

HÜRDENKONZEPT IN DER FLEISCHWISSENSCHAFT

Geschichte, Wissenschaft, Wegbereiter und praktische Anwendung

Ein umfassendes technisches Nachschlagewerk für Fleischwissenschaftler und
Produktentwickler

Erstellt von Earthworm Writing & Research Studio

Eben van Tonder & Christa van Tonder-Berger

Februar 2026

INHALTSVERZEICHNIS

Nr.	Titel	Seite
	EINLEITUNG	3
	ABSCHNITT 1: EINE WISSENSCHAFTSGESCHICHTE	5
1.1	William James Scott: Die Wasseraktivität als maßgebliche Variable	5
1.2	M. Loncin: Der stille Vorläufer	8
1.3	Lothar Leistner: Der Architekt des Hürdenkonzepts	8
1.4	Leon G.M. Gorris: Homöostase und die lebendige Hürde	10
1.5	Grahame W. Gould: Mikrobielle Stressreaktionen und die Sporenwelt	11
	ABSCHNITT 2: DIE WISSENSCHAFT ERKLÄRT	12
2.1	Wassergehalt versus Wasseraktivität: Der entscheidende Unterschied	12
2.2	Drei Ebenen des gebundenen Wassers in Muskelgewebe	15
2.3	Das Hürdenkonzept und der Hürdeneffekt	17
2.4	Die wesentlichen Hürden: Ein systematischer Überblick	18
2.5	Homöostase, metabolische Erschöpfung und Stressreaktionen	20
2.6	Das Multitarget-Konzept und seine Implikationen	21
2.7	Typische Wasseraktivitätswerte für wichtige Fleischprodukte	21
2.8	Hydrokolloide in der modernen Fleischformulierung	24
2.9	Hydrokolloide in Proteinnetzwerk-Fleischsystemen	26
	ABSCHNITT 3: OPTIMALE HÜRDENSYSTEME NACH PRODUKTKATEGORIE	32
3.1	Speck: Bauch- und Rückenspeck (Schwein)	32
3.2	Trockenwürste: Fermentierte Salamiarten (Rind/Schwein)	33
3.3	Biltong (Rind, Wild, Strauß)	33
3.4	Kilishi (Rind, Hammel, Ziege: Nigerianisches getrocknetes Fleisch)	34
3.5	Pastrami (Rind: Heißgeräucherter gepökelter Ganzmuskel)	35
3.6	Ganzmuskeln-Schinken: Kasseler, Geformte Schinken	35
3.7	Krainer-artige Würste (Russische und Ungarische Wurst)	36
3.8	Wiener Würstchen / Frankfurter (Rind, Schwein, Huhn)	37
3.9	Luncheon-Fleisch (Gegarte Formerzeugnisse: Alle Arten)	37
3.10	Frischfleisch ohne MAP (Alle Arten)	38
3.11	Frischfleisch mit MAP	38
3.12	Vakuumverpacktes und Skin-verpacktes Fleisch	38
	ABSCHNITT 4: HOCHDRUCKVERARBEITUNG (HPP) ALS HÜRDE	40
4.1	Die Wissenschaft der HPP	40
4.2	HPP-Anwendungen in der Fleischverarbeitung	40
4.3	HPP-Kosten-Nutzen-Analyse gegenüber traditionellen Konservierungsmitteln	41
	ABSCHNITT 5: WAS SEIT LEISTNER GELERNT WURDE	43
5.1	Quantitative Prädiktive Mikrobiologie	43
5.2	Die Gamma-Hypothese und Synergiequantifizierung	43
5.3	Biokonservierung: Milchsäurebakterien als gezielte Hürde	44
5.4	Natürliche Antimikrobielle	44
5.5	Implikationen der antimikrobiellen Resistenz	44
5.6	Intelligente Verpackung als aktive Hürde	45
	ABSCHNITT 6: DIE ZUKUNFT: KONSERVIERUNGSWISSENSCHAFT IM JAHR 2075	46
6.1	KI-gestaltete Hürdensysteme	46
6.2	Biologische Hürden: Bakteriophagen und antimikrobielle Peptide	46
6.3	Personalisierte Konservierung und Verbraucherdaten	46
6.4	Clean-Label-Druck und Nitritreduktion	47
6.5	Systembiologie des mikrobiellen Stresses	47
	SCHLUSSFOLGERUNG	48
	LITERATURVERZEICHNIS	49

EINLEITUNG

Lebensmittelkonservierung ist älter als die Schrift. Lange bevor die Wissenschaft erklären konnte, warum Salz, Rauch, Säure und Austrocknung Fleisch genießbar hielten, wussten Generationen von Metzgern, Bauern und Soldaten, dass die Kombination dieser Methoden besser wirkte als jeder einzelne Ansatz für sich allein. Was fehlte, war nicht die Praxis, sondern das konzeptionelle Gerüst, das empirisches Handwerk in eine bewusste, reproduzierbare Wissenschaft verwandeln konnte.

Dieses Dokument verfolgt die Ideengeschichte jener Verwandlung: von William James Scotts Entdeckung im Jahr 1953, dass nicht der Wassergehalt, sondern die Wasseraktivität die mikrobielle Vermehrung bestimmt; über M. Loncins Erkenntnis von 1976, dass die Kombination milder Konservierungsfaktoren extreme Einzelmaßnahmen ersetzen kann; bis zu Lothar Leistners dreißigjährigem Aufbau des Hürdenkonzepts als vollständiges wissenschaftliches System. Es stellt die Mitarbeiter vor – Leon G.M. Gorris und Grahame W. Gould –, die dieses System um die Mikrobiologie, Homöostase und metabolische Erschöpfung erweiterten. Und es wendet das gewonnene Verständnis auf die praktischen Aufgaben an, mit denen Fleischwissenschaftler heute konfrontiert sind.

Die angesprochene Leserschaft sind berufstätige Fleischwissenschaftler oder Produktentwickler, die nicht nur theoretische Grundlagen benötigen, sondern auch umsetzbare Hürdenparameter für bestimmte Produktkategorien: von trocken gepökeltm Biltong und Kilishi über gegarte Ganzmuskeln-Schinken, emulgierte Brühwürste, fermentierte Pökelwaren bis hin zu Frischfleisch unter verschiedenen Verpackungsbedingungen.

Das Dokument schließt mit einer ehrlichen Bewertung der Hochdruckverarbeitung (HPP) als Hürde, einer Zusammenfassung der Erkenntnisse seit den Grundlagenarbeiten, einer neuen Analyse der Wasseraktivität für wichtige Produktkategorien in drei regulatorischen Märkten (EU, Südafrika und Mexiko) sowie einem fundierten Ausblick darauf, wie die Konservierungswissenschaft in fünfzig Jahren aussehen könnte.

Anmerkung zur Redlichkeit und Evidenz: Dieses Dokument berichtet ausschließlich das, was durch die angeführte begutachtete und primäre Fachliteratur belegt ist, sofern nicht ausdrücklich anders vermerkt. Für die Zwecke dieses Dokuments umfasst „Primärliteratur“: (a) begutachtete wissenschaftliche Zeitschriftenartikel; (b) anerkannte Lehrbücher der Fleisch- und Lebensmittelwissenschaft; (c) staatliche Rechtsvorschriften, amtliche EU-Verordnungen und behördliche Durchführungsrichtlinien, die als Primärquellen für regulatorische und rechtliche Aussagen gelten – ebenso wie in jeder begutachteten lebensmittelsicherheitlichen Publikation; (d) Online-Fachforen, wo ausdrücklich zitiert und kenntlich gemacht. Dies entspricht der üblichen Zitierpraxis in Lebensmittelwissenschaftszeitschriften, darunter das International Journal of Food Microbiology, Food Microbiology und Meat Science. Die regionalen Wasseraktivitätsdaten für Südafrika und Mexiko in Abschnitt 2.7 sind eine anerkannte Lücke: Begutachtete Messstudien für kommerzielle Fleischprodukte in

diesen Märkten sind wesentlich weniger verfügbar als für EU-Produkte, und die Angaben für SA und MX sind durchgängig als Richtwerte gekennzeichnet. Wo die Datenlage unvollständig ist, wird dies ausdrücklich vermerkt. Parameter werden nicht über das durch die Daten Gestützte hinaus interpoliert.

ABSCHNITT 1: DIE WEGBEREITER – IHR LEBEN UND IHRE WISSENSCHAFT

Wissenschaft wird von Menschen gemacht. Die Fachliteratur neigt dazu, sie auf Nachnamen und Jahreszahlen zu reduzieren. Dieser Abschnitt stellt die menschliche Dimension wieder her, ohne dabei an Genauigkeit einzubüßen.

1.1 William James Scott: Die Wasseraktivität als maßgebliche Variable in der Lebensmittelkonservierungsmikrobiologie

Zu den einflussreichsten konzeptionellen Beiträgen zur Lebensmittelkonservierungsmikrobiologie zählt die Arbeit von William James Scott, einem australischen Mikrobiologen der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts. Er wies experimentell nach, dass nicht der Gesamtwassergehalt, sondern die Wasseraktivität die Variable ist, die darüber entscheidet, ob Mikroorganismen in einem Lebensmittelsubstrat wachsen können. Das Konzept der Wasseraktivität als thermodynamische Größe war nicht neu: Es entstammt der physikalischen Chemie der Lösungen und war in anderen wissenschaftlichen Zusammenhängen längst gebräuchlich, bevor Scott es auf die Lebensmittelmikrobiologie anwandte. Was Scott lieferte, war die Anwendung dieser thermodynamischen Größe auf das mikrobielle Verhalten in Lebensmitteln und damit die Ablösung der bis dahin üblichen Verlässlichkeit auf den Feuchtigkeitsgehalt als primäres Stabilitätskriterium – ein Ansatz, der in der Praxis zu unerklärlichen Widersprüchen geführt hatte. Scotts Veröffentlichungen von 1953 und 1957 sind Grundlagenreferenzen auf diesem Gebiet und bleiben der Standardausgangspunkt für Wasseraktivität und Lebensmittelmikrobiologie. [Ref. 1, 2]

Im Jahr 1953 veröffentlichte Scott zwei wegweisende Arbeiten im Australian Journal of Biological Sciences. Die erste befasste sich mit den Wasserverhältnissen von *Staphylococcus aureus*; die zweite, gemeinsam mit J.H.B. Christian verfasst, untersuchte Salmonellen. In diesen Arbeiten wies Scott experimentell nach, dass nicht die im Substrat insgesamt vorhandene Wassermenge das Mikrobewachstum bestimmte, sondern die thermodynamische Verfügbarkeit dieses Wassers – seine Aktivität, gemessen als Verhältnis des Dampfdrucks des Wassers im Lebensmittel zum Dampfdruck von reinem Wasser bei gleicher Temperatur. Dieses Verhältnis, ausgedrückt als dimensionslose Zahl zwischen 0 und 1,0, wurde zum Wasseraktivitätswert (a_w). [Ref. 1, 2, 44]

Scotts Arbeit von 1957 in *Advances in Food Research* systematisierte diese Erkenntnisse und legte Grenzwerte der a_w für wichtige Gruppen lebensmittelverderbender und pathogener Organismen fest. Diese Werte haben die Entwicklung regulatorischer Kriterien für Lebensmittel mit intermediärem Feuchtigkeitsgehalt in mehreren Rechtssystemen beeinflusst, wenngleich die konkreten Rechtsinstrumente, die a_w -Schwellenwerte aufnehmen, je nach Land und Produktkategorie unterschiedlich sind und ihr Verhältnis zu Scotts ursprünglicher Arbeit eher wissenschaftlicher Natur als direkter Ableitung entspricht. [Ref. 2]

Scott wirkte im australischen CSIRO-System (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). Was unbestreitbar ist, ist das Ausmaß seines Beitrags: Der Übergang vom Feuchtigkeitsgehalt zur Wasseraktivität als primärem mikrobiologischem Kontrollparameter eröffnete die gesamte moderne Ära des Designs lagerstabiler und feuchtigkeitsarmer Lebensmittel.

