22 Stunden um 79 % (Webb et al. 2003, Abb. 9). Die Reduktion verlief nicht im gleichen Masse wie die Aufenthaltsdauer. Eine Erklärung könnte die verschmutzte Fläche ohne Tiere im Stall sein, die weiter emittiert.

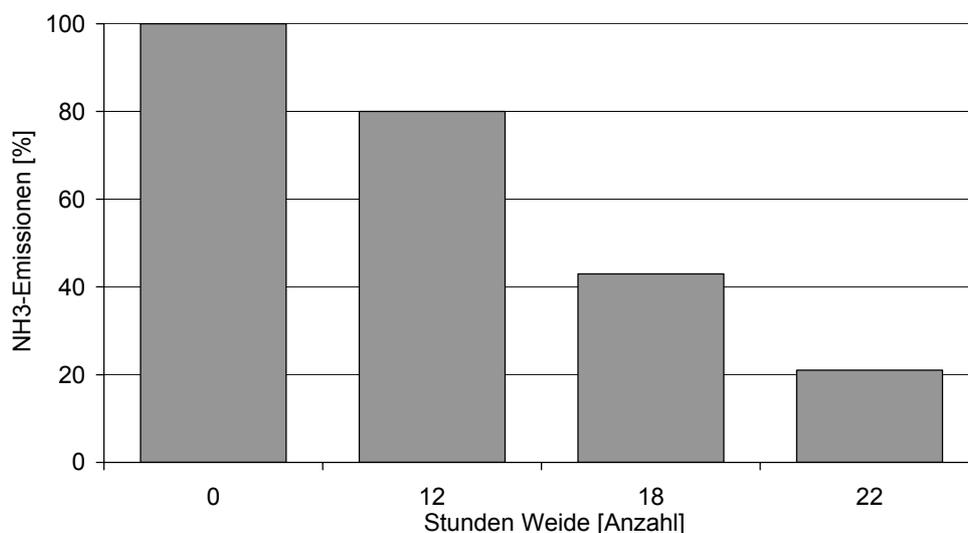


Abbildung 9: Emissionen von Ammoniak (NH<sub>3</sub>) als Funktion der Anzahl Stunden auf der Weide (Webb et al. 2003).

### 3.4 Bauliche Massnahmen

Neben organisatorischen Massnahmen kann auch die Gestaltung der Lauffläche die Ammoniakemissionen beeinflussen. Diese betreffen das Gefälle sowie Rinnen zur Sammlung und Abfuhr von Flüssigkeit und sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Bauliche Gestaltung der Laufflächen und Auswirkungen auf die Ammoniakemissionen (E = Emission, Perf. = Perforierter Laufbereich, Planb. = Planbefestigter Laufbereich).

Minderungsmassnahme	Referenz / Versuch	Reduktion [%]	Ort	Autoren
Gestaltung der Lauffläche	Perf. / Planb. + 3 % geneigt mit Rinne seitlich	21 (E)	Praxis	Braam et al. 1997a
	Perf. / Planb. + 3 % geneigt mit 1 Rinne mittig	50 (E)	Praxis	Braam et al. 1997b
	Lauffläche mit Spaltenboden 3,5 m <sup>2</sup> / 2,5 m <sup>2</sup>	10 (E)	Praxis	Metz et al., 1995
Emittierende Fläche	Perf. / Planb.	-	Praxis	Oosthoek et al. 1991
	Perf. 2 mm / 30 mm Schlitz	62 (E)	Labor	Svennerstedt 1996, 1999
	Perf. / Planb. + 3 % geneigt mit 1 Rinne mittig mit Überzug aus Harz	52 (E)	Praxis	Swierstra et al. 1995
	Perf. / Gerillt mit Ablauföffnungen	46 (E)	Praxis	Swierstra and Braam 1999

#### 3.4.1 Bodengestaltung

Monteny et al. (1998) und Keck (1997) konnten in Modellrechnungen und Laboruntersuchungen einen grossen Einfluss von Harn auf der Lauffläche auf die Ammoniakemissionen aufzeigen. Ein schnelles Ableiten von Harn von der Lauffläche ist demnach wichtig. Verschiedene perforierte, ebene planbefestigte und geneigte planbefestigte Bodenvarianten wurden in Holland untersucht. Swierstra et al. (1995) und Braam et al. (1997b) untersuchten einen um 3 % gegen die Mitte des Laufgangs geneigten planbefestigten Boden (Abb. 10). Einen patentierten Rillenboden mit Ablauföffnungen und spezieller Entmistungstechnik für die Reinigung der Rillen untersuchten Swierstra and Braam (1999) und Swierstra et al. (2001) (Abb. 11, Abb. 12).

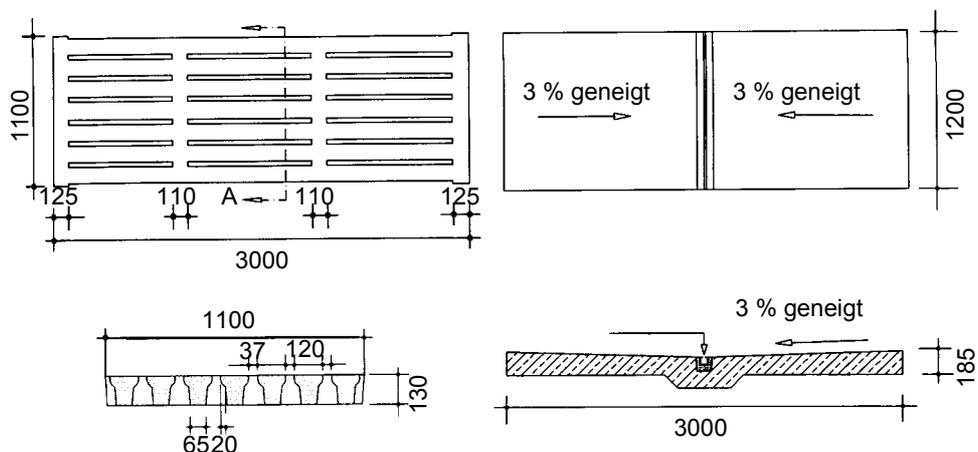


Abbildung 10: Perforierte Bodenelemente (links) und geneigte (3 %) planbefestigte Bodenelemente mit einer zentralen Abflussrinne und Führungsschiene (rechts), Einheit in mm (Swierstra et al. 1995).

Die Ammoniakemissionen konnten so zwischen 46 und 50 % reduziert werden. Mit geschlossenen Ablauföffnungen wurde noch eine Reduktion der Emissionen von 35 % erreicht. Während eines Experiments waren maximal 10 % der Ablauföffnungen verstopft. In einer weiteren Untersuchung wurden das Verhalten und die Klauengesundheit beim Rillenboden untersucht und im Vergleich zu einem Spaltenboden als gleichwertig bewertet (Stefanowska et al. 2001).

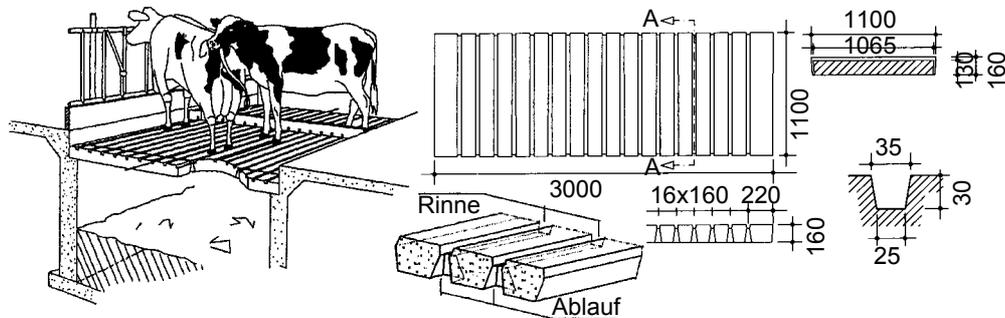


Abbildung 11: Rillenbodenelemente eingebaut auf Güllekeller mit Schieberentmischung (links) und der Aufbau eines Elementes im Detail, Einheit in mm (Swierstra et al. 1999, 2001).



Abbildung 12: Rillenbodenelemente, eingebaut in den Laufgängen eines Stalles in den Niederlanden (Fotos: Van Caenegem, Agroscope FAT Tänikon, 2004).

### 3.5 Weitere Massnahmen

Weitere Ansätze zur Minderung der Ammoniakemissionen, die jedoch bisher nicht wissenschaftlich untersucht wurden, sind:

Organisatorische Massnahmen

- Nicht-Nutzung des gereinigten Laufhofes während der Vegetationsperiode (Weidehaltung).
- Gestaffelte Nutzung des Laufhofes für verschiedene Tiergruppen (Kühe, Rinder, Kälber) bei Laufställen. Das bedingt eine Änderung der RAUS-Verordnung, da für nicht permanent zugängliche Laufhöfe grössere Flächen erforderlich sind (BLW 1998a).

Bauliche Massnahmen

- Verzicht auf den Laufhof bei offenen, frei gelüfteten Laufställen zur Reduktion der verschmutzten Fläche. Das bedingt einen Verzicht auf die RAUS-Beiträge oder eine Änderung der RAUS-Verordnung (BLW 1998a).

- Kleinerer Anteil nicht überdachter Fläche im Laufhof zur besseren Beschattung und damit zur Reduktion der Temperatur. Das bedingt eine Änderung der RAUS-Verordnung (BLW 1998a).
- Offene Stallgebäude (Aussenklimaställe) mit wärmeisoliertem Dach zur Reduktion der Temperatur und Einstrahlung im Stall (Abb. 13).
- Windschutz am oder um den Stall zur Reduktion der Luftgeschwindigkeit bei offenen, freigelüfteten Ställen (Abb. 13).



Abbildung 13: Offenes Stallgebäude mit isoliertem Dach reduziert die Temperatur im Stall, eine Abtrennung mit Windschutznetz mindert die Luftgeschwindigkeit im Laufhof (Fotos: Zähler, Agroscope FAT Tänikon, 2004, 1999).

- Fütterungsbuchten (Abtrennungen zwischen den Fressplätzen) im Fressbereich zur Reduktion der verschmutzten Fläche (Abb. 14).

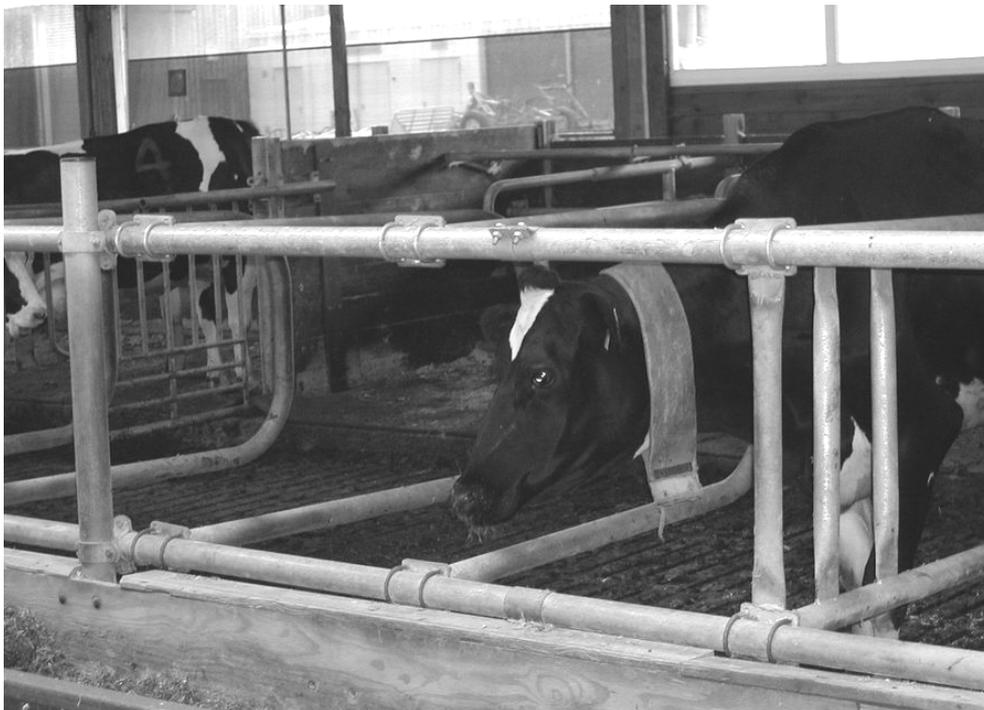


Abbildung 14: Fütterungsbuchten, eingebaut im Stall einer Forschungsstation in Deutschland (Foto: Kaufmann, Agroscope FAT Tänikon, 2004).

- V-förmige Kanäle in der Schweine und Geflügelhaltung zur Reduktion der Gülleoberfläche (Abb. 15). Das bedingt bei gleichem Anfall an Gülle ein grösseres Lagervolumen ausserhalb des Stalles. Die Funktion solcher Kanäle bei Milchvieh ist nicht untersucht.

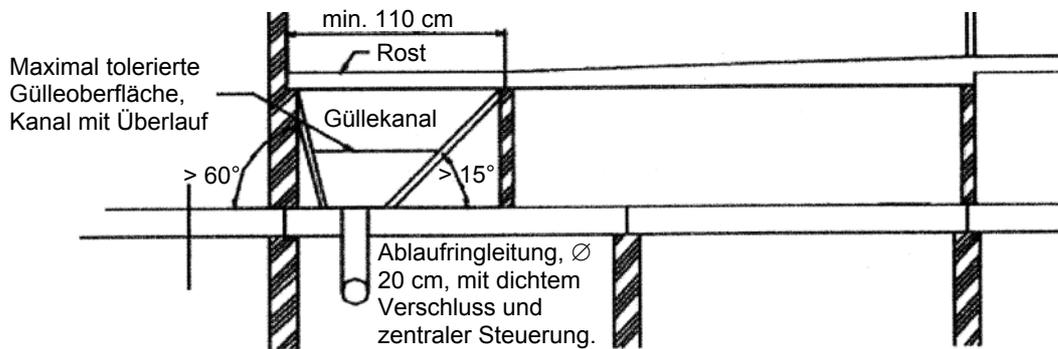


Abbildung 15: Der V-förmige Kanal in der Schweine- und Geflügelhaltung reduziert die Gülleoberfläche und somit die Kontaktfläche von Gülle zu Luft (Boussery 2003).

- Schieber in Kanälen unter dem Spaltenboden zur Reduktion der Kontaktfläche zwischen Flüssigmistoberfläche und Luft. Der Flüssigmist wird mehrmals täglich aus dem Kanal entfernt.
- Optimierte Entmistungstechnik für eine verbesserte Sauberkeit der Laufbereiche (z.B. Zeitschaltuhr, Schieber mit Sprühgerät).
- Sprühkühlung bei hohen Temperaturen in Laufgängen oder im Laufhof zur Reduktion der Temperatur (Abb. 17).



Abbildung 16: Die Sprühkühlung reduziert die Temperatur im Laufhof (Foto: Zähler, Agroscope FAT Tänikon, 2004).

## 4 Umsetzbarkeit der Minderungsmaßnahmen

Die in Kapitel 3 aufgeführten Minderungsmaßnahmen sind in Tabelle 9 mit Angaben zum Reduktionspotenzial, zur Umsetzbarkeit und über zusätzliche Kosten dargestellt. Eine bedarfsangepasste Fütterung hat ein gutes Reduktionspotenzial, lässt sich bei bestehenden Gebäuden und Neubauten anhand von Fütterungsplänen einfach umsetzen und erfordert keine zusätzlichen Kosten. Bei den Zusätzen ergeben nur Säure und Urease-Inhibitoren ein gutes Reduktionspotenzial, lassen sich aber bisher noch nicht befriedigend umsetzen und bringen zusätzliche Kosten beim Material (Säure, Urease-Inhibitor) und bei Einrichtungen (Kompressor, Pumpe, Leitungen, Düsen). Vermehrte Weidehaltung oder die nur zeitweise Nutzung von Laufhöfen können gut umgesetzt werden. Das Reduktionspotenzial ist noch nicht quantifiziert. Emissionsarme Laufflächen als bauliche Massnahme eignen sich nur bei Neubauten zur Reduktion von Ammoniakemissionen und verursachen zusätzliche Kosten. Einen Schutz vor hohen Temperaturen und hohen Luftgeschwindigkeiten im Stall können genügend Vordach und Schatten im Stall, angrenzende Gebäude, Bäume, Sträucher oder Windschutznetze bieten.