Wesentlicher Beitrag: Scotts experimentelle Arbeit belegt, dass nicht die Wassermenge in einem Lebensmittel darüber entscheidet, ob Mikroorganismen darin gedeihen können, sondern die energetische Verfügbarkeit dieses Wassers – seine thermodynamische Aktivität. Ein Lebensmittel mit 50 % Feuchtigkeitsgehalt kann vollkommen stabil sein, wenn das Wasser ausreichend an Solute oder die Lebensmittelmatrix gebunden ist; ein Lebensmittel mit 15 % Feuchtigkeit kann mikrobiologisch instabil sein, wenn das Wasser vollständig frei vorliegt. Diese Unterscheidung, heute zentraler Bestandteil jedes in diesem Dokument beschriebenen Hürdensystems, wurde von Scott mit Strenge und praktischer Klarheit in seinen Veröffentlichungen von 1953 und 1957 nachgewiesen. [Ref. 1, 2]

Mehr erfahren: Wie Scott nachwies, dass die thermodynamische Wasserverfügbarkeit – und nicht der Gesamtwassergehalt – das Mikrobewachstum bestimmt

Das Konzept der Wasseraktivität als thermodynamische Größe war nicht neu, als Scott es auf die Lebensmittelmikrobiologie anwandte. Es entstammt der physikalischen Chemie der Lösungen und war seit Jahrzehnten in der Thermodynamik und im Chemieingenieurwesen gebräuchlich, bevor Scott es auf Lebensmittelsysteme übertrug. Was Scott lieferte, war die Anwendung dieser Größe auf das mikrobielle Verhalten in realen Lebensmittelsystemen und damit die Ablösung der damals üblichen Verlässlichkeit auf den Feuchtigkeitsgehalt als primäres Stabilitätskriterium – ein Ansatz, der in der Praxis zu unerklärlichen Widersprüchen geführt hatte. Ein Lebensmittelhersteller, der sich allein auf den Feuchtigkeitsgehalt verließ, konnte beobachten, wie zwei Produkte mit identischer Feuchtigkeit unterschiedlich verhielten – das eine verderbend, das andere monatelang stabil –, ohne dass es hierfür einen wissenschaftlichen Erklärungsrahmen gab. Scotts Veröffentlichungen von 1953 und 1957 zeigten experimentell, dass die bestimmende Variable nicht die vorhandene Gesamtwassermenge war, sondern ihre thermodynamische Verfügbarkeit, gemessen als Verhältnis des Dampfdrucks des Wassers im Lebensmittel zu dem von reinem Wasser bei gleicher Temperatur. [Ref. 1, 2]

Warum Solute die a_w senken: Das Raoult'sche Gesetz und das Molbruchprinzip. Nicht alle Solute sind bei gleicher Massezugabe gleich wirksam bei der Senkung der a_w . Das Raoult'sche Gesetz besagt, dass die Dampfdruckerniedrigung vom Molbruch der Solutpartikel abhängt, nicht von ihrer Masse. Natriumchlorid dissoziiert in Wasser in zwei Ionen (Na^+ und Cl^-), sodass jedes zugegebene Mol effektiv zwei Mol Solutpartikel beiträgt und die a_w etwa doppelt so wirksam senkt wie ein nicht-dissoziierendes Solut gleicher Molmasse. Saccharose dissoziiert nicht und erfordert wesentlich größere Massezugaben, um dasselbe a_w -Ziel zu erreichen. Glycerol ist klein und nicht-dissoziierend, aber je Gramm wirksam, da seine niedrige Molmasse einen hohen Molbruch je Masseneinheit ergibt. Deshalb bleibt Salz das dominierende a_w -senkende Solut bei

der Fleischkonservierung. Kombinationen von Soluten in moderaten Konzentrationen können dieselbe Ziel-aw erreichen wie eine hohe Konzentration eines einzelnen Soluts – häufig mit verbesserten sensorischen Ergebnissen. In der Praxis von Fleischsystemen bedeuten die Wechselwirkungen zwischen Wasser, Proteinstruktur und mehreren Soluten, dass die Fertigprodukt-aw aus Rezepturberechnungen nur selten verlässlich vorhergesagt werden kann und stets durch direkte Messung bestätigt werden muss. [Ref. 1, 9, 17]

Wasser in Fleisch liegt in drei energetisch unterschiedlichen Zuständen vor, die jeweils einen anderen Beitrag zum Dampfdruck leisten und unterschiedlich empfänglich für Soluteinwirkung sind. Gebundenes Wasser ist die monomolekulare Hydratationsschicht, die durch starke elektrostatische Wechselwirkungen und Wasserstoffbrückenbindungen direkt an polaren Stellen der myofibrillären und sarkoplasmischen Proteine gehalten wird. Es weist einen stark erniedrigten Dampfdruck und einen wesentlich niedrigeren Gefrierpunkt als Freiwasser auf, ist für Mikroorganismen praktisch nicht verfügbar und beträgt annähernd 0,04 bis 0,06 g je Gramm Trockensubstanz. Keine realistische Salzzugabe oder Trocknungsmaßnahme verändert diesen Anteil nennenswert. Immobilisiertes Wasser wird innerhalb des myofibrillären Gitters durch elektrostatische und sterische Einschränkungen – nicht durch direkte chemische Bindung – gehalten. Es ist das dominierende Wasserkompartiment im Muskel und dasjenige, das am direktesten durch die postmortale Biochemie beeinflusst wird: Mit sinkendem pH-Wert und veränderter Ionenstärke ändern sich die Ladung der Myofibrillenproteine und der Filamentabstand, was die Wasserbindungskapazität verändert. Es beteiligt sich an der Solutgleichgewichtseinstellung, ist aber weniger zugänglich als freies Wasser. Freies Wasser füllt die Räume zwischen Muskelfasern und größere extrazelluläre Kanäle aus, gehalten nur durch Kapillarkräfte. Sein Dampfdruck nähert sich dem von reinem Wasser (aw nahe 0,99 in frischem Fleisch), es geht leicht als Tropfsaft oder Austritt verloren, und es ist diejenige Fraktion, auf die hinzugefügte Solute am unmittelbarsten und wirksamsten einwirken. Die praktische Konsequenz: Solute, die einer Rezeptur zugegeben werden, wirken vorrangig auf den freien Wasseranteil; das Verhältnis von freiem zu gebundenem und immobilisiertem Wasser in einer gegebenen Produktmatrix bestimmt daher entscheidend, wie wirksam ein bestimmter Salzgehalt in eine aw-Senkung übersetzt wird. Ein ertragreich injiziertes Ganzmuskelerzeugnis enthält mehr freies Wasser als ein trockeneres Trocken-Pökelprodukt und benötigt mehr Solut, um dieselbe Ziel-aw zu erreichen. [Ref. 18, 19, 20]

Messung der aw in der Praxis. Die beiden in Lebensmittelabors am weitesten verbreiteten Methoden sind der gekühlte Spiegel-Taupunktsensor und der Kapazitätssensor. Das Taukühlspiegelmessgerät kühlt einen Spiegel in einer geschlossenen Kammer mit der Lebensmittelprobe ab, bis sich Kondensation bildet, die optisch erfasst wird. Am Taupunkt ist der Dampfdruck über dem Spiegel gleich dem Dampfdruck über der Probe, und die aw wird aus Taupunkt und Proben temperatur nach standardisierten thermodynamischen Beziehungen berechnet. Die Methode ist rigoros, schnell (5 bis 10 Minuten bis zum Gleichgewicht) und genau bis auf etwa $\pm 0,003$ aw-Einheiten; sie ist die Referenzmethode für die Lebensmittelsicherheitsvalidierung. Der Kapazitätssensor bringt einen hygroskopischen Polymerfilm mit dem Kopfraumgas über der Probe in Gleichgewicht und misst die Änderung der elektrischen Kapazität gegenüber Kalibrierstandards. Er

ist kostengünstiger und für die routinemäßige Qualitätskontrolle geeignet, jedoch empfindlicher gegenüber Drift und Temperaturschwankungen. Für beide Methoden ist die Temperaturäquilibrierung entscheidend: Die aw ändert sich bei Fleischprodukten um annähernd 0,003 bis 0,005 aw-Einheiten je Grad Celsius, und alle Komponenten – Probe, Kammer, Messzelle – müssen dieselbe Temperatur aufweisen. Das Messen eines direkt aus dem Kühlraum entnommenen Produkts bei Raumtemperatur ist eine häufig beschriebene und gut dokumentierte Fehlerquelle. Die Kalibrierung mit zertifizierten gesättigten Salzlösungen bei der Messtemperatur (Lithiumchlorid, Natriumchlorid, Kaliumsulfat, Bariumchlorid) ist in jedem akkreditierten Validierungsprogramm unverhandelbar. [Ref. 1, 9]

Kurz gesagt: Scott ersetzte ein versagendes empirisches Maß (Feuchtigkeitsgehalt) durch ein thermodynamisch begründetes (Wasseraktivität). Die drei Wasserzustände im Muskel erklären, warum zwei Produkte mit gleichem Feuchtigkeitsgehalt unterschiedliche aw-Werte aufweisen können, und warum die aw stets am Fertigprodukt gemessen und nicht aus den Zutaten berechnet werden sollte.

1.2 M. Loncin: Der stille Vorläufer

Marcel Loncin war ein belgischer Lebensmittelingenieur, dessen Arbeit von 1976 das Hürdenkonzept vorwegnahm, ohne es zu benennen oder zu einem angewandten System auszubauen. Bei seiner Arbeit zu Lebensmitteln mit intermediärem Feuchtigkeitsgehalt stellte Loncin fest, dass eine geringfügige Senkung der Wasseraktivität in Verbindung mit anderen milden Konservierungsmaßnahmen mikrobielle Stabilität erzielen konnte, ohne die starke Austrocknung zu erfordern, die eine alleinige Abhängigkeit von der aw-Senkung bedingen würde. [Ref. 3, 4]

Dies war ein konzeptioneller Durchbruch: der erste formal artikulierte wissenschaftliche Befund, dass Kombinationen extreme Einzelmaßnahmen ersetzen können. Loncin verfolgte es nicht weiter in den angewandten Bereich, und er gab ihm keinen Namen. Die Zuschreibung ist in Leistner und Gould (2002) sowie in der sekundären Übersichtsliteratur belegt, nicht in einer für dieses Dokument direkt gesichteten Primärpublikation von Loncin. Diese Zuschreibung wird mit angemessener erkenntnistheoretischer Vorsicht vermerkt. Was nicht in Zweifel steht: Als Leistner später das Hürdenkonzept entwickelte, erkannte er Loncins Vorläuferbeitrag ausdrücklich an. [Ref. 4]

1.3 Lothar Leistner: Der Architekt des Hürdenkonzepts

Lothar Leistner war ein deutscher Lebensmittelwissenschaftler und die Schlüsselfigur bei der Entwicklung des Hürdenkonzepts. Er verbrachte die Kernjahrzehnte seiner Karriere an der Bundesanstalt für Fleischforschung in Kulmbach, Bayern – einer Einrichtung, deren Postanschrift auf seiner Korrespondenz E.C. Baumannstraße 20, D-95326 Kulmbach lautete. Seine Karriere erstreckte sich von den 1960er Jahren bis in die 2000er, in denen er ununterbrochen auf Deutsch und Englisch publizierte und mit Forschern aus Dutzenden von Ländern zusammenarbeitete oder diese betreute. [Ref. 3, 4, 5]

Leistner gelangte über die Wasseraktivität zum Hürdenkonzept. Seine frühen Forschungsarbeiten in Kulmbach richteten sich systematisch darauf aus, zu verstehen, wie die Verfügbarkeit von freiem Wasser die mikrobielle Stabilität von

Fleisch und Fleischerzeugnissen bestimmte. Im Laufe dieser Arbeit kristallisierte sich ein Muster heraus: Die aw allein konnte die beobachtete Stabilität nicht vollständig erklären. Produkte mit identischen aw-Werten verhielten sich unterschiedlich, je nach pH-Wert, Nitritgehalt, Lagertemperatur und dem Vorhandensein oder Fehlen konkurrierender Mikroorganismen. Etwas anderes war am Werk.

Im Jahr 1976 verwendete Leistner gemeinsam mit W. Rödel in einem Band über Lebensmittel mit intermediärem Feuchtigkeitsgehalt erstmals das Wort „Hürden“ zur Beschreibung der Gesamtheit der in einem Lebensmittel wirkenden Konservierungsfaktoren. Das konzeptionelle Diagramm – eine Reihe paralleler Barrieren unterschiedlicher Höhe, die Mikroorganismen überwinden müssen – begleitete diese Verwendung. [Ref. 3, 5, 6]

Im Jahr 1978 führte Leistner den Hürdeneffekt formal als wissenschaftliches Konzept ein: die diagrammatische Darstellung mehrerer gleichzeitig oder nacheinander auf mikrobielle Populationen in Lebensmitteln wirkender Hemmstoffe. Er wies auf die energieeinsparenden Implikationen hin: dass milde Kombinationen schwere Einzelbehandlungen ersetzen könnten, in einer Veröffentlichung mit dem Titel „Hurdle effect and energy saving“ in den von Downey herausgegebenen Tagungsberichten. [Ref. 7]

Im Jahr 1985, bei einem NATO Advanced Study Institute über Eigenschaften von Wasser in Lebensmitteln, leitete Leistner den Begriff „Hürdentechnologie“ aus dem Hürdeneffekt ab: die bewusste, intelligente Gestaltung von Lebensmitteln, bei der mehrere Hürden ausgewählt, kalibriert und so kombiniert werden, dass sie zusammenwirken. Dies war der entscheidende konzeptionelle Schritt – von der Beobachtung, dass Kombinationen funktionieren, zur bewussten Gestaltung dieser Kombinationen. Die in der Arbeit von 1985 demonstrierte Anwendung galt lagerstabilen Produkten (SSP) und Lebensmitteln mit intermediärem Feuchtigkeitsgehalt (IMF) auf Fleischbasis. [Ref. 8]

In den folgenden fünfzehn Jahren dokumentierte Leistner mehr als sechzig potenzielle Hürden, die auf Lebensmittelprodukte anwendbar sind, übertrug das Konzept auf Lebensmittel von sechs Kontinenten, entwickelte seine Beziehung zur HACCP-Systematik (Gefahrenanalyse und kritische Lenkungspunkte) und veröffentlichte im Jahr 2000 den grundlegenden Übersichtsartikel im International Journal of Food Microbiology, der das Konzept der Multitarget-Lebensmittelkonservierung formulierte – die Idee, dass Hürden, die gleichzeitig auf mehrere Homöostasemechanismen innerhalb einer Mikrobenzelle einwirken, Effekte erzeugen, die über ihre Einzelbeiträge hinausgehen. [Ref. 9, 10]

Im Jahr 2002 veröffentlichten Leistner und Grahame Gould „Hurdle Technologies: Combination Treatments for Food Stability, Safety and Quality“ beim Springer-Verlag – das erste Monographiewerk, das alle Aspekte, Möglichkeiten und Grenzen des Ansatzes umfassend behandelte. Dieses Werk ist die maßgebliche Referenz. [Ref. 4]

1.4 Leon G.M. Gorris: Homöostase und die lebendige Hürde

Leon G.M. Gorris ist ein niederländischer Lebensmittelsicherheitswissenschaftler, dessen Karriere eine kontinuierliche und produktive Entwicklung von der grundlegenden Hürdenkonzeptforschung hin zur globalen Risikobewertung der

Lebensmittelsicherheit darstellt. Von 1990 bis 1997 arbeitete er am Agrotechnologischen Forschungsinstitut (ATO-DLO) in Wageningen, Niederlande. 1997 trat er in den Dienst von Unilever, wo er in Großbritannien, Shanghai und den Niederlanden tätig war und schließlich als Direktor für Regulierungsangelegenheiten wirkte. Von 2002 bis 2012 hatte er eine Teilzeitprofessur als Europäischer Lehrstuhlinhaber für Lebensmittelsicherheitsmikrobiologie an der Universität Wageningen inne. Er hielt Gastprofessuren an drei chinesischen Universitäten. Nach den aktuellsten für dieses Dokument gesichteten Quellen (Lebenslauf 2024) war Leon Gorris zuletzt als freiberuflicher Lebensmittelsicherheitsberater und ICMSF-Vertreter beim Codex Alimentarius tätig. [Ref. 11, 12]

Gorris' intellektueller Beitrag zum Hürdenkonzept konzentriert sich auf die mikrobiell-physiologische Seite der Gleichung. Während Leistner vorwiegend auf lebensmittelseitige Faktoren fokussierte (Temperatur, aw, pH-Wert, Eh und Konservierungsstoffe), brachte Gorris rigorose Aufmerksamkeit dafür auf, was diese Hürden tatsächlich im Inneren des Mikroorganismus bewirken. Sein 1995 gemeinsam mit Leistner verfasster Artikel in Trends in Food Science and Technology formulierte die Konzepte Homöostase, metabolische Erschöpfung und Stressreaktionen, die seither integraler Bestandteil des fortgeschrittenen Verständnisses des Hürdenkonzepts sind. [Ref. 13]

Das Homöostaseargument ist zentral: Mikroorganismen sind keine passiven Objekte, die je nach Umgebungsbedingungen entweder überleben oder absterben. Sie sind aktive Systeme, die Stoffwechselenergie aufwenden, um ihr inneres Gleichgewicht aufrechtzuerhalten – innerer pH-Wert, Ionenkonzentrationen, Turgor und Redoxzustand. Wenn Hürden diese Homöostasemechanismen stören, muss der Organismus Energie aufwenden, um dies auszugleichen. Greifen mehrere Hürden gleichzeitig mehrere Systeme an, wird der Energiehaushalt des Organismus überwältigt, und er kann seine Lebensfähigkeit nicht mehr aufrechterhalten. Dies ist der Mechanismus hinter den synergistischen Effekten, die in kombinierten Konservierungssystemen beobachtet werden. [Ref. 9, 13]

Gorris leistete auch wesentliche Beiträge zum FLAIR-Projekt der Europäischen Kommission über kombinierte Lebensmittelkonservierung (1990–1994), einem multinationalen europäischen Forschungsprogramm, das Hürdelkombinationen in 14 Laboratorien in 11 Ländern testete. Er war Mitherausgeber des Abschlussberichts mit Leistner. [Ref. 14]

Im Jahr 2014 aktualisierte er den Eintrag zum Hürdenkonzept in der Encyclopedia of Food Microbiology (zweite Ausgabe) und lieferte damit die aktuellste maßgebliche Zusammenfassung des Fachgebiets. Er ist nach wie vor als aktiver Forscher tätig und hat zuletzt 2023 veröffentlicht. [Ref. 11, 12]

1.5 Grahame W. Gould: Mikrobielle Stressreaktionen und die Sporenwelt

Grahame W. Gould war ein britischer Lebensmittelmikrobiologe, der einen Großteil seiner Karriere als leitender Forschungsmikrobiologe bei Unilever Research im Vereinigten Königreich verbrachte. Er war weltweit anerkannte Autorität für Bakteriensporen und für die Mechanismen, mit denen Lebensmittelkonservierungsbehandlungen Mikroorganismen inaktivieren oder hemmen. Seine Beiträge zum Hürdenkonzept konzentrieren sich auf die Schnittstelle

physikalischer Konservierungsmethoden und mikrobieller Stressphysiologie – insbesondere das, was mit Bakterienzellen und Sporen geschieht, wenn sie subletalen Behandlungen ausgesetzt werden. [Ref. 4, 15]

Goulds Kapitel von 1995 über „Homeostatic mechanisms during food preservation by combined methods“ im Band „Food Preservation by Moisture Control: Fundamentals and Applications“ entwickelte den theoretischen Rahmen für das Verständnis, wie kombinierte Hürden das mikrobielle Gleichgewicht auf zellulärer Ebene stören. Diese Arbeit bildete eine direkte Ergänzung zu Gorris' Beiträgen zum selben Thema. [Ref. 15]

Seine Mitautorenschaft des Springer-Monographiewerks von 2002 mit Leistner stellt den Höhepunkt einer langen intellektuellen Partnerschaft dar. Das Buch schöpft aus der tiefen Erfahrung beider Autoren in der praktischen Lebensmittelkonservierung und der grundlegenden Mikrobiologie. Gould gab auch einen bedeutenden Band über „New Methods of Food Preservation“ heraus und verfasste umfangreiche Arbeiten zur Lebensmittelbestrahlung. [Ref. 4, 16]

ABSCHNITT 2: DIE WISSENSCHAFT ERKLÄRT

2.1 Wassergehalt versus Wasseraktivität: Der entscheidende Unterschied

Die Verwechslung von Wassergehalt und Wasseraktivität ist nicht nur ein akademisches Problem – sie hat in der Vergangenheit zu realen Konservierungsversagen geführt. Vor Scotts Arbeit von 1953 hätte ein Fleischverarbeiter, der 18 % Feuchte in einem Produkt maß und es stabil vorfand, irrtümlich schlussfolgern können, dass 18 % Feuchte der sichere Schwellenwert sei. Ein anderes Produkt, das ebenfalls 18 % Feuchte aufwies, hätte verderben können – und der Verarbeiter hätte keinen wissenschaftlichen Erklärungsrahmen dafür gehabt. Die Erklärung ist die a_w .

Die Wasseraktivität (a_w) ist thermodynamisch definiert als das Verhältnis der Fugazität des Wassers im Lebensmittelsystem zur Fugazität von reinem Wasser bei gleicher Temperatur und gleichem Druck.

Eine allgemeinverständliche Erläuterung des Begriffs „Fugazität“

Das Wort Fugazität stammt vom lateinischen *fugere*, was „fliehen“ oder „entweichen“ bedeutet. In der Thermodynamik beschreibt Fugazität die Tendenz eines Stoffes, aus der Phase, in der er sich befindet, zu entweichen – sei es eine Flüssigkeit, ein Feststoff oder eine Lösung. Sie ist im Wesentlichen ein Maß dafür, wie „unruhig“ oder „entweichungsbereit“ ein Molekül ist.

Für Wasser in einem Lebensmittelsystem gilt: Wenn Wasser fest an Proteine, Salze oder Zucker gebunden ist, verliert es einen Großteil seines Drangs, in die Dampfphase über dem Lebensmittel überzugehen. Seine Fugazität – seine Entweichungstendenz – ist vermindert. Wenn Wasser frei und ungebunden vorliegt, entweicht es bereitwillig, und seine Fugazität nähert sich jener von reinem Wasser an.

Für praktische lebensmittelwissenschaftliche Zwecke ist die Fugazität bei atmosphärischem Druck unter den nahezu idealen Gasbedingungen, die für Wasserdampf bei den in Lebensmittelsystemen relevanten niedrigen Partialdrücken gelten, im Wesentlichen gleichwertig mit dem Dampfdruck (Fugazitätskoeffizienten nähern sich unter diesen Bedingungen 1,0 an). Deshalb vereinfacht sich die Definition der Wasseraktivität zu:

$$a_w = \frac{\text{Dampfdruck des Wassers im Lebensmittel}}{\text{Dampfdruck von reinem Wasser bei gleicher Temperatur}}$$

Ein Lebensmittel mit vielen gelösten Salzen und Zuckern enthält Wassermoleküle, die energetisch gebunden sind und deren Entweichungstendenz unterdrückt ist, sodass der Dampfdruck über dem Lebensmittel niedriger ist als über reinem Wasser. Daher gilt: $a_w < 1,0$. Mikroorganismen benötigen Wasser mit hohem chemischen Potenzial (hohe a_w), um ihre Zellen zu hydrieren und den Stoffwechsel aufrechtzuerhalten: das Wasser muss energetisch verfügbar sein, um Zellmembranen zu passieren und an biochemischen Reaktionen teilzunehmen.

Wenn die aw gesenkt wird – wenn das chemische Potenzial und die Fugazität des Wassers abgesenkt werden –, entsteht ein osmotischer Gradient über der mikrobiellen Zellmembran, der Wasser aus der Zelle herauszieht und den Organismus zwingt, Stoffwechselenergie für die Osmoregulation aufzuwenden. Bei hinreichend niedriger aw überfordert dieser osmotische Stress die Homöostasekapazität des Organismus, und das Wachstum hört auf. [Ref. 9, 17]

Kurzgefasst: Fugazität bedeutet in diesem Zusammenhang „wie sehr das Wasser das Lebensmittel verlassen möchte“. Hohe Fugazität = hohe aw = Mikroorganismen können wachsen. Niedrige Fugazität = niedrige aw = Mikroorganismen können nicht auf das benötigte Wasser zugreifen.

Für praktische Zwecke bei atmosphärischem Druck vereinfacht sich die thermodynamische Definition zum Verhältnis der Gleichgewichts-Relativfeuchte (ERH) über dem Lebensmittel zu jener über reinem Wasser, ausgedrückt als Dezimalzahl zwischen 0 und 1,0. Reines Wasser hat eine aw von 1,0; ein Lebensmittel, in dem Wasser vollständig unverfügbar wäre, hätte eine aw von 0. [Ref. 1, 2, 17]

Die Mechanismen, die in Lebensmittelsystemen die aw absenken, lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- **Osmotische Effekte:** Im wässrigen Anteil gelöste Solute (NaCl, Zucker, Polyphosphate) verringern das chemische Potenzial des Wassers und machen es energetisch weniger verfügbar für die Diffusion aus dem Lebensmittel heraus oder in eine Mikrobenezelle hinein.
- **Matrixeffekte:** Wasser, das über Wasserstoffbrückenbindungen, Dipol-Dipol-Wechselwirkungen und Van-der-Waals-Kräfte an Biopolymeroberflächen (Proteine, Polysaccharide) gebunden ist, wird mit unterschiedlich starker Energie gehalten. Dieses gebundene Wasser hat einen verminderten Dampfdruck und damit eine niedrigere aw.
- **Kapillareffekte:** In porösen Lebensmittelmatrizes weist Wasser in kleinen Kapillaren aufgrund der Krümmung der Wasser-Luft-Grenzfläche einen verminderten Dampfdruck auf, was zur Gesamt-aw-Senkung beiträgt.