Tabelle 9: Verschiedene Minderungsmaßnahmen bei Laufställen für Milchvieh mit Angaben zum Reduktionspotenzial, zur Umsetzbarkeit in der Praxis bei bestehenden Gebäuden und Neubauten und über zusätzliche Kosten (+ gut/tief, o mittel, - schlecht/hoch)

	Reduktions- potenzial	Umsetzbarkeit		Kosten
		Bestehende Gebäude	Neubauten	
Minderungsmaßnahme in der Literatur				
Bedarfsangepasste N-Gehalte im Futter	+	+	+	+
Zusätze im Futter	-	+	+	o
Zusatz im Flüssigmist, Säure	+	o	o	-
Zusätze im Flüssigmist, Mineral, Bakterien, Pilze, Mikroorganismen	o/-	o	o	-
Zusätze im Flüssigmist, Spülen mit Urease-Inhibitor	+	-	+	-
Zusätze im Flüssigmist, Spülen mit Wasser	o	-	+	-
Reinigungsfrequenz von Laufflächen	o	+ <sup>1)</sup>	+ <sup>1)</sup>	o
Weidegang <sup>2)</sup>	+	+	+	+
Gestaltung der Lauffläche	+	-	+	-
Weitere, noch zu prüfende Minderungsmaßnahmen				
Nichtbenützung des Laufhofes im Sommer <sup>3)</sup>		+	+	+
Gestaffelte Benützung des Laufhofes		+	+	-/o <sup>5)</sup>
Kein Laufhof <sup>4)</sup>		+	+	-/o <sup>5)</sup>
Kleinerer Anteil nicht überdachter Fläche		+	+	-/o <sup>5)</sup>
Offene Stallgebäude mit wärmegeädämmtem Dach		-	+	-
Windschutz am Stall oder um den Stall		+	+	-
Fütterungsbuchten im Fressbereich		-	+	-
V-förmige Kanäle		-	-	-
Zwischenboden im Güllekeller		-	o	-

<sup>1)</sup> Ausnahme bei mobiler Reinigung

<sup>2)</sup> Futterration weniger bedarfsgerecht, Nährstoffeffizienz schlechter

<sup>3)</sup> Erfordert Flexibilität/Änderung im RAUS-Programm

<sup>4)</sup> Nach TSchV bei Laufställen möglich

<sup>5)</sup> Kosten tief (+), aber Verzicht auf RAUS-Beiträge (-/o) oder Änderung des RAUS-Programmes

## 5 Typische Stallkonzepte

### 5.1 Beschreibung der verschiedenen Stalltypen

Die Haltung von Milchkühen in Kalt- oder Aussenklimaställen gewinnt in der Schweiz an Bedeutung (Abb. 2). Acht Stalltypen sind in Abbildung 17 und Abbildung 18 dargestellt (Gazzarin und Hilty 2002). Beschreibende Merkmale der Betriebe sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Die Betriebe a bis d haben Silofütterung, die Betriebe e bis h haben keine Silofütterung. Die Unterschiede zwischen den Betrieben sind Selbstfütterung (a), offener Mehrgebäudestall mit Liegehalle (b, e) und mit Cuccetten (c), geschlossener Mehrgebäudestall (f), Eingebäudestall (d, g, h), wärmegeämmter Stall (h). Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen je ein Praxisbetrieb der Typen b und d. In Tabelle 11 sind die Flächen der verwendeten Stalltypen mit 48 Tieren dargestellt. Die Flächen der Stalltypen wurden so gewählt, dass sie die Vorgaben der beiden Tierhaltungsprogramme BTS und RAUS erfüllen. Bei den drei Stalltypen mit angebautem Laufhof (d, g, h) sind die gebauten Flächen grösser als die Vorgaben. Die vorgeschriebene Grösse der Güllegrube war für die Flächen verantwortlich.

Tabelle 10: Beschreibende Merkmale der verwendeten Stalltypen a bis h.

Merkmale	Stalltyp							
	a	b	c	d	e	f	g	h
Silo	✓	✓	✓	✓				
Kein Silo					✓	✓	✓	✓
Wärmegeämmt								✓
Nicht wärmegeämmt	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Geschlossen				✓		✓	✓	✓
Offen	✓	✓	✓		✓			
Eingebäude				✓			✓	✓
Mehrgebäude	✓	✓	✓		✓	✓		
Fressplatz innen				✓			✓	✓
Fressplatz aussen		✓	✓		✓	✓		
Selbstfütterung	✓							
Laufhof angebaut				✓			✓	✓
Laufhof integriert	✓	✓	✓		✓	✓		

Tabelle 11: Nach Vorgaben der Tierschutzverordnung (TSchV), der BTS- und RAUS-Verordnung vorgeschriebene Flächen bzw. gebaute Flächen der Stalltypen a bis h total und nicht überdacht.

	Fläche [m <sup>2</sup> ]										
	TSchV	BTS	RAUS	a	b	c	d*	e	f	g*	h*
Für 48 Tiere Total	400	400	480	480	480	480	570	480	480	570	590
davon nicht überdacht	-		120	200	120	210	150	120	150	150	170
Pro Tier Total	8,3	8,3	10	10	10	10	11,9	10	10	11,9	12,3
davon nicht überdacht	-	-	2,5	4,2	2,5	4,4	3,1	2,5	3,1	3,1	3,5

\* Aufgrund der Kapazität der Güllegrube mehr als nötig gebaut

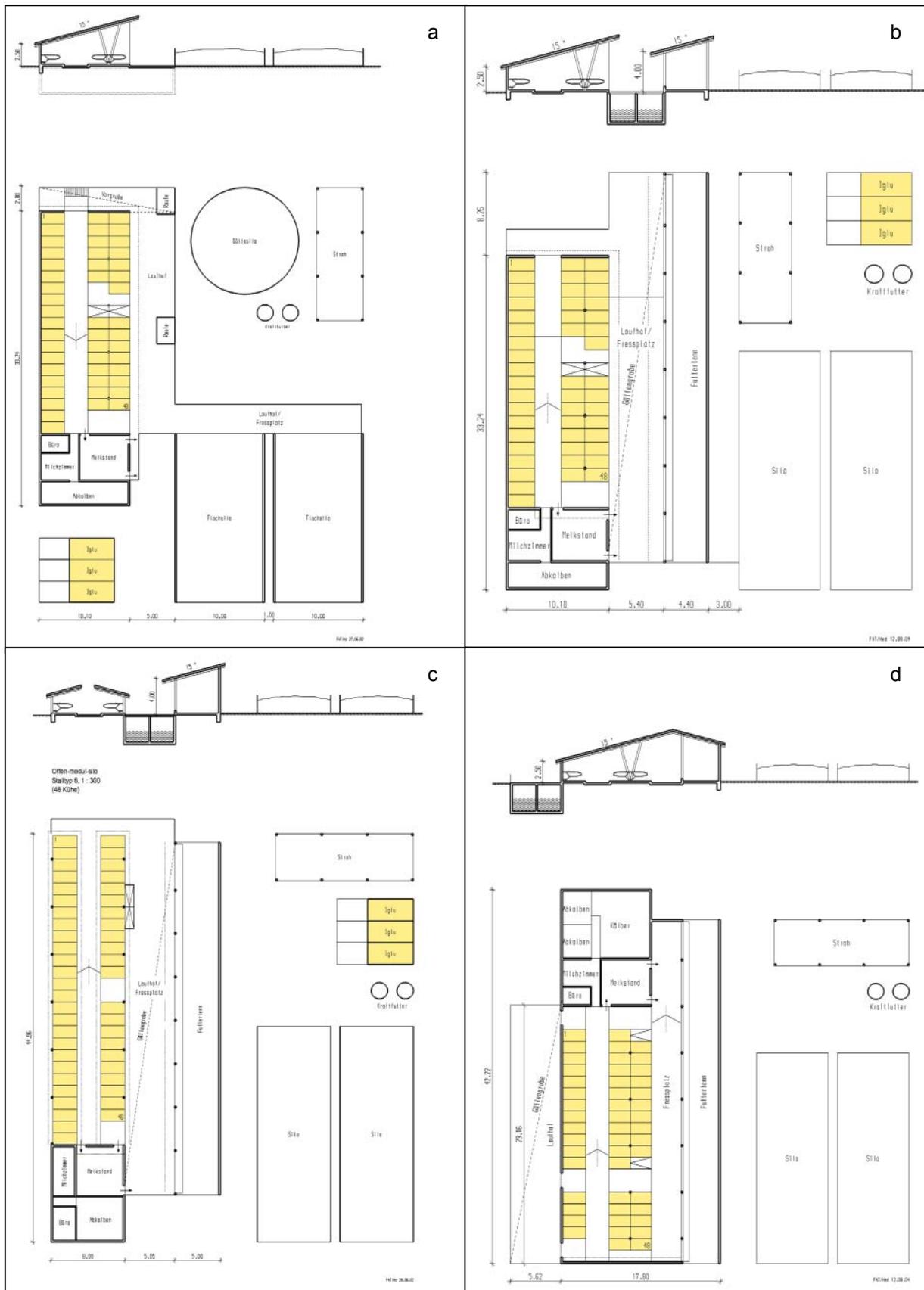


Abbildung 17: Betriebe mit Silofütterung: a. Offener Mehrgebäudeestall mit Liegeboxen, integriertem Laufhof u. Selbstfütterung, b. Offener Mehrgebäudeestall mit Liegeboxen, integriertem Laufhof u. Futtertenn, c. Offener Mehrgebäudeestall mit Liegeboxen als Veloständer, integriertem Laufhof u. Futtertenn, d. Geschlossener Eingebäudeestall mit Liegeboxen, Futtertenn u. angebautem Laufhof (Gazzarin und Hilty 2002).