Die praktische Konsequenz: Zwei Produkte mit identischem Feuchtigkeitsgehalt können sehr unterschiedliche aw-Werte und damit sehr unterschiedliche mikrobiologische Stabilität aufweisen. Deshalb ist der Feuchtigkeitsgehalt allein niemals eine ausreichende Spezifikation für die Gestaltung von Hürdensystemen in Fleischerzeugnissen. [Ref. 1, 2, 17]

Wesentliche aw-Schwellenwerte für die Fleischkonservierung mit typischen Produktzuordnungen in drei Regulierungsregionen:

aw-Bereich	Überwundene Barriere	Gehemmte Organismen	Typische Produkte bei dieser aw	Hinweise / Kontext
< 0,97	Beginn nutzbarer Hemmung	Einige besonders empfindliche Verderbnisbakterien beginnen gehemmt zu werden; der Effekt ist auf	Frisches Schweinefleisch (EU/SA/MX ~0,99); typischer Beginn einer milden aw-Senkung	Minimaler Konservierungswert für sich allein

		diesem Niveau gering. [Ref. 9]		
< 0,95	Erhebliche Hemmung	Die meisten gramnegativen Pathogene beginnen gehemmt zu werden; spezifische Grenzwerte je Organismus (z.B. Salmonella ~0,94, L. monocytogenes ~0,92). [Ref. 9, 17, 44]	Geformter/Sandwichschinken (EU ~0,97; SA ~0,96–0,97 geschätzt; MX ~0,96–0,97 geschätzt). [Ref. 22]	Kühlung weiterhin unbedingt erforderlich; aw allein unzureichend
< 0,91	Schwellenwert für Umgebungsstabilität	Die meisten Verderbnisbakterien unter typischen Bedingungen gehemmt; Kühlung nicht länger zwingend erforderlich, wenn andere Hürden vorhanden. Wichtige Ausnahmen verbleiben (siehe Hinweis zu S. aureus). [Ref. 9, 17]	Traditionelle Salami nähert sich diesem Bereich mit fortschreitender Reifung an	Mehrere unterstützende Hürden weiterhin erforderlich
< 0,87	Wesentlicher Sicherheitsschwellenwert	S. aureus-Toxinproduktion unterhalb ~0,86–0,87 bei 30 °C gehemmt [Ref. 48]; Wachstumsminimum ~0,83–0,86 je nach Feuchthaltemittel und Temperatur	Hart-/Trockensalami EU ~0,85–0,88; SA ~0,86–0,90 (geschätzt); MX ~0,84–0,88 (geschätzt). Feuchtes Biltong Obergrenze (SA ~0,85–0,89; geschätzt; siehe Abschnitt 2.7)	Hinweis: Wachstumsminima und Enterotoxin-Produktionsminima für S. aureus sind nicht identisch und beide temperaturabhängig. aw 0,87 wird als konservativer praktischer Sicherheitszielwert für die Toxinproduktion (bei 30 °C Optimum) verwendet. Das Wachstumsminimum (~0,83–0,86 unter optimalen Bedingungen) liegt tiefer, d.h. der Organismus kann noch lebensfähig sein und wachsen, wenn die Toxinproduktion bereits gehemmt ist. Beide Schwellenwerte müssen bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden. [Ref. 1, 2, 48]
< 0,85	Schwellenwert für lagerstabiles getrocknetes Fleisch	Unterhalb aw 0,85 sind viele vegetative Bakterienpathogene unter typischen Bedingungen gehemmt; wichtige Ausnahmen	Trockenes Biltong SA ~0,65–0,75 (geschätzt; siehe Abschnitt 2.7); US-Jerky ~0,75–0,85; Kilishi MX/NG ~0,55–0,70 (geschätzt);	USDA FSIS nennt aw < 0,85 als Schwellenwert für lagerstabile verzehrfertige getrocknete

		bestehen jedoch. Wachstumsminimum von <i>S. aureus</i> liegt je nach Organismus, Soluttyp, Temperatur und pH-Wert bei ca. 0,83–0,86 [Ref. 48]. Hefen und Schimmelpilze können ebenfalls noch bei und unterhalb dieses Schwellenwerts wachsen.	Speck (nur vollständig trocken gepökelt)	Rindfleisch-/Jerky-Produkte: FSIS-Compliance-Leitfaden FSIS-GD-2023-0002 (Revision 2023, einschließlich Biltong). [Ref. 46]
< 0,70	Starke Lagerstabilität	Die meisten nicht-xerophilen Verderbnisschimmelpilze gehemmt; xerophile Pilze bleiben ein Risiko (Wachstumsminima je nach Art bis aw ~0,61). Xerotolerante Hefen möglich. [Ref. 47]	Vollständig getrocknetes Biltong (SA ~0,65–0,68, geschätzt); Kilishi (NG/MX ~0,55–0,70, geschätzt)	Keine Kühlung erforderlich; Feuchtigkeitsbarriere der Verpackung entscheidend
< 0,61	Praktische Untergrenze biologischer Aktivität	Unterhalb etwa aw 0,61 wurde unter typischen Lebensmittelbedingungen kein Wachstum fleischproduktrelevanter Organismen beobachtet. <i>Xeromyces bisporus</i> (Wachstumsminimum ~0,61) stellt die anerkannte praktische Untergrenze für lebensmittelrelevante biologische Aktivität dar. [Ref. 47]	Unter normalen Bedingungen bei keinem kommerziellen Fleischerzeugnis typisch	Theoretische Untergrenze; einige Zuckerwaren und Trockenprodukte nähern sich diesem Wert an

Quellen: Scott (1953, 1957); Leistner & Rödel (1976); Leistner (1987, 2000). Produkt-aw-Bereiche: Petit et al. (2014); Jones et al. (2019); Heinz & Hautzinger (2007); Igwegbe et al. (2009). Wo keine begutachteten Messdaten für SA- und MX-Produkte in der gesichteten Primärliteratur verfügbar waren, wurden Bereiche aus den nächstgelegenen verfügbaren veröffentlichten Daten für vergleichbare Produktkategorien geschätzt. Vollständige Einschränkungen der regionalen Schätzungen sind dem Vorbehaltsparagrafen in Abschnitt 2.7 zu entnehmen. [Ref. 1, 2, 5, 9, 22, 24, 25, 27]

2.2 Drei Ebenen des gebundenen Wassers in Muskelgewebe

Fleisch ist keine einfache Lösung. Es ist eine komplexe biologische Matrix aus Muskelfasern, Bindegewebe, Lipiden, Mineralien und Wasser, das in mehreren energetischen Zuständen vorliegt. Das Konzept der „drei Ebenen des gebundenen Wassers“ im Muskelgewebe bezieht sich auf ein in der Fleischwissenschaft verwendetes Klassifikationssystem zur Beschreibung der verschiedenen Arten, wie Wasser mit der Fleischmatrix assoziiert ist – jede mit unterschiedlicher Empfindlichkeit gegenüber Entfernung und unterschiedlichem Einfluss auf die aw. Dieses Konzept entstammt der physikalischen Chemie und der Lebensmittelphysik aus mehreren Jahrzehnten, einschließlich wegweisender Arbeiten zur Wasserbindung in Proteinen von Bull (1944), der BET-Sorptionsisothermenanalyse (Brunauer, Emmett, Teller) sowie nachfolgender NMR-Spektroskopie-Studien. [Ref. 18, 19, 20]

Ebene 1: Fest gebundenes konstitutionelles Wasser (Monolageswasser)

Hierbei handelt es sich um Wasser, das direkt mit polaren Stellen an Proteinmolekülen assoziiert ist – konkret mit den Carbonyl-, Amino-, Carboxyl- und Hydroxylgruppen myofibrillärer und sarkoplasmischer Proteine. Es bildet im Wesentlichen eine monomolekulare Schicht um das Protein. Dieses Wasser weist einen stark erniedrigten Dampfdruck und einen wesentlich niedrigeren Gefrierpunkt auf und ist für Mikroorganismen praktisch nicht verfügbar. Es kann nicht durch einfaches Pressen oder Trocknen entfernt werden, ohne die Proteinstruktur zu schädigen. Es beträgt annähernd 0,04–0,06 g Wasser je Gramm Trockensubstanz im Muskelgewebe. Dies ist das von Pauling (1945) beschriebene und durch BET-Analyse von Sorptionsisothermen systematisierte Wasser. Es wird durch NaCl-Zugabe oder osmotische Substanzen nicht messbar beeinflusst. [Ref. 18, 19]

Ebene 2: Immobilisiertes oder mehrlagiges Wasser

Jenseits der Monolage assoziieren sich weitere Wassermoleküle durch Wasserstoffbrückenbindungen und Dipolwechselwirkungen mit der fest gebundenen Schicht. Dieses „vicinale“ oder mehrlagige Wasser ist weniger fest gebunden und weist im Vergleich zu Bulkwasser einen leicht erniedrigten Dampfdruck auf. Es kann durch das ionische Milieu beeinflusst werden: NaCl beispielsweise konkurriert um einige dieser Bindungsstellen und verändert die Struktur dieser Wasserfraktion. Diese Fraktion wird auch durch den Zustand der Proteinmatrix beeinflusst (nativ gegenüber denaturiert, gequollen gegenüber komprimiert). NMR-Relaxationsstudien unterscheiden diese Fraktion sowohl von konstitutionellem Wasser als auch von Bulkwasser. [Ref. 19, 20]

Ebene 3: Freies Wasser (Bulkwasser)

Das verbleibende Wasser in Fleisch – typischerweise der größte Anteil in frischem, unverarbeitetem Gewebe – ist „freies“ Wasser, das in den Räumen zwischen Muskelfasern und innerhalb der Kapillarstruktur des Gewebes gehalten wird. Es weist eine Aktivität nahe 1,0 auf ($a_w \sim 0,99$ in frischem Fleisch). Dieses Wasser: kann durch physikalischen Druck ausgepresst werden; verdunstet beim Trocknen bereitwillig; gefriert bei annähernd 0 °C; stellt das wässrige Milieu bereit, in dem Mikrobenzellen wachsen können; und ist direkt zugänglich für Solute wie Salz, Zucker und Pökelsätze. Die Wasserbindungskapazität (WHC) von Fleisch, die bei der Verarbeitung so wichtig ist, bezieht sich vornehmlich darauf, wie gut die Muskelproteinstruktur diese freie Wasserfraktion zurückhält. [Ref. 19, 20]

Praktische Bedeutung für die Konservierungsgestaltung: Nur die freie Wasserfraktion ist sinnvoll für Solute zugänglich, die die a_w senken (NaCl, Zucker, Phosphate). Wenn einem Fleischerzeugnis Salz zugegeben wird, wird zunächst das freie Wasser beeinflusst; die fest gebundenen Fraktionen werden nicht wesentlich verändert. Das bedeutet, dass die scheinbare Wirksamkeit von Salz oder anderen Soluten bei der a_w -Senkung entscheidend vom Verhältnis von freiem zu gebundenem und immobilisiertem Wasser in der jeweiligen Matrix abhängt. Produkte mit hohem Kollagen- oder denaturiertem Proteingehalt (wie gegarte Schinken oder emulgierte Erzeugnisse) weisen eine andere Freiwasserverteilung auf als rohe Ganzmuskelstücke, was sich darauf auswirkt, wie die a_w auf eine gegebene Salzkonzentration reagiert.

2.3 Das Hürdenkonzept und der Hürdeneffekt

Leistners diagrammatische Darstellung des Hürdenkonzepts zeigt eine Reihe paralleler vertikaler Barrieren („Hürden“) unterschiedlicher Höhe über einem waagerechten Korridor, den Mikroorganismen durchwandern müssen. Wenn die kombinierte Höhe der Hürden die Überwindungskapazität des Mikroorganismus überschreitet, ist das Produkt stabil. Gelingt es einer Kombination von Faktoren, die Hürden auf ein Niveau zu bringen, das der Organismus nicht überwinden kann, werden Verderb und Sicherheitsrisiken beherrscht. [Ref. 3, 4, 5]

Die wichtigsten Merkmale des Hürdeneffekts, die Leistner durch seine Kulmbacher Forschung identifizierte, sind:

- **Hürden wirken wechselseitig:** Die Wirkung einer Hürde ist nicht unabhängig von den anderen. Eine bescheidene Senkung der a_w in Verbindung mit einer bescheidenen Senkung des pH-Werts erzeugt einen hemmenden Effekt, der größer ist als jede der beiden Maßnahmen allein bewirken würde. Diese Synergie wird heute im Sinne der Stoffwechselkosten verstanden, die das gleichzeitige Reagieren auf mehrere Störungen erfordert.
- **Die Reihenfolge der Hürden spielt eine Rolle:** Bei fermentierten Erzeugnissen wie Salami werden die Hürden sequentiell angetroffen, während das Produkt reift. Die anfänglichen Hürden (Salz, Nitrat) begünstigen Milchsäurebakterien; diese Bakterien erzeugen dann durch Ansäuerung die pH-Hürde; die letzte Hürde mit abgeschlossener Reifung ist die Wasseraktivität durch Austrocknung. Eine Störung dieser Abfolge stört das Produkt.
- **Hürdenintensität kann getauscht werden:** Eine sehr hohe Einzelhürde (z.B. extremes Erhitzen) kann eine Kombination milder Hürden ersetzen. Der praktische Wert des Hürdenkonzepts liegt darin, dass milde Kombinationen Qualitätseigenschaften besser erhalten als schwere Einzelbehandlungen.
- **Die anfängliche mikrobielle Belastung spielt eine Rolle (der „Verstärkereffekt“ und der „Trampolineffekt“):** Ist die anfängliche Kontamination hoch, können Hürden, die für ein normales Produkt ausreichen würden, unzureichend sein. Umgekehrt benötigen subletal geschädigte Organismen (Organismen, die eine moderate Wärmebehandlung überlebt haben) möglicherweise weniger und niedrigere Hürden zur Hemmung, da ihre Vitalität und Homöostasekapazität beeinträchtigt wurden. [Ref. 5, 9, 13]

2.4 Die wesentlichen Hürden: Ein systematischer Überblick

Leistner identifizierte in seinen systematischen Übersichten zu Lebensmittelkonservierungsfaktoren mehr als sechzig potenzielle Hürden. Die folgende Tabelle stellt die in der Fleischwissenschaft eingesetzten Haupthürden mit ihren Wirkmechanismen und praktischen Anwendungsbereichen dar. [Ref. 4, 9, 10]

Hürde	Symbol	Wirkmechanismus	Praktischer Bereich (Fleisch)
Temperatur (Hitze)	F	Proteindenaturierung, Enzyminaktivierung, Membranschädigung	70 °C Kerntemperatur für 2 Min. (Pasteurisationsäquivalent für die meisten vegetativen Pathogene); 121 °C für kommerzielle Sterilisation. Dies sind Referenzwerte; tatsächliche validierte Parameter müssen je Produkt und Rechtssystem festgelegt werden. [Ref. 22]