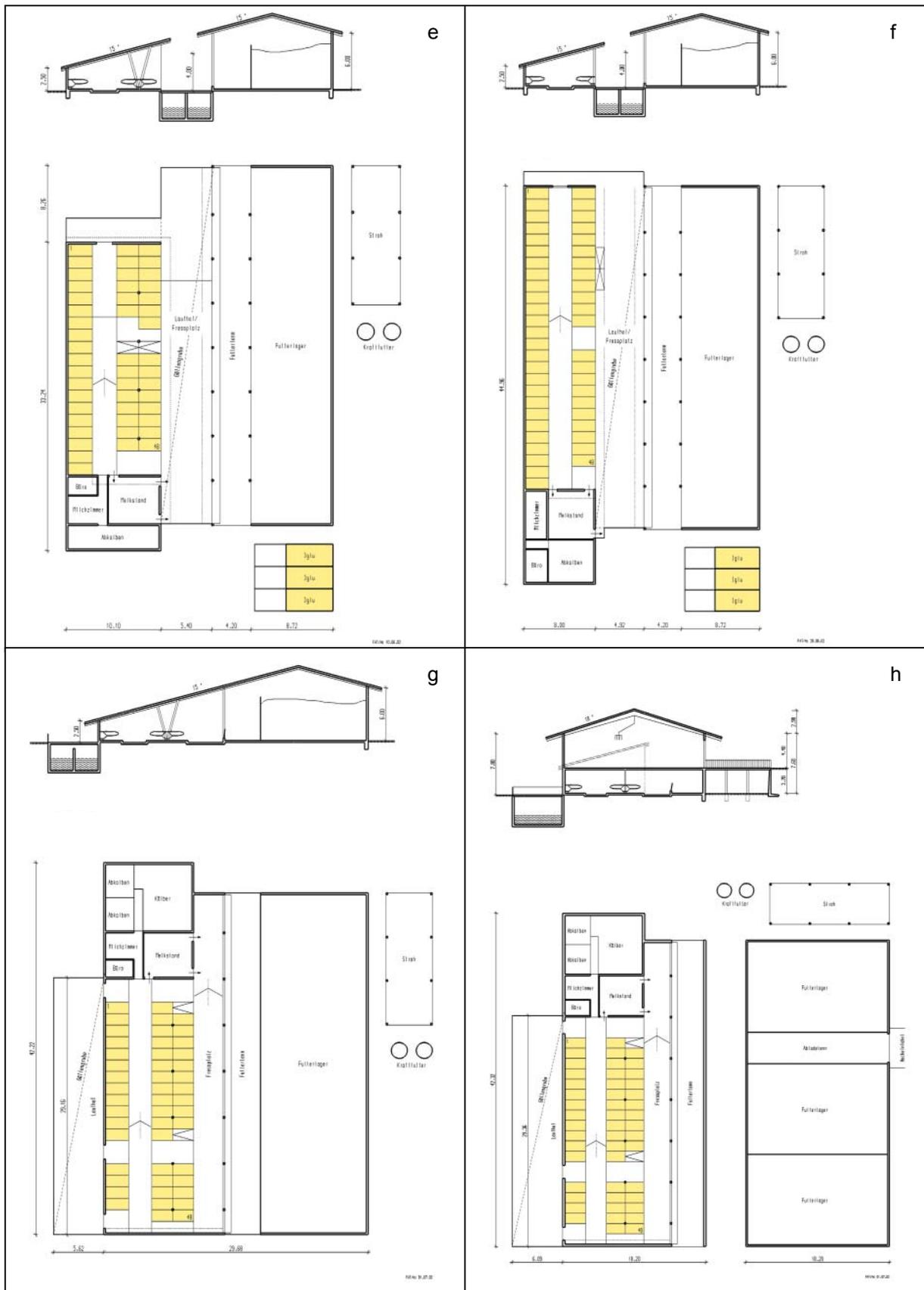


Abbildung 18: Betriebe ohne Silofütterung: e. Offener Mehrgebäudestall mit Liegeboxen, integriertem Laufhof u. Futtertenn, f. Geschlossener Mehrgebäudestall mit Liegeboxen, integriertem Laufhof u. Futtertenn, g. Geschlossener Eingebäudestall mit Liegeboxen, Futtertenn u. angebautem Laufhof, h. Geschlossener, wärmegeprägter Eingebäudestall mit Liegeboxen, Futtertenn u. angebautem Laufhof (Gazzarin und Hilty 2002).

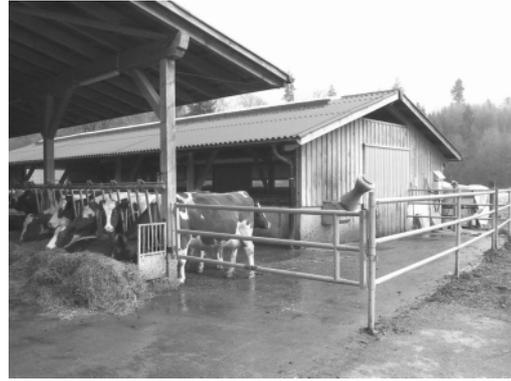


Abbildung 19: Offener Mehrgebäudestall mit Liegeboxen und integriertem Laufhof (Typ b): Ansicht (links oben), Fressplatz (rechts oben) und Liegehalle (links unten).



Abbildung 20: Eingebäudestall mit Spaceboard und Windschutznetzen als Wände sowie mit Liegeboxen und angebautem Laufhof (Typ d): Ansicht (links oben), Fressplatz (rechts oben) und Liegebereich (links unten).

## 5.2 Ammoniakemissionen der verschiedenen Stalltypen

Die Stalltypen verursachen unterschiedlich hohe Ammoniakemissionen. Diese wurden bisher nicht quantifiziert und können somit nur qualitativ angegeben werden.

### 5.2.1 Rangierung der Stalltypen anhand einzelner emissionsrelevanter Kriterien

Die Stalltypen sind im folgenden nach unterschiedlichen Kriterien rangiert ( $\text{NH}_3 \uparrow$  = Ammoniakemissionen hoch,  $\text{NH}_3 \downarrow$  = Ammoniakemissionen tief):

- **Grösse der verschmutzten Fläche (Lauffläche):**

$$\text{NH}_3 \uparrow \left| \begin{array}{cccc} h & d & a & b \\ & g & c & e \end{array} \right| \text{NH}_3 \downarrow$$

Die grössere verschmutzte Fläche und vor allem die grössere nicht überdachte verschmutzte Fläche der Stalltypen h, d und g verursachen höhere Ammoniakemissionen. Durch die Vorgaben der Flächen im Tierhaltungsprogramm RAUS sowie der Abmessungen von Liegeboxen und Laufgängen in der Tierschutzverordnung ist es bei Eingebäudeställen mit angebautem Laufhof nicht möglich, nur die Mindestfläche von 10 m<sup>2</sup> pro Tier zu bauen.

- **Anfall an Kot und Harn auf der nicht überdachten Laufhöffläche:**

$$\text{NH}_3 \uparrow \left| \begin{array}{ccc} & b & d \\ a & c & g \\ & e & h \\ & f & \end{array} \right| \text{NH}_3 \downarrow$$

Die Tiere verbringen einen grossen Teil der Zeit mit Liegen und Fressen. Somit fällt der grösste Teil an Kot und Harn im Laufbereich der Liegeboxen und der Fressachse an. Bei den Stalltypen mit integriertem Laufhof a, b, c, e und f ist ein Teil der nicht überdachten Laufhöffläche gleichzeitig der Fressbereich. Der Anfall an Kot und Harn auf der nicht überdachten Laufhöffläche ist bei diesen Stalltypen grösser als bei den Stalltypen mit angebautem Laufhof.

- **Häufigkeit der Reinigung der Laufhöffläche bei planbefestigter Ausführung:**

$$\text{NH}_3 \uparrow \left| \begin{array}{cc} & a \\ d & b \\ g & c \\ h & e \\ & f \end{array} \right| \text{NH}_3 \downarrow$$

Der Anfall an Kot und Harn auf der nicht überdachten Laufhöffläche ist bei den Stalltypen mit integriertem Laufhof grösser. Diese Betriebe installieren dort eine stationäre Entmistungsanlage und reinigen täglich mehrmals oder entmisten mobil mindestens einmal täglich. Ein angebauter Laufhof d, g, und h mit einem geringeren Anfall an Kot und Harn wird eher seltener gereinigt.

Bei neuen Ställen wird heute häufig die Güllegrube mit der Laufhöffläche darüber kombiniert. Die Lauffläche wird bei solchen Systemen meist als perforierte Fläche erstellt. Bei diesen Systemen spielt die Häufigkeit der Reinigung keine Rolle.

- **Temperatur im Winterhalbjahr im Stall und Laufhof:**

$$\text{NH}_3 \uparrow \left| \begin{array}{ccc} & d & a \\ h & > f & > b \\ & g & > c \\ & & e \end{array} \right| \text{NH}_3 \downarrow$$

Das Klima in den Offenställen a, b, c und e entspricht dem Aussenklima. Im Winterhalbjahr sind dort tiefere Ammoniakemissionen als im wärme gedämmten Stall h zu erwarten.