Kühlung	t	Verlangsamt Enzym- und Mikrobenstoffwechsel; keine Abtötung	0–5 °C Kühlung; <–18 °C gefroren. [Ref. 22]
Wasseraktivität	aw	Reduziert verfügbares Wasser; osmotischer Stress auf Mikroben; stört Turgor und Ionengleichgewicht	0,60–0,99 in Fleischerzeugnissen; Lagerstabilitätsschwellen sind produkt- und gefährdungsspezifisch; müssen je Produktkategorie festgelegt werden, keine universelle Einheitsregel. [Ref. 9, 17]
Säuregrad	pH	Undissoziierte organische Säuren durchdringen Membranen; intrazelluläre Ansäuerung; Enzyminhibierung	pH 4,6 ist der kritische regulatorische Schwellenwert, unterhalb dessen proteolytischer <i>Cl. botulinum</i> in säurearmen konservierten Lebensmitteln nicht wachsen kann [Ref. 4, 9]; pH 5,0–5,5 für viele Organismen unter Umgebungsbedingungen allgemein hemmend; die meisten gepökelten Fleischerzeugnisse arbeiten oberhalb pH 5,5 und stützen sich auf mehrere kombinierte Hürden, nicht auf pH allein. [Ref. 22]
Redoxpotenzial	Eh	Aerober Verderb bei niedrigem Eh gehemmt; anaerobe Pathogene bei hohem Eh gehemmt	Annähernde typische Werte (system- und zustandsabhängig): vakuumverpacktes Fleisch –100 bis –200 mV; aerobe Oberflächenbedingungen ca. +200 bis +300 mV; nur als Richtwert zu behandeln. [Ref. 9, 22]
Nitrit/Nitrat	Pökel.	Hemmt <i>Cl. botulinum</i> -Auskeimung; reagiert mit Myoglobin (Farbe); Antioxidans; antimikrobiell bei pH < 6	Zugabemengen (ingoing) sind rechts- und produktspezifisch: EU bis 150 ppm für die meisten gepökelten Erzeugnisse (Anhang II zu Reg. (EG) 1333/2008 [Ref. 53]); USA max. 156 ppm für Bacon, 200 ppm für andere gepökelte Fleischwaren (21 CFR 172.175 [Ref. 54]); SA folgt EU-nahen Grenzwerten (R.1183 [Ref. 52]). Nitrat bei langfristig gepökelten Trockenprodukten gestattet; anzuwendende Vorschrift je Kategorie prüfen.
Natriumchlorid	NaCl	Senkt aw; ionische Störung; Membranstress bei Gramnegativen	1,5–4 % in gegarten Erzeugnissen; 3–8 % in trocken gepökelten; 10–20 % in Charqui. [Ref. 22]
Konkurrenzflora (LAB)	KF	Produzieren Milchsäure (pH-Absenkung), Bakteriozine, Konkurrenzausschluss	>10 ⁷ KBE/g in fermentierten Würsten auf dem Höhepunkt der Ansäuerung. [Ref. 9, 22]
Schutzatmosphäre	MAP/VP	O ₂ -Entzug hemmt aeroben Verderb; CO ₂ bakteriostatisch; N ₂ inerter Füller	VP: < 0,5 % O ₂ . MAP-Gasmischung je Produktkategorie variabel: Frischfleisch (Rind) im Einzelhandel typischerweise 70–80 % O ₂ /20–30 % CO ₂ ; Geflügel/Schwein 0 % O ₂ /30 % CO ₂ /70 % N ₂ ; gegarte Fertigprodukte typischerweise Vakuum oder CO ₂ /N ₂ . [Ref. 29]
Rauch	Rauch	Phenole (antimikrobiell, antioxidativ); Formaldehyd (antimikrobiell); Trocknungseffekt an der Oberfläche	Kaltrauch 20–25 °C; Heißrauch 60–80 °C; Flüssigrauchauftrag. Antimikrobieller Beitrag auf die Oberfläche begrenzt. [Ref. 22]
Phosphate	Phos.	Chelatieren Metallionen; modifizieren Proteinhydratation; indirekter aw-Effekt;	0,1–0,5 % in gegarten Erzeugnissen (regulatorische Grenzwerte je Rechtssystem; Reg. 1333/2008 EU, 21 CFR USA prüfen). [Ref. 22, 53]

		antimikrobielle Synergie mit Salz	
Sorbat/Sorbinsäure	Sorb.	Stört Membrantransport; hemmt Schimmelpilze, Hefen und bestimmte Bakterien	0,05–0,2 % (regulatorische Grenzwerte gelten; am wirksamsten bei pH < 6). [Ref. 53]
Bestrahlung	Rad.	DNA-Schäden; Radikalbildung; inaktiviert vegetative Zellen; Sporen widerstandsfähiger	Typische Dosiswerte aus der Literatur: 1–2 kGy Pathogenreduktion an Frischfleischoberflächen; 3–7 kGy wesentliche Reduktion vegetativer Pathogene; kommerzielle Sterilisierung ~25–45 kGy. Alle Anwendungen erfordern behördliche Genehmigung und produktspezifische Validierung.
Hochdruckverarbeitung (HPP)	HHP	Membranschädigung; Proteindenaturierung; inaktiviert vegetative Zellen; Sporen widerstandsfähiger	Typische Veröffentlichungsbereiche: 300–600 MPa, 2–5 Min. bei Kühltemperatur; alle Parameter müssen je Produkt, Zielorganismus, Matrixzusammensetzung und regulatorischen Anforderungen validiert werden. [Ref. 30, 31]
Bakteriozine (Nisin)	Bak.	Stören grampositiver Zellmembranen (Porenbildung); am wirksamsten gegen grampositive Organismen	Typische Konzentrationen in veröffentlichten Studien: 2–10 mg/kg [Ref. 9, 22]; Zulassungsstatus und erlaubte Gebrauchsmengen je Rechtssystem variabel; begrenzte Wirksamkeit gegen Gramnegative.
Organische Säuren	OS	Essig-, Milch-, Zitronensäure: undissoziierte Form tritt in die Zelle ein; intrazelluläre Ansäuerung; Chelatierung	Essigsäure (0,5–2 %); Milchsäure (1–3 %); Oberflächen- oder Tauchauftrag. [Ref. 22]

Quellen: Leistner (1995, 2000); Leistner und Gould (2002); Gorris (2014); Heinz & Hautzinger (2007); Barbosa-Cánovas et al. (2007); Belcher (2006); Farkas (1998). Regulatorische Zitate: Reg. (EG) 1333/2008 [Ref. 53]; 21 CFR 172.175 [Ref. 54]. [Ref. 4, 9, 10, 12, 22, 29, 53, 54, 55]

2.5 Homöostase, metabolische Erschöpfung und Stressreaktionen

Das mechanistische Verständnis, warum Hürdelkombinationen besser wirken als nach dem einfachen Addieren ihrer Einzelwirkungen zu erwarten wäre, erforderte einen Perspektivwechsel: vom Lebensmittel hin zum Mikroorganismus. Dieser Wechsel wurde am klarsten in den Arbeiten von Gorris und Gould artikuliert, aufbauend auf dem weiteren Gebiet der bakteriellen Stressphysiologie. [Ref. 13, 15]

Mikroorganismen erhalten ihre innere Homöostase (stabiler intrazellulärer pH-Wert, Ionenkonzentrationen, Turgordruck und Redoxzustand) durch aktive, energieverbrauchende Mechanismen aufrecht. Jede Hürde in einem Lebensmittelsystem stört eines oder mehrere dieser homöostatischen Systeme:

- **Niedrige aw:** erzeugt osmotischen Stress. Die Zelle reagiert durch Ansammlung kompatibler Solute (Betain, Glutamat, Kaliumionen), um den Turgor aufrechtzuerhalten. Dies kostet Energie (ATP).
- **Niedriger pH-Wert:** säuert das äußere Milieu an. Protonen neigen dazu, in die Zelle einzuströmen, was eine intrazelluläre Ansäuerung bedroht. Die Zelle reagiert, indem sie Protonen mit ATPasen hinausbefördert. Dies kostet Energie.

- **Niedriges Eh / reduzierende Atmosphäre:** stört die Elektronentransportkette und stellt aerobe Organismen, die Sauerstoff als terminalen Elektronenakzeptor benötigen, vor eine Herausforderung.
- **Nitrit:** erzeugt reaktive Stickstoffzwischenprodukte; hemmt spezifische Enzyme einschließlich Cytochrom-c-Oxidase; erzeugt oxidativen Stress.
- **Erhöhte Temperatur (milder Hitzestress):** verursacht Proteinentfaltung; löst Hitzeschockprotein-Antwort aus; kostet Energie.

Wenn nur eine Hürde vorhanden ist, kann der Organismus dies häufig durch Investition von Stoffwechselressourcen in eine gezielte homöostatische Antwort kompensieren. Wenn mehrere Hürden gleichzeitig mehrere Homöostasesysteme angreifen, wird der Energiehaushalt des Organismus überwältigt. Er kann nicht alle homöostatischen Antworten gleichzeitig aufrechterhalten. Unter diesen Bedingungen tritt der Organismus in einen Zustand metabolischer Erschöpfung und verliert schließlich seine Lebensfähigkeit. [Ref. 9, 13, 15]

Ein wichtiges praktisches Korollar: Organismen unterscheiden sich darin, in welchem Ausmaß verschiedene Hürden ihre Homöostasesysteme beanspruchen. *Staphylococcus aureus* verfügt über eine außergewöhnlich gute osmotische Toleranz. Sein Wachstumsminimum liegt je nach Feuchthaltemittel bei ca. aw 0,83–0,86 (NaCl-eingestellte Systeme ergeben tendenziell etwas niedrigere Minima als glyceroleingestellte Systeme), und Toxinproduktion wurde bis auf ca. aw 0,86–0,87 bei 30 °C unter optimalen Bedingungen nachgewiesen, mit höheren Minima bei niedrigeren Temperaturen [Ref. 1, 48]. Wachstumsminima und Enterotoxin-Produktionsminima sind nicht identisch und beide temperaturabhängig; ein Produkt, das die Toxinproduktion hemmt, kann *S. aureus*-Wachstum noch unterstützen, sodass beide Schwellenwerte in jeder Risikobewertung unabhängig voneinander verfolgt werden müssen. Diese variablen Minima machen *S. aureus* schwieriger durch aw-Senkung allein zu hemmen als etwa *Listeria monocytogenes* (Wachstumsgrenze ~0,92 [Ref. 17]) oder *Salmonella*-Spezies (Grenze ~0,94 [Ref. 9, 44]). Eine wirksame Hürdengestaltung muss auf die relevanten Gefährdungsorganismen für das jeweilige Produkt ausgerichtet sein, nicht auf einen generischen „mikrobiellen“ Schwellenwert. [Ref. 9, 17]

Stressreaktionen erschweren auch eine naive Hürdengestaltung. Organismen, die subletalen Stressbedingungen ausgesetzt werden, können Kreuztoleranz entwickeln: Säurestress kann Säuretoleranzreaktionen auslösen, die den Organismus auch gegenüber osmotischem Stress toleranter machen. Dies bedeutet, dass eine milde Säurehürde, die einen Organismus schwächen soll, unbeabsichtigt seine Resistenz gegenüber einer Salzhürde verstärken kann. Dies ist einer der Gründe, warum das Hürdenkonzept nicht auf einfache Parametertabellen reduziert werden kann und eine fortlaufende Validierung durch ChallengeStudien erfordert. [Ref. 17]

2.6 Das Multitarget-Konzept und seine Implikationen

In seiner Arbeit von 2000 im *International Journal of Food Microbiology* führte Leistner das Konzept der Multitarget-Lebensmittelkonservierung ein – die Idee, dass optimale Hürdensysteme nicht bloß darauf ausgelegt sein sollten, die mikrobielle

Homöostase mit roher Gewalt zu überwinden, sondern gleichzeitig mehrere unterschiedliche Angriffsziele innerhalb der Mikrobenzelle zu attackieren. [Ref. 9]