- **Temperatur im Sommerhalbjahr im Stall und Laufhof:**

$$\text{NH}_3 \uparrow \left| \begin{array}{ccc} & d & a \\ f & > h & > b \\ g & & > c \\ & & e \end{array} \right| \text{NH}_3 \downarrow$$

Bei den Eingebäudeställen d und g sowie dem geschlossenen Mehrgebäudestall f sind im Sommer eine höhere Temperatur und somit höhere Ammoniakemissionen zu erwarten als im wärme gedämmten Stall h und in den offenen Stalltypen a, b, c und e. Die Wärmedämmung schützt vor hohen Temperaturen im Stall, die offene Bauweise erhöht den Luftaustausch und somit den Wärmeabtransport.

Hohe Temperaturen im Sommer und direkte Sonneneinstrahlung, das heisst nicht überdachte Laufhofflächen, machen einen grossen Teil der Ammoniakemissionen aus.

### 5.2.2 Zusammenfassende Rangierung von Stalltypen anhand emissionsrelevanter Kriterien

In den folgenden Abschnitten ist ein Versuch einer zusammenfassenden Rangierung der oben definierten Stalltypen dargestellt. Dies ist als grober Ansatz zu verstehen, doch die Datengrundlage ist mangelhaft. Dieser Ansatz soll Diskussionen auslösen, um Lösungswege zu finden.

Anhand der Rangierungen bei den einzelnen Kriterien mit einem Punkteschema (Tab. 12) folgt somit diese zusammenfassende Rangierung:

$$\text{NH}_3 \uparrow \left| \begin{array}{ccc} d & a & b \\ g & > c & > e \\ h & & f \end{array} \right| \text{NH}_3 \downarrow$$

Tabelle 12: Rangierung der acht Stalltypen anhand emissionsrelevanter Kriterien (tiefe Punktzahl entspricht niedriger Emissionen, hohe Punktzahl hoher Emissionen).

Kriterien	Punkte	Stalltyp							
		a	b	c	d	e	f	g	h
Grösse der verschmutzten Fläche (Lauffläche)	2	1	2	2	1	1	2	2	
Anfall an Kot und Harn auf der nicht überdachten Laufhoffläche	2	2	2	1	2	2	1	1	
Häufigkeit der Reinigung der Laufhoffläche bei planbefestigter Ausführung	1	1	1	2	1	1	2	2	
Temperatur im Winterhalbjahr im Stall und Laufhof	1	1	1	1	1	1	1	2	
Temperatur im Sommerhalbjahr im Stall und Laufhof	1	1	1	2	1	2	2	1	
<b>Summe</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	

In dieser zusammenfassenden Rangierung ist die heutige Situation ohne Einbezug von Massnahmen bei Bau und Management zur Minderung der Ammoniakemissionen mit den bestehenden Tierhaltungsprogrammen dargestellt. Kein Stalltyp erreicht das Maximum von zehn Punkten, keiner das Minimum von fünf Punkten. Die Stalltypen liegen mit sechs bis acht Punkten dazwischen, haben also Vor- und Nachteile in Bezug auf die Ammoniakemissionen.

Bei den heutigen Tierhaltungsprogrammen sind mit Blick auf die Ammoniakemissionen die Stalltypen mit angebautem Laufhof (d, g und h) schlechter zu bewerten (Grösse der verschmutzten Fläche, Häufigkeit der Reinigung der verschmutzten Fläche bei planbefestigter Ausführung) als die Stalltypen mit integriertem Laufhof. Die offenen Stalltypen b und e haben Vorteile bei der Grösse der verschmutzten Fläche und dem Klima im Winter als auch im Sommer.

### **5.2.3 Minderungsmassnahmen bei den einzelnen Stalltypen**

Die einzelnen Stalltypen eignen sich für die in Kapitel 3 diskutierten Minderungsmassnahmen unterschiedlich.

- Fütterungsmassnahmen lassen sich bei allen Stalltypen gleichermaßen umsetzen. Wichtig für eine ausgeglichene Ration sind die Auswahl und das Erntestadium der Raufutterkomponenten sowie die Komponenten der Ergänzungsfütterung.
- Die Lauffläche mit Rillenbodenelementen und optimierter Entmistungstechnik ist am besten bei wenigen, geraden Laufgangachsen mit einer darunter liegenden Güllegrube möglich. Der Betrieb a mit Selbstfütterung und verwinkeltem Laufhof ist dafür weniger geeignet.
- Fütterungsbuchten lassen sich bei allen Stalltypen mit einem Fressplatz in der Planungsphase einbauen. Bei den Stalltypen d, g und h könnte ein breiterer Laufgang erforderlich werden und somit eine grössere Gesamtfläche resultieren (nicht verschmutzte Fläche).
- Als Windschutz können bei allen offenen Stallgebäuden in der unteren Wandhälfte eine Holzwand, ein Windschutznetz oder auch angrenzende Gebäude, Sträucher und Büsche dienen.
- Für tiefere Temperaturen im Stall im Sommer können bei allen nicht wärmegeämmten Stalltypen ein wärmegeämmtes Dach und genügend grosse Wand- und Firstöffnungen und zusätzlich bei heissen Temperaturen eine Sprühkühlung eingeplant werden.
- Ein kleinerer Anteil nicht überdachter Fläche ist bei integriertem und angebautem Laufhof möglich.
- Managementmassnahmen im Bereich des Laufhofs (zeitweises Schliessen im Sommer, gestaffelte Nutzung) lassen sich nur bei angebautem Laufhof umsetzen. Bei den Stalltypen mit integriertem Laufhof benötigen die Tiere diese Fläche zur Zirkulation zwischen Liegebereich und Fressbereich.
- Vermehrte Weidehaltung im Sommer ist unabhängig vom Stalltyp möglich. Hindernisse für eine vermehrte Weidehaltung können eine ungünstige Futterzusammensetzung, höhere Gesamt-Stickstoff-Verluste, höhere Anforderungen an das Management sowie die Betriebsstruktur sein.
- Eine Erhöhung der Reinigungsfrequenz ist bei Ställen mit integriertem Laufhof und stationärer Entmistung einfach möglich. Bei den Stalltypen mit angebautem Laufhof ist ein häufiges Reinigen des Laufhofes schwieriger zu realisieren. Der Anteil von dort anfallendem Kot und Harn ist klein, doch die Fläche sehr gross. Bei häufigem Entmisten des Laufhofes mit bisher vorhandener Entmistungstechnik wird Kot und Harn meist nur auf der Fläche verteilt und verschmiert.

Eine Änderung des RAUS-Programmes könnte dazu beitragen, dass in Zukunft Ställe gebaut werden, die emissionsärmer sind. Möglichkeiten zu Änderungen sind

- Kein Laufhof bei Laufstallhaltung in Kombination mit Weidehaltung im Sommer,
- Kleinerer Anteil nicht überdachte Fläche, so dass 10 m<sup>2</sup> bei angebautem Laufhof ausreichen,
- Gleiche Laufhoffläche bei nicht permanent zugänglichem Laufhof.

#### 5.2.4 Zusammenfassende Rangierung von Stalltypen anhand dem Potenzial der Minderungsmassnahmen zur Reduktion der Ammoniakemissionen

Das Potenzial der im letzten Abschnitt diskutierten Minderungsmassnahmen ist bei den einzelnen Stalltypen unterschiedlich gross. Die Tabelle 13 zeigt das Punkteschema mit den gleichen Kriterien wie in Tabelle 12 nach Ausschöpfen möglicher Minderungsmassnahmen und denkbarer Anpassungen bei den Tierhaltungsprogrammen. Somit ergibt sich folgende Rangierung der Stalltypen:

$$\text{NH}_3 \uparrow \left| \begin{array}{ccc} & b & d \\ a & & \\ c & & \end{array} \right. > \left| \begin{array}{ccc} & e & \\ & f & \\ & & \end{array} \right. > \left| \begin{array}{ccc} & g & \\ & h & \\ & & \end{array} \right. \text{NH}_3 \downarrow$$

Tabelle 13: Rangierung der acht Stalltypen anhand emissionsrelevanter Kriterien inklusive dem Potential von Massnahmen bei Bau und Management zur Minderung der Ammoniakemissionen (tiefe Punktzahl entspricht niedriger Emissionen, hohe Punktzahl hoher Emissionen).

Kriterien	Punkte	Stalltyp							
		a	b	c	d	e	f	g	h
Grösse der verschmutzten Fläche (Lauffläche)		2	1	2	1	1	1	1	1
Anfall an Kot und Harn auf der nicht überdachten Laufhoffläche		2	2	2	1	2	2	1	1
Häufigkeit der Reinigung der Laufhoffläche bei planbefestigter Ausführung		2	1	1	1	1	1	1	1
Temperatur im Winterhalbjahr im Stall und Laufhof		1	1	1	1	1	1	1	2
Temperatur im Sommerhalbjahr im Stall und Laufhof		2	2	2	1	2	2	1	1
<b>Summe</b>		<b>9</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>6</b>

Die Änderungen der Rangierung in Tabelle 13 im Vergleich zu Tabelle 12 erfolgten durch die Grösse der verschmutzten Fläche, die Häufigkeit der Reinigung der Laufhoffläche sowie die Temperatur im Sommer. Die verschmutzte Fläche bei den Laufstalltypen mit angebautem Laufhof (d, g und h) lässt sich durch zeitweises Schliessen des Laufhofes im Sommer bei Weidehaltung sowie durch eine gestaffelte Nutzung des Laufhofes in Kombination mit einer Änderung der Vorschriften im RAUS-Programm reduzieren. Die Häufigkeit der Reinigung bei den Stalltypen mit integriertem Laufhof (b, c, e und f) lässt sich mit einer Zeitschaltuhr erhöhen, bei den Stalltypen mit angebautem Laufhof (d, g und h) ist der Laufhof im Sommer geschlossen und sauber gereinigt. Das Klima im Sommer (tiefere Temperaturen) kann bei den Laufstalltypen d und g durch ein isoliertes Dach verbessert werden. Schwierig ist es, die Temperatur im Fressbereich bei den Ställen mit integriertem Laufhof (a, b, c, e und f) zu reduzieren. Insgesamt ist das Potenzial für Minderungsmassnahmen bei den Stalltypen d, g und h wesentlich grösser als bei anderen Stalltypen (Reduktion Punktzahl 2 bis 3).

## 6 Empfehlungen für die Praxis

Die Schweiz ist gekennzeichnet durch den hohen Anteil Raufutter in der Ration, durch eher kleine Betriebsstrukturen sowie durch verschiedene Programme im Bereich der Tierhaltung.

Der hohe Anteil Raufutter in der Ration bringt häufig einen Rohproteinüberschuss. Folgende Massnahmen können den Rohproteinüberschuss vermindern oder sogar verhindern:

- Regelmässige Kontrolle der Inhaltsstoffe im Futter und Berechnung der Ration anhand der Fütterungsempfehlungen,
- Ersetzen von Raufutterkomponenten mit hohem Rohproteingehalt (junges Gras) durch Raufutterkomponenten mit tieferem Rohproteingehalt und
- Gezielte Ergänzungsfütterung mit älterem Gras, Heu und energiereichen Futtermitteln.

Die Tierhaltungsprogramme des Bundes und der verschiedenen Labelorganisationen haben die Gesamtfläche und damit den Anteil verschmutzter Fläche und den Anteil verschmutzter nicht überdachter Fläche im Vergleich zu Vorgaben der Tierschutzverordnung stark erhöht. Folgende Massnahmen können die Nachteile der grösseren verschmutzten Fläche vermindern:

- Zeitweises Schliessen des Laufhofes im Sommer,
- Erhöhung der Reinigungsfrequenz der Laufbereiche,
- Vermehrte Weidehaltung im Sommer.

Bei der Planung eines Stallbaus sollten folgende Punkte zur Reduktion der Ammoniakemissionen diskutiert werden:

- Wie gross ist die Gesamtfläche und bei welchen Tierhaltungsprogrammen soll eine Beteiligung möglich sein? Mit den minimalen Vorgaben der Tierschutzverordnung können Flächen eingespart werden. Wichtig ist, nicht mehr Lauffläche als nötig zu bauen bzw. zu nutzen.
- Ist ein angebauter oder integrierter Laufhof sinnvoller? Bei einem angebauten Laufhof sind verschiedene Nutzungsvarianten möglich, bei einem integrierten Laufhof nicht.
- Wieviele Laufgangachsen werden benötigt und wie sind diese anzuordnen? Der Einbau von optimierter Entmistungstechnik ist nur bei wenigen, geraden Laufgangachsen sinnvoll.
- Wie breit sind die Laufgänge zu planen? Fütterungsbuchten reduzieren den Anteil an verschmutzter Fläche. Die Laufgänge werden in diesem Fall insgesamt breiter als vorgegeben bei schmalerem verschmutztem Laufgangbereich.
- Ist das Stallklima im Sommer bei offenen Ställen gut? Möglichst tiefe Temperaturen im Sommer können durch ein wärmegeämmtes Dach und viel Frischluft durch offene Seitenwände erreicht werden. Als Windschutz reichen eine Holzwand in der unteren Wandhälfte, ein Windschutznetz oder auch angrenzende Gebäude, Sträucher und Büsche. Heute wird im Sommer der Luftwechsel mit grossen Ventilatoren sogar erhöht, um den Tieren die erhöhte Wärmeabgabe zu ermöglichen.

Ammoniakemissionen können durch geeignete Massnahmen bei Bau und Management im Stallbereich reduziert, aber durch ungeeignete Ausbringung wieder erhöht werden, so dass insgesamt keine Verbesserung erreicht wird. Daher ist auf geeignete Massnahmen zur Minderung von Ammoniakemissionen mit Blick auf die gesamte Verfahrenskette zu achten.

## 7 Forschungsbedarf und offene Fragen

Emissionsmessungen fehlen bei frei belüfteten Laufställen für Milchvieh weitgehend. Untersuchungen zu Ammoniakemissionen wurden bisher entweder im Labor oder in zwangsbelüfteten Ställen durchgeführt. Diese Ergebnisse sind aber nicht auf freibelüftete Ställe übertragbar. Auch Untersuchungen zu Minderungsmaßnahmen in frei belüfteten Ställen liegen kaum vor. In den folgenden Bereichen ist Forschungsbedarf vorhanden:

- Planbefestigte Laufflächen und perforierte Laufflächen mit darunter liegender Güllegrube sind bisher nicht vergleichend untersucht.
- Neuere Entwicklungen bei Laufflächen gehen in Richtung weich, verformbar, tiergerecht. Wie sich diese Laufflächen auf die Ammoniakemissionen auswirken, ist nicht geklärt.
- Erst in einem Versuch wurde die Wirkung der Weidehaltung auf die Ammoniakemissionen aus dem Stall untersucht. Vergleiche zwischen verschiedenen Weidestrategien (Vollweide, Ganztagesweide, Halbtagesweide) fehlen.
- Die tiergerechte Haltung wird mit vielen Vorgaben und Programmen gefördert. Für eine ökologische Landwirtschaft ist in Zukunft der Umweltschutz gleichermassen zu gewichten. Bei der Weiterentwicklung von Stallsystemen ist in Zukunft verstärkt darauf zu achten, dass Tiergerechtheit, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit im Einklang sind. Es könnten sich auch Konsequenzen für die Anforderungen von Tierhaltungsprogrammen ergeben.

## 8 Literaturverzeichnis

- Amon B., 1998. NH<sub>3</sub>-, N<sub>2</sub>O- und CH<sub>4</sub>-Emissionen aus der Festmistandehaltung für Milchvieh, Stall - Lagerung - Ausbringung. Dissertation, Universität für Bodenkultur BOKU Wien, VDI-MEG Schrift 331.
- Amon B.; Amon T. und Boxberger J. 1998. Untersuchungen der Ammoniakemissionen in der Landwirtschaft Österreichs zur Ermittlung der Reduktionspotentiale und Reduktionsmöglichkeiten. Forschungsprojekt Nr. L 883/94, Institut für Land-, Umwelt- und Energietechnik der Universität für Bodenkultur BOKU, Wien.
- Amon B.; Amon T. und Boxberger J. 2000. Untersuchungen der Ammoniakemissionen in der Landwirtschaft Österreichs zur Ermittlung der Reduktionspotentiale und Reduktionsmöglichkeiten. Der Förderungsdienst, Beratungsservice 48 (1), 4-8.
- Andersson M., Jeppson K.H. and Von Wachenfelt E., 1994. Ammonia emission from different surfaces in livestock buildings. AgEng Conference, Milano, Report 94-C-001, 185-186.
- Berg W. and Hörnig G., 1997. Emission reduction by acidification of slurry – investigations and assessment. In: Ammonia and odour control from animal production facilities, Ag Eng International Symposium, Vinkeloord, 459-466.
- Berg W., Hörnig G. und Türk M., 1997. Die Wirkungen von Milchsäure auf die Gülleeigenschaften, die Emissionen und den Pflanzenertrag. 3. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, Kiel, 499-506.
- Berg W., Hörnig G. und Türk M., 1998. Güllebehandlung mit Milchsäure. Landtechnik 53, 378-379.
- Berry N.R., Zeyer K., Emmenegger L. und Keck M., 2005. Emissionen von Staub (PM10) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>) aus traditionellen und neuen Stallsystemen (ESAS). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern (in Vorbereitung).
- Bio-Suisse, 2004. Richtlinien für die Erzeugung, Verarbeitung und den Handel von Knospe-Produkten. Bio-Suisse, Basel.
- Bleijenberg R., Kroodsmas W. and Ogink N.W.M., 1994. Techniques for the reduction of ammonia emissions from a cubicle house with slatted floor. Report 94-35, IMAG-DLO, Agricultural Research Department, Wageningen.
- BLW, 1998a. Verordnung des EVD über den regelmässigen Auslauf von Nutztieren im Freien (RAUS-Verordnung). Stand 28. Dezember 2004. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.
- BLW, 1998b. Verordnung des EVD über besonders tierfreundliche Stallhaltungssysteme (BTS-Verordnung). Stand 28. Dezember 2004. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.
- BLW, 2003. Agrarbericht 2003. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.
- Borka G., 1998. Modelluntersuchungen zur Bestimmung der Ammoniakemissionen aus Rinderexkrementen im Stallbereich. Dissertation Nr. 12830, ETH Zürich, 129 S.
- Boussery K., 2003. Mestkelders met water- en mestkanaal. AgriConstruct 6 (3), S. 20-22.
- Braam C.R., Ketelaars J.J.M.H. and Smits M.C.J., 1997a. Effects of floor design and floor cleaning on ammonia emission from cubicle houses for dairy cows. Netherlands Journal of Agricultural Science 45, 49-64.
- Braam C.R., Smits M.C.J., Gunnink H. and Swierstra D., 1997b. Ammonia emission from a double-sloped solid floor in a cubicle house for dairy cows. Journal of Agricultural Engineering Research 68, 375-386.
- Brose G., 2000. Emission von klimarelevanten Gasen, Ammoniak und Geruch aus einem Milchviehstall mit Schwerkraftlüftung. Dissertation, Universität Hohenheim, 136 S.