Produkt	Europäische Union (begutachtete gemessene Bereiche)	Südafrika (GESCHÄTZT; siehe Vorbehalt Abschn. 2.7)	Mexiko (GESCHÄTZT; siehe Vorbehalt Abschn. 2.7)	Stabilitätskategorie	Hinweise
Salami (trockenfermentiert)	0,82–0,88 (hart); 0,88–0,92 (halbtrocknen) [Ref. 9, 22]	0,85–0,92 (geschätzt; typisch höhere Feuchtigkeit als EU-Produkt; siehe Abschn. 2.7)	0,84–0,90 (geschätzt; Chorizo-Typ; mexikanische Halbtrockenvarianten höher; siehe Abschn. 2.7)	Umgebungsstabil (hart); gekühlt (halbtrocknen)	EU-Hygieneanforderungen unter Reg. 853/2004; Produktidentitätsstandards für fermentierte Würste je Mitgliedstaat verschieden.
Speck (nassgesalzen)	0,95–0,97 [Ref. 22]	0,95–0,97 (geschätzt; siehe Abschn. 2.7)	0,95–0,97 (geschätzt; siehe Abschn. 2.7)	Gekühlt (Kühlung unbedingt erforderlich)	aw nahezu identisch weltweit. NaCl 1,8–2,5 % in den meisten kommerziellen Produkten. Trockengepökelter Bauchspeck niedriger: ~0,88–0,93. [Ref. 5, 22, 25]
Biltong (Rind/Wild)	Kein traditionelles EU-Produkt; importiertes Produkt entspricht typischerweise SA-Spec: 0,65–0,75 (trocken) [Ref. 24, 25]	Trocken: 0,65–0,75 [Ref. 24]; feucht/nass: 0,85–0,89 [Ref. 24, 25]	Kein traditionelles MX-Produkt; Nischen-/Importprodukt; entspricht typischerweise SA-Trockenspezifikation	Trocken: umgebungsstabil Feucht: Kühlung erforderlich	Kein aw-Grenzwert für Biltong in den gesichteten südafrikanischen Rechtsquellen identifiziert. Challengestudie: Gavai et al. (2022) zeigte, dass aw < 0,85 nach 6–8 Tagen Trocknen den entscheidenden Schwellenwert für eine >5-log-Pathogenreduktion darstellt. [Ref. 26]
Jerky (Rind)	~0,72–0,80 (EU-Import/Nische)	~0,75–0,82 (SA-produziert; kein formaler aw-Boden in gesichteten Quellen identifiziert, siehe Ref. 52)	~0,72–0,82 (Cecina und Machaca-Typ; traditioneller Trocknungsgrad variiert, geschätzt)	Umgebungsstabil	USDA FSIS: aw < 0,85 für lagerstabiles verzehrfertig getrocknetes Rindfleisch (FSIS-GD-2023-0002, 2023). [Ref. 46]
Kilishi / Cecina-Typ	Kein traditionelles EU-Produkt; selten importiert	Kilishi/Suya sind westafrikanische Traditionsprodukte; nicht Teil des südafrikanischen kommerziellen Hauptsortiments	Cecina (MX traditionell): ~0,72–0,82; handwerkliche sonnengetrocknete Varianten niedriger, ~0,55–0,70	Umgebungsstabil bei ausreichender Trocknung	Mexikanische Cecina (gesalzene getrocknete Rind/Schwein, oft aus Yecapixtla) nimmt die funktional nächste Nische ein. aw sehr variabel; handwerkliche Produktinkonsistenz ist ein anerkanntes potenzielles Lebensmittelsicherheitsproblem.
Geformter gegarter Schinken (restrukturiert)	Gegart: 0,970–0,985 [Ref. 22]	0,966–0,980 (geschätzt; etwas geringere Feuchtigkeit als EU)	0,965–0,980 (geschätzt; Feuchtigkeitsgehalt je nach Preissegment variierend)	Gekühlt (Kühlung unbedingt erforderlich)	aw wirksam nur durch Salz und Kühlung kontrolliert. Polyphosphate verbessern WHC, senken aber nicht die aw. aw muss am Fertigprodukt gemessen werden; nicht aus der Rezeptur berechnen. [Ref. 49, 50]

Sandwichschinken / Aufgeschnittener gegarter Schinken	0,970–0,983 [Ref. 22]	0,965–0,980 (geschätzt; siehe Abschn. 2.7)	0,960–0,978 (geschätzt; siehe Abschn. 2.7)	Gekühlt + MAP/Vakuum	Im Wesentlichen geformter gegarter Schinken in Aufschnittformat. Kühlkette und Verpackungsintegrität dominieren die Sicherheit. HPP zunehmend bei EU- und südafrikanischen Premiumprodukten.
Ganzmuskelschinken (intakt; gegart oder halbtrocknet)	Gegart: 0,955–0,975 [Ref. 22]; trockengesalzen (z.B. Prosciutto): 0,88–0,92 (PDO-Produkte); Serrano/Ibérico 0,82–0,88 [Ref. 9, 22]	Gegarter Gammon: 0,955–0,975 (geschätzt; siehe Abschn. 2.7); keine einheimische Langtrocken-Tradition im großen Maßstab in gesichteten Quellen	Gegart: 0,955–0,975 (geschätzt; siehe Abschn. 2.7); Pierna curada (MX trockengesalzene ganze Keule): ~0,88–0,93 (geschätzt)	Gegart: gekühlt. Langtrockenpökel: umgebungsstabil bei niedrigeren aw-Bereichen	Trockengesalzene EU-Produkte (Prosciutto, Serrano, Ibérico) haben spezifische PDO/PGI-aw-Zielwerte. SA und MX haben keine äquivalenten regulatorischen PDO-Rahmen.

Dieses Konzept zog ausdrücklich eine Analogie zur Antibiotikaresistenz: Antimikrobiell wirksame Mittel, die gleichzeitig mehrere zelluläre Systeme angreifen, sind weniger anfällig für die Entwicklung von Resistenzen als solche, die auf einen einzelnen Signalweg abzielen. Das gleiche Prinzip gilt für die Lebensmittelkonservierung. Hürdelkombinationen, die gleichzeitig Zellmembranen, intrazellulären pH-Wert, Enzymfunktion und DNA angreifen, sind wahrscheinlich robuster wirksam – und gegenüber Organismen mit Einzelmechanismus-Resistenz weniger anfällig – als Kombinationen, die vorwiegend nur ein System angreifen.

Die praktische Konsequenz für die Produktentwicklung: Die besten Hürdensysteme sind nicht einfach die maximale sichere Konzentration jedes einzelnen Konservierungsmittels, gestapelt übereinander, sondern intelligent ausgewählte Kombinationen, die unterschiedliche zelluläre Angriffsziele adressieren. Eine Kombination aus aw-Senkung (osmotisches Ziel), pH-Senkung (intrazelluläres Ansäuerungsziel), Nitrit (Enzym- und Elektronentransportziel) und Kühlung (verlangsamte Stoffwechselantwort) greift gleichzeitig vier verschiedene zelluläre Systeme an und macht eine mikrobielle Adaptation und Resistenzentwicklung erheblich schwieriger.

2.7 Typische Wasseraktivitätswerte für wichtige Fleischprodukte in verschiedenen Regulierungsmärkten

Die folgende Tabelle zeigt typische aw-Bereiche für acht kommerziell bedeutsame Fleischproduktkategorien in drei Regulierungsregionen: Europäische Union, Südafrika und Mexiko. Diese Werte stellen den Bereich dar, der in der legitimen kommerziellen Produktion in jedem Markt üblicherweise erreicht wird; es handelt sich nicht um regulatorische Grenzwerte (sofern nicht anders angegeben), sondern um das praktische Ergebnis standardmäßiger Formulierungs- und Verarbeitungspraktiken in der jeweiligen Region.

Die Unterschiede zwischen den Märkten ergeben sich aus: unterschiedlichen regulatorischen Feuchtigkeitsgrenzen, unterschiedlichen Verbraucherpräferenzen für Salzgehalt und Textur, unterschiedlichem Zugang zu Zutaten und Kosten sowie unterschiedlichem traditionellen Produkterbe. Die Zuverlässigkeit der Kühlkette ist ein möglicher Beitragsfaktor bei Unterschieden der Formulierungsziele; Heinz & Hautzinger (2007) weisen darauf hin, dass Verarbeiter in Märkten mit weniger zuverlässiger Verteilungstemperaturkontrolle möglicherweise niedrigere Feuchteendpunkte als Vorsichtsmaßnahme anstreben [Ref. 22], dies ist jedoch eine

plausible technische Schlussfolgerung und kein systematisch erforschtes Marktverhaltensphänomen.

Quellen für EU-Bereiche: Petit et al. (2014); Jones et al. (2019); Heinz & Hautzinger (2007); Igwegbe et al. (2009); Leistner & Rödel (1976). Quellen für SA- und MX-Bereiche: verfügbare veröffentlichte Literatur kombiniert mit regionalem Fachwissen, wo primäre begutachtete Messungen fehlen. SA- und MX-Bereiche sind INDIKATIVE SCHÄTZUNGEN, keine begutachteten Messungen. [Ref. 1, 2, 5, 9, 22, 24, 25, 27]

Wichtiger Vorbehalt: Die südafrikanischen und mexikanischen aw-Daten in dieser Tabelle sind indikative Schätzungen, die aus verfügbarer veröffentlichter Literatur und regionalem Fachwissen abgeleitet wurden. Es handelt sich NICHT um begutachtete Messungen aus Primärstudien zu kommerziellen SA- und MX-Produkten. Primäre begutachtete aw-Messstudien für diese Märkte sind wesentlich weniger verfügbar als für EU-Produkte. Wo diese Tabelle Bereiche für SA oder MX angibt, ist dies als Arbeitsschätzung zu behandeln. Hersteller in diesen Märkten müssen eigene aw-Messungen an ihren spezifischen Produkten durchführen und dürfen sich für regulatorische Compliance-Zwecke nicht auf diese Schätzungen stützen.

2.8 Hydrokolloide in der modernen Fleischformulierung: Einfluss auf die Wasseraktivität

Die weit verbreitete Verwendung von Hydrokolloiden in der Fleischverarbeitung – seit den 1990er Jahren erheblich zunehmend und inzwischen in gegarten und restrukturierten Produkten weltweit im Wesentlichen Standard – wirft eine wichtige und häufig missverstandene Frage für die Konservierungswissenschaft auf: Senken Hydrokolloide die Wasseraktivität, und wenn ja, bieten sie eine sinnvolle zusätzliche Konservierungshürde?

Die kurze Antwort, gestützt durch die Fachliteratur, lautet: Nein, nicht in einem praktisch bedeutsamen Sinne. Dieser Abschnitt erklärt warum und erörtert die Implikationen für die Gestaltung von Hürdensystemen in hydrokolloidhaltenden Formulierungen.

Hydrokolloide – eine Kategorie, die Carrageene, modifizierte Stärken, Gelatine, Konjak-Glucomannan, Methylcellulose, Xanthan, Inulin und Alginate umfasst – wirken in Fleischerzeugnissen in erster Linie durch Binden oder Immobilisieren von freiem Wasser (Niveau-3-Wasser gemäß Klassifikation in Abschnitt 2.2). Sie verbessern die Wasserbindungskapazität (WHC), reduzieren Garverluste, verbessern die Ausbeute und verändern die Textur. Ihr Wasserbindemechanismus ist physikalisch und nicht thermodynamisch: Sie schließen Wasser in einer Gelmatrix oder viskosen Lösung ein und reduzieren dabei seine Mobilität, ohne seine thermodynamische Aktivität wesentlich zu verringern.

Der entscheidende thermodynamische Unterschied: Gebundenes Wasser in einem Hydrokolloidgel ist nicht dasselbe wie osmotisch erniedrigtes Wasser. Salz (NaCl) senkt die aw, indem es sich in Wasser löst und auf Molekülebene mit Wassermolekülen interagiert – ihr chemisches Potenzial und ihren Dampfdruck, ihre Fugazität, tatsächlich verringern. Hydrokolloide schließen Wasser physisch in einem Gelnetzwerk ein; das eingeschlossene Wasser behält im Wesentlichen dieselbe thermodynamische Aktivität (aw) wie im freien Zustand, da es nicht in

derselben Weise wie Solute auf Molekülebene chemisch mit den Wassermolekülen interagiert. Ein aus reinem Wasser hergestelltes Carrageengel weist eine aw von annähernd 1,0 auf.

Bei typischen lebensmittelgerechten Einsatzkonzentrationen in Fleischerzeugnissen (für die meisten Hydrokolloide im Allgemeinen 0,1–2 %) ist die erreichbare aw-Senkung vernachlässigbar – sicherlich unterhalb der mikrobiologisch bedeutsamen Schwelle und an oder unterhalb der praktischen Messgrenze der meisten handelsüblichen aw-Messgeräte. Die thermodynamische Grundlage hierfür ist gut belegt: Die aw-Erniedrigung, die einem Solut zugeschrieben werden kann, ist proportional zu seiner molaren Konzentration (Raoulsches Gesetz), und hochmolekulare Polymere wie Carrageen und Stärke liefern auch bei 1–2 % Eintragsrate nur sehr wenige Mol pro Gramm Produkt. Die quantitative Konsequenz: Hydrokolloide bewirken in Lebensmittelgebrauchsmengen keine messbare oder sinnvolle aw-Senkung. Jeder Anspruch, dass die Zugabe von Carrageen oder modifizierter Stärke zu einem gegarten Schinken „die aw senkt“, ist bei praktischen Einsatzmengen technisch unzutreffend. [Ref. 17]

Eine wichtige Formulierungsimplication: In Produkten, bei denen Hydrokolloide Garverluste erheblich reduzieren, behält das Fertigprodukt mehr Gesamtwasser als ohne das Hydrokolloid. Dies verändert das Feuchte-Salz-Verhältnis im Produkt, das einer von mehreren interagierenden Faktoren ist, die die endgültige aw neben Proteindenaturierung, Gelierung, Feuchtemigration und Gleichgewichtseinstellung während Erhitzung und Abkühlung bestimmt. Da diese Wechselwirkungen komplex und produktspezifisch sind, kann die aw in hydrokolloidenthaltenden Produkten aus der Rezeptur nicht verlässlich vorhergesagt werden; sie muss am fertigen, nachgegarten Produkt gemessen werden. Dies ist der einzige betrieblich verlässliche Ansatz. [Ref. 17]

Die folgende Tabelle fasst die in der Fleischindustrie eingesetzten wichtigsten Hydrokolloide und ihre Auswirkungen auf die Wasseraktivität zusammen:

Hydrokolloid	Typischer Einsatzlevel in Fleisch	Direkter Effekt auf aw	Nettokonservierungseffekt	Praktische Implikationen
Carrageen (Iota, Kappa)	0,5–2 %	Vernachlässigbare direkte aw-Senkung bei Einsatzmengen	Kein direkter aw-Hürdennutzen; verbessert Wasserhaltung und Garausbeute. Fertigprodukt-aw muss gemessen werden; nicht aus der Rezeptur schätzen.	Weit verbreitet in injektionsgepökelten Schinken und gegarten Produkten. Dient nicht als aw-Hürde.
Modifizierte Stärke (Phosphat, Acetyliert)	1–5 %	Sehr gering, effektiv null bei lebensmittelgerechten Einsatzmengen	Neutral bis vernachlässigbar; keine direkte aw-Senkung. Höhere zurückbehaltene Feuchtigkeit verändert Feuchte-Salz-Verhältnis auf produktspezifische Weise. aw muss am Fertigprodukt gemessen werden. [Ref. 17]	Häufig in Wirtschafts-Kochschinken und Konservenprodukten. Kein Konservierungsmittel; aw muss am Fertigprodukt gemessen werden.
Methylcellulose / HPMC	0,1–1 %	Vernachlässigbar	Kein sinnvoller Konservierungsbeitrag	Einsatz bei Fettreduzierung und

				Textur. Kein aw-Nutzen.
Xanthan	0,05–0,3 %	Vernachlässigbar	Keiner	Viskositäts-/Texturmodifikator. Kein antimikrobieller Nutzen.
Gelatine	0,5–3 %	Vernachlässigbar direkt; immobilisiert Wasser in Gelform	Neutral bis vernachlässigbar; keine aw-Senkung	Einsatz in gepressten Schinken, Aspik-Produkten. Gebundenes Wasser im Gelatinegel stellt keine aw-Senkung dar.
Konjak-Glucomannan	0,1–0,5 %	Vernachlässigbar	Keine als Konservierungshürde	Hohe Wasserbindung; in Kombination mit Carrageen verwendet. Keine direkte aw-Funktion.
Inulin (Präbiotische Faser)	1–5 %	Sehr geringer osmotischer Effekt bei hohen Konzentrationen; praktisch nicht bedeutsam	Vernachlässigbar	Einsatz in fettreduzierten und funktionellen Fleischerzeugnissen. Bei typischen Einsatzmengen kein messbarer aw-Effekt.
Alginat	0,3–1,5 %	Vernachlässigbar	Keine als Konservierungshürde	Einsatz in restrukturierten Produkten (Fleischbindung ohne Hitze). Kein aw-Beitrag.

Quellen: Barbosa-Cánovas et al. (2007); Offer & Trinick (1983); Heinz & Hutzinger (2007); Leistner (2000); Bull (1944); Fennema (1973). [Ref. 9, 17, 18, 19, 20, 22]

Implikationen für die Hürdensystemgestaltung in hydrokolloidenthaltenden Produkten:

- Stütze dich nicht auf Hydrokolloidzugaben, um einen sinnvollen aw-Hürdenbeitrag zu leisten. Die aw in einem gegarten Schinken oder Pressprodukt mit Carrageen oder modifizierter Stärke wird fast ausschließlich durch Salzkonzentration, Garausbeute und Feuchtigkeitsgehalt bestimmt, nicht durch das Hydrokolloid.
- Bei der Salzreduktion (und damit aw-Senkung) in der Rezepturanpassung kompensiert die Zugabe von Hydrokolloiden zur Textur- und Ausbeutestabilisierung nicht den Verlust der aw-Hürde. Jedes Element muss gesondert bewertet werden.
- aw-Messungen an hydrokolloidenthaltenden Produkten sollen am fertigen, nachgegarten Produkt durchgeführt werden, nicht aus der Rezeptur berechnet. Die Wechselwirkung von Gartemperaturen, Proteindenaturierung, Hydrokolloidgelierung und Feuchtemigration während des Garens macht kalkulierte aw-Vorhersagen unzuverlässig.
- Im Rahmen der Haltbarkeitsmodellierung (Abschnitt 5.1) sollen hydrokolloidenthaltenden Produkten ihre gemessenen aw-Werte zugeordnet werden. Prädiktive Modelle, die Formulierungssalz als Ersatz für aw verwenden, überschätzen den Konservierungsbeitrag in Hochausbeute-Formulierungen mit geringem Tropfverlust.

2.9 Hydrokolloide in Proteinnetzwerk-Fleischsystemen: Verwaltung von Austritt und Oberflächenfeuchtigkeit ohne Anspruch auf aw-Senkung

Grundsatzaussage: Hydrokolloide wirken nicht als aw-Hürden bei typischen Einsatzmengen in Fleischerzeugnissen. Dies wurde in Abschnitt 2.8 belegt. Der Zweck dieses Abschnitts ist ein anderer: Es ist ein praktischer Prozessleitfaden für Anwender, die Austritt, Oberflächenexsudat und Wassermobilität steuern möchten – ohne Konservierungsansprüche zu erheben, die nicht unterstützt werden können. Die aw muss weiterhin mit echten aw-Hürden erreicht und verifiziert werden: NaCl, Trocknung, Fermentation und andere solut- oder feuchtigkeitsentzugsbasierte Prozesse. Hydrokolloide unterstützen Produktqualität, Ausbeute und Strukturleistung. Sie ersetzen kein Element eines validierten Hürdensystems. [Ref. 9, 17, 22]

Das praktische Ziel präzise formuliert

Was Hydrokolloide in gegarten und restrukturierten Fleischerzeugnissen legitim leisten können – korrekt formuliert:

- **Garaustrittsverlust reduzieren:** Wasser innerhalb der Proteingel-Matrix während der Wärmebehandlung zurückhalten und so die Endproduktausbeute erhöhen.
- **Oberflächenexsudat reduzieren:** Ansammlung von freiem Wasser auf der Schnitt- oder Aufschnittoberfläche des Produkts nach dem Garen oder Kühlen verhindern.
- **Wassermobilität verringern:** Die Viskosität der Wasserphase in Battersystemen erhöhen und die Migration von freiem Wasser zu Oberflächen oder Grenzflächen verlangsamen.
- **Bindung und Schnittfähigkeit verbessern:** Ein kohäsives Protein-Hydrokolloid-Gelnetzwerk erzeugen, das Muskelstücke zusammenhält und Schnittbruch widersteht.
- **Mikronischen-Feuchtigkeit reduzieren:** Lokalisierte feuchte Grenzflächen zwischen Muskelstücken oder zwischen Produkt und Verpackung beseitigen, die oberflächliches Mikrowachstum bei höherer lokaler aw unterstützen können.

Was Hydrokolloide NICHT leisten können und was nicht beansprucht werden darf: Hydrokolloide machen Wasser thermodynamisch für Mikroorganismen nicht unverfügbar. Mikroben reagieren auf die Wasseraktivität (aw) – eine thermodynamische Eigenschaft, die das chemische Potenzial des Wassers und seinen Dampfdruck widerspiegelt. Sie reagieren nicht auf die physische Mobilität oder den Ort von Wasser in einem Gelnetzwerk. Ein Mikroorganismus auf der Oberfläche eines Carrageen-Gel-Kochschinkens hat Zugang zu Wasser mit der thermodynamischen Aktivität dieses Wassers, die durch die Salzkonzentration und Proteinwechselwirkungen bestimmt wird – nicht dadurch, ob das Wasser in einem Hydrogel gehalten wird. Das Konzept von „gebundenem Wasser“ als mikrobielle Barriere ist bei Hydrokolloid-Einsatzmengen thermodynamisch unzutreffend. [Ref. 9, 17]

Praktischer Entscheidungsleitfaden nach Produktformat

Die folgende Tabelle bietet Auswahl- und Eintragsrichtlinien für vier gängige gegarte und restrukturierte Produktformate. Alle Funktionsziele sind als Ausbeute- und Austrittskontrollen formuliert. Anforderungen an die Konservierungsvalidierung sind gesondert und ausdrücklich angegeben.

Produktformat	Primäres Austritts-/Bindungsproblem	Empfohlene Hydrokolloide und Eintragsbereich	Primäres Funktionsziel (NICHT aw-Senkung)	Validierungsanforderung
Im Beutel gegarter Ganzmuskeln-Schinken (injektionsgepökelt)	Garaustrittsverlust sammelt sich im Beutel; Gel im Beutel; Oberfläche beim Öffnen nass	Carrageen (Iota/Kappa-Mischung): 0,5–1,5 % auf Fertigproduktgewicht; optional Konjak-Glucomannan 0,1–0,3 % in Mischung für Gelfestigkeit [Ref. 20, 22]	Garaustritt reduzieren; Beutelgeltasche beseitigen; Schnittqualität und Oberflächentrockenheit beim Aufschneiden verbessern	aw am fertigen gekühlten Produkt messen; nicht aus Pökelformulierung berechnen. Bei verlängertem Haltbarkeitsziel: Challengestudie bei gemessener aw mit <i>L. monocytogenes</i> und <i>S. aureus</i> .
Geformter/gepresster Kochschinken (im Formstück gepresst)	Proteinnetzwerk unvollständig; Austritt zwischen Muskelstücken; Oberflächenexsudat beim Entformen	Carrageen: 0,5–1,5 %; modifizierte Stärke (acetyliertes Distärkephosphat): 1–3 % als Sekundärbinder [Ref. 20, 22]	Inter-Muskel-Proteinbindung verbessern; Entformungsaustritt reduzieren; Oberflächenfeuchtigkeit als mikrobielle Mikronischen beim Aufschneiden reduzieren	aw am ungünstigsten (äußersten) Schnitt messen. Erhöhte Oberflächenfeuchtigkeit durch reduzierten Austritt impliziert keine niedrigere aw; durch Messung bestätigen. Haltbarkeits-Challengetest bei gleichzeitiger Salzreduktion zwingend erforderlich.
Feinzerkleinert / Feinemulsion (Frankfurter, Wiener, Mortadella-Typ)	Emulsionsinstabilität; Fett-Wasser-Trennung; sichtbares Exsudat unter der Hülle beim Abziehen	Carrageen: 0,3–0,8 %; Methylcellulose oder HPMC 0,1–0,5 % für Heißgelbindung in fetthaltigen Systemen [Ref. 22]	Fett-Wasser-Emulsion stabilisieren; Exsudat unter der Hülle beseitigen; glatten Querschnitt und Schnittfähigkeit erhalten	aw durch Salzgehalt in der Wasserphase bestimmt, nicht durch Carrageen oder Stäreeintrag. Jede Rezepturanpassung mit NaCl-Reduktion erfordert erneute aw-Messung. Challengetest bei Nitrit- oder NaCl-Senkung als Teil einer Clean-Label-Reformulierung.
Restrukturierter Ganzmuskeln (Transglutaminase-gebunden oder Alginat-gesetzt)	Wasseraustritt aus Muskelstücken nach dem Setzen; Oberflächensammlungen; schlechte Schnittintegrität	Alginat (kaltgesetzt mit Calcium): 0,3–1,5 % für Strukturbindung; Carrageen 0,3–1,0 % als Sekundärbinder für WHC innerhalb der Stücke [Ref. 22]	Strukturintegrität beim Aufschneiden erhalten; Inter-Stück-Wasseraustritt reduzieren; Oberflächensammlungen verringern, die lokalisierte erhöhte aw-Mikromilieus auf der Schnittoberfläche erzeugen	Transglutaminase und Alginat bieten Strukturbindung, keine aw-Hürden. aw wird durch Salz- und Feuchtigkeitsgehalt der Fleischstücke bestimmt. aw am zusammengestellten und aufgeschnittenen Produkt messen. Bei Beseitigung von Oberflächensammlungen keine aw-Senkung annehmen; messen.

Quellen: Offer & Trinick (1983); Heinz & Hautzinger (2007); Barbosa-Cánovas et al. (2007). [Ref. 17, 20, 22]

Funktionsmechanismen und Validierungsanforderungen je Hydrokolloidklasse

Die folgende Tabelle fasst den primären Funktionsmechanismus jeder Hydrokolloidklasse in Fleischbatter- oder -pökelsystemen, den Ausbeuteeffekt und seine aw-Implikation sowie die sich daraus ergebende Validierungsanforderung zusammen.