- BUWAL 2004. Stickstoffhaltige Luftschadstoffe – Fragen und Antworten zu stickstoffhaltigen Luftschadstoffen aus Verkehr, Industrie/Gewerbe, Haushalten und Landwirtschaft. Stand 11. März 2004. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- De Boer I.J.M., Smits M.C.J., Mollenhorst H., van Duinkerken G. and Monteny G.J., 2002. Prediction of ammonia emission from dairy barns using feed characteristics. Part I: Relation between feed characteristics and urinary urea concentration. *Journal of Dairy Science* 85, 3382-3388.
- De Boer W.J., Keen A. and Monteny G.J., 1994. The effect of flushing on the ammonia emission from dairy cattle houses, estimation of treatment effects and accuracies by time series analysis. Report 94-6, IMAG-DLO, Agricultural Research Department, Wageningen.
- Demmers T.G.M., Burgess L.R., Short J.L., Phillips V.R., Clark J.A. and Wathes C.M. 1998. First experiences with methods to measure ammonia emissions from naturally ventilated cattle buildings in the UK. *Atmospheric Environment* 32 (3), 285-293.
- Demmers T.G.M., Phillips V.R., Short L.S., Burgess L.R., Hoxey R.P. and Wathes C.M., 2001. Validation of ventilation rate measurement methods and the ammonia emission from naturally ventilated dairy and beef buildings in the United Kingdom. *Journal of Agricultural Engineering Research* 79 (1), 107-116.
- Dinn N.E., Shelford J.A. and Fisher L.J., 1998. Use of the cornell net carbohydrate and protein system and rumen-protected Lysine and Metionine to reduce nitrogen excretion from lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 81, 229-237.
- EVD, 1981. Tierschutzverordnung (TSchV). Stand 4. September 2001. Eidgenössisches Volksdepartement EVD, Bern.
- Fisher L.J., Dinn N.E., Shelford J.A. and Paul J.W., 2000. The effect of concentration and form of dietary nitrogen on the utilisation and excretion of nitrogen by lactating dairy cows. *Canadian Journal of Animal Science* 80, 207-209.
- Fox D.G., Tedeschi L.O., Tylutki T.P., Russell J.B., Van Amburgh M.E., Chase L.E., Pell A.N. and Overton T.R., 2004. The cornell net carbohydrate and protein system model for evaluating herd nutrition and nutrient excretion. *Animal Feed Science and Technology* 112, 29-78.
- Frank B. and Swensson C., 2002a. Relationship between content of crude protein in rations for dairy cows and milk yield, concentration of urea in milk and ammonia emissions. *Journal of Dairy Science* 85, 1829-1838.
- Frank B., Persson M. and Gustafsson G., 2002b. Feeding dairy cows for decreased ammonia emission. *Livestock Production Science* 76, 171-179.
- Frosch W. und Büscher W., 2001. Einsatz von Flüssigmist-Additiven zur Emissionsminderung. *Landtechnik* 56, 152-153.
- Frosch W. und Büscher W., 2002. Einsatz chemischer Flüssigmist-Additive zur Emissionsminderung. In: *Emissionen der Tierhaltung – Grundlagen, Wirkungen, Minderungsmaßnahmen*. KTBL-Schrift 406, 123-134.
- Gazzarin C. und Hilty R., 2002. Stallsysteme für Milchvieh: Vergleich der Bauinvestitionen. FAT-Berichte 586, Agroscope FAT Tänikon.
- Groenestein C.M., 1993. Animal-Waste management and emission of ammonia from livestock housing systems: Field studies. 4<sup>th</sup> International Symposium of Livestock Environment, University of Warwick, Coventry, 1169-1175.
- Groenestein C.M. and Montsma H., 1991. Field study on emission of ammonia from livestock housing systems II: Tying stall for dairy cows. Report 91-1002, IMAG-DLO, Agricultural Research Department, Wageningen.

- Groot Koerkamp P.W.G., Metz J.H.M., Uenk G.H., Phillips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P., Hartung J., Seedorf J., Schröder M., Linkert K.H., Pedersen S., Takai H., Johnsen J.O. and Wathes C.M., 1998. Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70 (1), 79-95.
- Hendriks J., Berckmans D. and Vinckier C., 1997. Field test of Bio-additives to reduce ammonia emission from pig houses. In: *Ammonia and odour control from animal production facilities*, Ag Eng International Symposium, Vinkeloord, 707-714.
- Hendriks J.G.L. and Vrielink M.G.M., 1997. Reducing ammonia emission from pig houses by adding or producing organic acids in pig slurry. In: *Ammonia and odour control from animal production facilities*, Ag Eng International Symposium, Vinkeloord, 493-501.
- Hörnig G., Türk M und Müller H.J., 1994. Zur Wirkung von Futter- und Güllezusatzstoffen auf die Emission von Schadgasen und Geruchsstoffen sowie auf die Homogenität und Fließfähigkeit von Schweine- und Rindergülle. *Forschungsbericht des Institut für Agrartechnik Bornim e.V. ATB* 1994/1, 132 S.
- Hörnig G., Berg W. and Türk M., 1996. Effect of feed and slurry additives on ammonia emission and slurry properties. *AgEng Conference, Madrid, Paper 96E-028*, 771-772.
- Hörnig G. und Scherping E., 1998a. Wirkung der sorbierenden Minerale Zeolith und Bentonit als Futterzusatz für Milchkühe. *Forschungsbericht des Institut für Agrartechnik Bornim e.V. ATB* 1998/4, 70 S.
- Hörnig G., Berg W. und Türk M., 1998b. Emissionsminderung durch Ansäuern von Gülle. *Landtechnik* 53, 146-147.
- IP-Suisse, 2004. Richtlinien für Milch. Schweizerische Vereinigung integriert produzierender Bauern und Bäuerinnen Rüüi, Zollikofen.
- Kagfreiland, 2001. Anforderungen Rindvieh. Kagfreiland, St. Gallen.
- Keck M., 1997. Ammonia emission and odour thresholds of cattle houses with exercise yards. In: *Ammonia and odour control from animal production facilities*, Ag Eng International Symposium, Vinkeloord, 349-354.
- Keck M., Zähler M. und Hauser R., 2004. Minimalställe für Milchkühe bewähren sich – Empfehlungen für die Planung und den Betrieb. *FAT-Berichte 620, Agroscope FAT Tänikon*.
- Kröber T.F., Külling D.R., Menzi H., Sutter F. and Kreuzer M., 2000. Quantitative effects of feed protein reduction and Methionine on nitrogen use of cows and nitrogen emission from slurry. *Journal of Dairy Science* 83, 2941-2951.
- Kroodsma W., Huis in't Veld J.W.H. and Scholtens R., 1993. Ammonia emission and its reduction from cubicle houses by flushing. *Livestock Production Science* 35, 293-302.
- Kroodsma W., Willers H.C., Huis J.W.H. and Ogink N.W.M., 1994. Reduction of ammonia emission from cubicle houses for cattle by slurry acidification. *AgEng Conference, Milano, Report 94-C-028*, 232.
- Kroodsma W., Bleijenberg R. and Ogink N.W.M., 1996. Reduction of ammonia emission from a cubicle house by a tide system with acidified slurry. *Report 96-03, IMAG-DLO, Agricultural Research Department, Wageningen*.
- Kroodsma W. and Ogink N.W.M., 1997. Volatile emissions from cow cubicle houses and its reduction by immersion of the slats with acidified slurry. In: *Ammonia and odour control from animal production facilities*, Ag Eng International Symposium, Vinkeloord, 475-483.
- Külling D.R., Menzi H., Kröber T.F., Neftel F., Sutter F., Lischer P and Kreuzer M., 2001. Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from different types of dairy manure during storage as affected by feed protein content. *Journal of Agricultural Science* 137, 235-250.

- Külling D.R., Menzi H., Sutter F., Lischer P and Kreuzer M., 2003. Ammonia, nitrous oxide and methane emissions from differently stored dairy manure derived from grass- and hay-based rations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65, 13-22.
- Menzi H., Frick R. und Kaufmann R., 1997. Ammoniak-Emissionen in der Schweiz. Ausmass und technische Beurteilung des Reduktionspotentials. Schriftenreihe der FAL 26, FAL/IUL Zürich-Reckenholz.
- Metz J.H.M, Ogink J.H.M. and Smits M.C.J, 1995. Research on housing systems and manure treatment to reduce ammonia emissions in a dairy husbandry. In: *Applied research for sustainable dairy farming, Conference, Lelystad*, 36-39.
- Misselbrook T.H., Pain B.F. and Headon D.M., 1998. Estimates of ammonia emission from dairy cow collecting yards. *Journal of Agricultural Engineering Research* 71, 127-135.
- Misselbrook T.H., Webb J., Chadwick D.R., Ellis S and Pain B.F., 2001. Gaseous emissions from outdoor concrete yards used by livestock. *Atmospheric Environment* 35, 5331-5338.
- Monteny G.J., 2000. Modelling of ammonia emissions from dairy cow houses. Ph. Thesis, University of Wageningen.
- Monteny G.J. and Erismann J.W., 1998. Ammonia emission from dairy cow buildings: a review of measurement techniques, influencing factors, and possibilities for reduction. *Netherland Journal of Agricultural Science* 46, 225-247.
- Monteny G.J., Schulte D.D., Elzing A. and Lamaker E.J.J., 1998. A conceptual mechanistic model for the ammonia emissions from free stall cubicle dairy cow houses. *Transaction of the ASAE* 41, 193-201.
- Monteny G.J., Smits M.C.J., van Duinkerken G., Mollenhorst H. and De Boer I.J.M., 2002. Prediction of ammonia emission from dairy barns using feed characteristics. Part II: Relation between urinary urea concentration and ammonia emission. *Journal of Dairy Science* 85, 3389-3394.
- Ogink N.W.M and Kroodsma W., 1996. Reduction of ammonia emission from a cow cubicle house by flushing with water or a formalin solution. *Journal of Agricultural Engineering Research* 63, 197-204.
- Oosthoek J., Kroodsma W and Hoeksma P. 1991. Ammonia emission from dairy and pig housing systems. In: *Odour and ammonia emissions from livestock farming, Seminar, Silsoe, UK*, 31-41.
- Parker D.B., Pandrangi S., Greene L.W., Almas L.K., Cole N.A., Rhoades M.B. and Koziel J., 2004. Application rate and timing effects on urease inhibitor performance for minimizing ammonia emissions from beef cattle feedyards. *ASAE Paper No. 04-4080*.
- Paul J.W., Dinn N.E., Kannangara T. and Fisher L.J., 1998. Protein content in dairy cattle diets affects ammonia losses and fertilizer nitrogen value. *Journal of Environmental Quality* 27, 528-534.
- RAP, 1999. Fütterungsempfehlungen und Nährwerttabellen für Wiederkäuer. 4. überarb. Auflage. *Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale, Zollikofen*, 327 S.
- Reidy B. und Menzi H., 2004. Entwicklung der Emissionen in der Schweiz und in Europa. LBL-Kurs 04.204 N-Effizienz steigern – Ammoniakverluste vermindern, *Landwirtschaftliche Beratungszentrale LBL, Lindau*.
- Rom H.B., Zhang G.Q. and Wang C., 2004. Survey of ammonia emission from naturally ventilated housing facilities for cattle. *AgEng Conference, Leuven, Paper 22-296*, 668.
- Seipelt, F., 1999. Quantifizierung und Bewertung gasförmiger Emissionen aus frei gelüfteten Milchviehställen. *Dissertation, Universität Göttingen, VDI-MEG Schrift 336*.

- Seipelt F., Ross A., Steffens G. und Van den Weghe H., 1999. Quantifizierung gasförmiger Emissionen aus frei gelüfteten Milchviehställen mittels Tracesgaseinsatz nach der Abklingmethode. 3. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, München-Weihenstephan, 69-74.
- Shi Y., Parker D.B., Cole N.A., Auvermann B.W. and Mehlhorn J.E., 2001. Surface amendments to minimize ammonia emissions from beef cattle feedlots. Transaction of the ASAE 44 (3), 677-682.
- Smits M.C.J., Valk H., Elzing A. and Keen A., 1995. Effect of protein nutrition on ammonia emission from a cubicle house for dairy cattle. Livestock Production Science 44, 147-156.
- Smits M.C.J., Valk H., Monteny G.J. and Van Vuuren A.M., 1997. Effect of protein nutrition on ammonia emission from cow houses. In: Jarvis S.C. and Pain B.F. (Eds.), Gaseous nitrogen emissions from grasslands, CAB International, Wallingford, 101-107.
- Stefanowska J., Swierstra D., Braam C.R. and Hendricks M.M.W.B., 2001. Cow behaviour on a new grooved floor in comparison with a slatted floor, taking claw health and floor properties into account. Applied Animal Behaviour Science 71, 87-103.
- Svennerstedt B., 1996. Drainage properties and ammonia emissions of slatted floor systems for animal buildings. AgEng Conference, Madrid, Report 96-B-082, 479-480.
- Svennerstedt B., 1999. Drainage properties and ammonia emissions in slatted floor systems for animal buildings. Journal of Agricultural Engineering Research 72, 19-25.
- Swierstra D. and Braam C.R., 1999. Grooved floor system to reduce ammonia emission and to prevent slipperiness in loose houses for cows. 3. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, München-Weihenstephan, 487-490.
- Swierstra D., Smits M.C.J. and Kroodsmas W., 1995. Ammonia emission from cubicle houses for cattle with slatted and solid floors. Journal of Agricultural Engineering Research 62, 127-132.
- Swierstra D., Braam C.R. and Smits M.C., 2001. Grooved floor system for cattle housing: ammonia emission reduction and good slip resistance. Applied Engineering in Agriculture 17, 85-90.
- Tamminga S., 1992. Nutrition management of dairy cows as a contribution to pollution control. Journal of Dairy Science 75, 345-357.
- Tamminga S., Van Straalen W.M., Subnel A.P.J., Meijer R.G.M., Steg A., Wever C.J.G. and Blok M.C., 1994. The Dutch protein evaluation system: the DVE/OEB-system. Livestock Production Science 40, 139-155.
- Valk H., 1994. Effects of partial replacement of herbage by maize silage on N-utilisation and milk production of dairy cows. Livestock Production Science 40, 241-250.
- Van Caenegem L., Hilty R., Ammann H. und Näf E., 1996. Boxenlaufställe – Baukonzept und Ausbaustandard beeinflussen die Betriebskosten. FAT-Berichte 488, Agroscope FAT Tänikon.
- Van der Heiden-de Vos J.J.C., Scholtens R. and Van t'Ooster A., 1994. Mass balance methods for measuring ventilation rates and ammonia emission from naturally ventilated livestock houses. AgEng Conference, Milano, Report 94-C-026.
- Van t'Ooster A., Scholtens R. and Van der Heiden-de Vos J.J.C., 1994. Emission from the cow stall. Ammonia emission from naturally ventilated stalls is now possible. Landbouwmechanisatie 45 (7), 12-14.
- Varel V.H., 1997. Use of urease inhibitors to control nitrogen loss from livestock waste. Bioresource Technology 62 (1), 11-17.

- Varel V.H., Nienaber J.A. and Byrnes B.H., 1997. Urease inhibitors reduce ammonia emissions from cattle manure. In: Ammonia and odour control from animal production facilities, Ag Eng International Symposium, Vinkeloord, 721-728.
- Varel V.H., Nienaber J.A. and Freetly H.C., 1999. Conservation of nitrogen in cattle feedlot waste with urease inhibitors. *Journal of Animal Science* 77 (5), 1162-1168.
- Webb J., Balsdon S. and Chadwick D., 2003. Investigation of how ammonia emissions from buildings housing cattle vary with the time cattle spend inside those buildings. 6<sup>th</sup> Conference of Construction, Engineering and Environment in Livestock Farming, Vechta, 303-310.
- Yu P., Christensen D.A. and McKinnon J.J., 2003. Comparison of the National Research Council-2001 model with Dutch system (DVE/OEB) in the prediction of nutrient supply to dairy cows from forages. *Journal of Dairy Science* 86, 2178-2192.
- Zähner M., Keck M. und Van Caenegem L., 2000. Minimalställe für Milchkühe – Ergebnisse einer Umfrage auf Praxisbetrieben. FAT-Berichte 553, Agroscope FAT Tänikon.