Hydrokolloidklasse	Primärer Funktionsmechanismus im Fleischbatter/Pökel	Ausbeuteeffekt und aw-Implikation	Validierungsanforderung
Iota- und Kappa-Carrageen	Elektrostatische Wechselwirkung mit positiv geladenen Myosinköpfen während der Gelierung; bildet ein kontinuierliches Hydrogelwerk um Proteinstränge, das beim Garen freigesetztes freies Wasser einschließt. Netzwerk thermoreversibel (Iota) oder nicht reversibel (Kappa) je nach Kühlrate. [Ref. 20]	Erhöhte Garausbeute (typisch +3–8 % auf Produktgewicht bei 0,5–1,5 % Eintrag). Höhere zurückbehaltene Feuchtigkeit bei konstantem Salzeintrag bedeutet, dass Salz auf mehr Wasser verteilt wird; Feuchte-Salz-Verhältnis steigt, aw kann geringfügig höher sein als bei einer niedrigeren Ausbeute-Nicht-Hydrokolloid-Formulierung bei identischem Salzeintrag. Richtung und Ausmaß produktspezifisch. [Ref. 17]	aw am fertigen Nachgarprodukt messen. Formulierungssalzgehalt nicht als aw-Ersatz verwenden. Bei gleicher aw-Ziel wie bei früherer Nicht-Hydrokolloid-Formulierung; durch Messung verifizieren; nicht annehmen, dass sie übertragbar ist.
Acetylierte und phosphatvernetzte modifizierte Stärke	Granulaquellen und Gelatinierung beim Garen; Viskositätssteigerung in der Wasserphase des Batters; teilweise Filmbildung um Fettglobuli in Emulsionssystemen. Stabilisiert Wasser in der Matrix durch Erhöhung des viskosen Widerstands gegen Migration statt durch thermodynamische Bindung. [Ref. 17, 22]	Garausbeute-Erhöpfung typisch +2–6 %. Gleiche aw-Implikation wie bei Carrageen: höhere Feuchterückhaltung bei konstantem Salz kann Feuchte-Salz-Verhältnis verschieben. Nicht aus Rezeptur vorhersagbar; muss gemessen werden. [Ref. 17]	Zwingend aw-Messung am Fertigprodukt. Wird Stärke zugegeben, um Salzreduktion (zur Textur- und Ausbeutestabilisierung) zu kompensieren, wird der aw-Effekt der Salzreduktion durch die Stärke nicht neutralisiert; beide müssen gesondert bewertet werden.
Gelatine	Kollagenhydrolysat, das bei etwa 25 °C ein thermoreversibles Gel bildet. Erzeugt feste Gelmatrix um Muskelfasern in gepressten Produkten und Aspikbeschichtungen. Gelwasser ist physisch gehalten, thermodynamisch jedoch im Wesentlichen unverändert; aw eines Gelatinegels nähert sich der aw des zu seiner Herstellung verwendeten Wassers an. [Ref. 19]	Moderate Ausbeuteverbesserung. Gelwasser hat aw nahe 1,0, sofern kein Salz in der Gellösung vorhanden ist. Produkte, die auf Gelatine für die Kohäsion angewiesen sind, müssen ausreichend Salz enthalten, um die Ziel-aw zu erreichen; die Gelatine trägt nicht zur aw-Senkung bei.	aw der Gelphase gesondert messen, wenn das Gel-Fleisch-Verhältnis hoch ist (z.B. Aspikprodukte, Pressmaul). Die Gelphase kann eine höhere aw aufweisen als die Fleischphase, wenn das Gelherstellungswasser einen niedrigeren Salzgehalt als die Fleischpökel hat.
Konjak-Glucomannan	Hochmolekulares Polysaccharid; bildet bei niedrigen Konzentrationen extrem viskose Dispersionen (0,1–0,5 %). In Kombination mit Kappa-	Geringe Ausbeuteverbesserung; der Funktionsnutzen ist die Gelqualität, nicht die Ausbeute per se. aw-Implikationen wie bei	aw am Endprodukt wie bei Carrageen validieren. Konjak fügt keine eigenständige Konservierungshürde hinzu.

	Carrageen zur synergistischen Verbesserung der Gelfestigkeit und Wasserrückhaltung verwendet. Mechanismus: Konjaketten co-gelieren mit Carrageen-Helices und erzeugen ein festeres, kohäsiveres Netzwerk. [Ref. 22]	Carrageensystemen; muss gemessen, nicht berechnet werden.	
Alginat (Natriumalginat, kaltgesetzt mit Calcium)	Ionische Vernetzung von Alginatketten durch Calciumionen (typischerweise aus Calciumlaktat oder Calciumchlorid) bildet bei Umgebungstemperatur ein thermostabiles Gel. Einsatz in restrukturierten Produkten, wo Wärmebehandlung nicht möglich oder nicht erwünscht ist. Bietet Strukturbindung zwischen Muskelstücken. [Ref. 22]	Ausbeuteverbesserung abhängig von Salzaufnahme und Calciumgelbildungseffizienz. aw ausschließlich durch Salz- und Feuchtigkeitsgehalt der Fleischstücke bestimmt; Alginatgel selbst weist aw nahe der aw seiner wässrigen Phase bei gegebener Salzkonzentration auf.	Kritischer Validierungspunkt: Alginatgebundene Produkte haben Mikrorenzflächen zwischen Muskelstücken, an denen Oberflächenfeuchtigkeit ansammeln kann, bevor das Gel setzt. aw an der Grenzfläche und an der Produktoberfläche messen, nicht nur im Kern. Challengestudie für <i>L. monocytogenes</i> zwingend, wenn Produkt aufgeschnitten und für verlängerte Kühlhaltbarkeit verpackt wird.

Quellen: Bull (1944); Fennema (1973); Offer & Trinick (1983); Barbosa-Cánovas et al. (2007); Heinz & Hutzinger (2007). [Ref. 17, 18, 19, 20, 22]

Das Mikronischen-Feuchtigkeitsproblem: Was es ist und was es nicht ist

Anwender stellen gelegentlich fest, dass die Zugabe von Hydrokolloiden die sichtbare Oberflächenfeuchtigkeit reduziert, und schlussfolgern fälschlicherweise, dass das Produkt damit im mikrobiologischen Sinne „trockener“ ist. Der Unterschied ist wichtig:

- **Was geschieht:** Das Hydrokolloidgelnetzwerk hält freies Wasser innerhalb der Produktmatrix zurück und reduziert das Wasservolumen, das an die Oberfläche migriert und sich dort ansammelt. Die Oberfläche ist sichtbar weniger nass.
- **Was dies für Mikronischen bedeutet:** Lokalisierte Ansammlungen von freiem Wasser an einer Oberfläche oder Grenzfläche können eine Mikroumgebung mit höherer lokaler aw erzeugen als das Produktinnere, da der Wasservorrat die Oberflächensalzkonzentration leicht verdünnen kann. Die Beseitigung dieses Vorrats entfernt diese lokalisierte erhöhte-aw-Nische. Dies ist ein echter, physikalisch vertretbarer Nutzen.
- **Was dies NICHT bedeutet:** Die aw der Produktmatrix selbst wurde durch das Hydrokolloid nicht gesenkt. Die aw des Produkts wird nach wie vor ausschließlich durch Salzkonzentration, Feuchtigkeitsgehalt und Proteinwechselwirkungen in der gesamten Matrix bestimmt – all das muss gemessen werden.
- **Konsequenz für die Validierung:** Das Fehlen sichtbarer Oberflächenfeuchtigkeit ist keine Sicherheitsvalidierung. Die aw muss am

fertigen nachgegartem Produkt noch immer instrumentell gemessen werden, einschließlich an repräsentativen Oberflächenproben, wenn das Risiko von Oberflächen-Mikronischen das spezifische Anliegen ist. [Ref. 17]

Zusammenfassung: Das richtige mentale Modell für den Anwender

Hydrokolloide sind Ausbeute- und Texturwerkzeuge. Sie verbessern Austerittskontrolle, Bindung, Schnittfähigkeit und Oberflächenqualität. Dabei können sie lokalisierte Oberflächenfeuchtigkeit reduzieren und angesammelte Mikronischen beseitigen – ein sekundärer Qualitäts- und Hygiennutzen. Sie senken nicht die aw. Sie fügen keine Hürde hinzu. Jedes aw-Ziel in deinem Hürdensystem muss weiterhin durch Salz, Trocknung, Fermentation oder einen anderen validierten solut- oder feuchtigkeitsentzugsbasierten Mechanismus erreicht und durch Messung am Fertigprodukt bestätigt werden. Wenn du Salz nach unten reformulierst und Carrageen zugibst, um die Textur aufrechtzuerhalten, hast du den aw-Beitrag des Salzes nicht ersetzt; du hast eine höhere aw akzeptiert und musst validieren, dass der Rest deines Hürdensystems bei dieser höheren aw ausreichend ist. [Ref. 9, 17, 22]

ABSCHNITT 3: OPTIMALE HÜRDENSYSTEME NACH PRODUKTKATEGORIE

Die folgenden produktspezifischen Hürdensysteme sind aus der primären und begutachteten Fachliteratur abgeleitet, wie jeweils angegeben. In jedem Fall werden wichtige Zielparameter zusammen mit den primären Sicherheitsrisiko-Organismen angegeben. Wo eine Validierung durch Challengestudien erforderlich ist, wird dies ausdrücklich vermerkt. Es handelt sich nicht um behördliche Genehmigungen, sondern um evidenzbasierte Ausgangspunkte für die Produktentwicklung.

Anmerkung zur Artenspezifität: Der Großteil der grundlegenden Hürdenforschung wurde an Rind- und Schweinefleischsystemen durchgeführt. Wo Huhn, Lamm, Ziege oder andere Arten angegeben sind, liegt dies daran, dass artenspezifische Daten in der Literatur vorliegen. Wo keine Artenunterschiede berichtet werden, gelten dieselben Grundsätze im Allgemeinen, jedoch können aufgrund von Unterschieden im Ausgangs-pH-Wert, Fettgehalt, Kollagengehalt und der Ausgangskeimflora geringfügige Parameteranpassungen erforderlich sein. [Ref. 4, 9, 21]

3.1 Speck: Bauch- und Rückenspeck (Schwein)

Speck ist ein gepökelt, rohes oder halbgegartes Schweinefleischerzeugnis. Seine Konservierung stützt sich auf eine klassische industrielle Hürdelkombination, die über Jahrhunderte traditioneller Praxis entwickelt und durch die moderne Wissenschaft verfeinert wurde. Das primäre Sicherheitsrisiko ist *Clostridium botulinum* Typ A und B im anaeroben Milieu vakuumverpackter Produkte sowie *Listeria monocytogenes* als psychrotropher Post-Prozess-Kontaminant in geräucherten und gegarten Varianten.

Hürde	Zielbereich	Hinweise
NaCl (Pökel)	2,0–2,5 % im Produkt	Erreicht aw 0,96–0,97 bei einem Standard-Nasspökelprodukt; allein unzureichend für Umgebungsstabilität
Natriumnitrit	100–150 ppm ingoing	Primäre Botulinum-Hürde; regulatorische Grenzwerte variieren (EU, SA, USA); entscheidend für <i>Cl. botulinum</i> -Sicherheit
Kühlung (T)	0–5 °C durchgehend	Kritische unterstützende Hürde; verlangsamt <i>L. monocytogenes</i> -Wachstum auf <0,1 log/Tag unterhalb 3 °C
pH-Wert (Ansäuerung)	5,6–5,8 typisch	Nicht eigenständig ausreichend, hemmt aber die meisten Pathogene; trägt zur Nitritwirksamkeit bei
Räuchern (optional)	Kalt- oder Heißrauch	Oberflächlich antimikrobiell (Phenole); Trocknungsbeitrag; traditioneller Geschmack; keine primäre Sicherheitshürde
Vakuumverpackung	O ₂ < 0,5 %	Verhindert aerobes Oberflächenwachstum; schafft anaerobes Milieu, in dem Nitrit/aw entscheidend werden

Die Kombination aus Nitrit + Salz + Kühlung + Vakuum stellt das industrielle Kern-Hürdenset dar. Die Abhängigkeit von Nitrit für die *Cl. botulinum*-Sicherheit im

vakuumverpackten Milieu ist absolut, solange keine thermische Behandlung über 121 °C erfolgt (die bei frischem Speck nicht angewendet wird). Hinweis: „Nitritfreie“ Speckprodukte werden zunehmend vermarktet; die wissenschaftliche Grundlage für alternative Botulinum-Sicherheitssysteme in vakuumverpackten Produkten ohne Nitrit ist weniger gut belegt und erfordert eine rigorose Validierung durch Challengestudien. [Ref. 4, 9, 22]

3.2 Trockenwürste: Fermentierte Salamiarten (Rind/Schwein)

Fermentierte und getrocknete Würste stellen eines der elegantesten und am besten untersuchten Beispiele sequentieller Hürdentechnologie in der Praxis dar. Die Hürden ändern sich in ihrer Art und relativen Bedeutung, während das Produkt Fermentation und Trocknung durchläuft. [Ref. 5, 38]

Hürdenphase	Aktive Hürden	Hinweise
Anfangsformulierung	NaCl (2,5–3,5 %), Nitrat, niedrige T (0–4 °C beim Füllen)	Nitrat wird langsam über Micrococcaceae in Nitrit umgewandelt; Salz hemmt viele Gramnegative; Kühlkette unterdrückt Verderb
Fermentation (Tag 1–5)	pH-Absenkung durch LAB (auf 5,0–5,3), Eh-Senkung, Konkurrenzflora	Milchsäurebakterien proliferieren; pH unter 5,3 hemmt die meisten Pathogene; Eh sinkt mit dem Sauerstoffverbrauch
Reifung/Trocknung	aw-Senkung (von 0,97 auf 0,82–0,88), Oberflächenschimmel (bei manchen), pH	Wasseraktivität wird zur dominanten Endhürde; aw < 0,87 senkt S. aureus-Toxinproduktionsrisiko (bei 30 °C Optimum; temperaturabhängig); S. aureus-Wachstumsminimum ist niedriger (~0,83–0,86) und kann bei diesem Schwellenwert nicht vollständig gehemmt sein; siehe Abschnitt 2 aw-Schwellenwerttabelle [Ref. 1, 48]
Endprodukt	aw 0,82–0,88, pH 4,8–5,2, NaCl 3–4 %, Restnitrit, Rauch	Mehrere kombinierte Hürden; umgebungsstabil; Zielorganismen: S. aureus, L. monocytogenes, E. coli O157:H7

Kritische Kontrolle: STEC (E. coli O157:H7) wurde in Ausbrüchen bei fermentierten Würsten (USA, Europa) nachgewiesen. Die Kombination aus pH < 5,0 und aw < 0,90 reduziert das STEC-Überleben erheblich, erreicht jedoch in nicht allen Challenge-Szenarien eine 5-log-Reduktion. Einige Rechtssysteme schreiben einen validierten Log-Reduktionsschritt vor. [Ref. 4, 23]

3.3 Biltong (Rind, Wild, Strauß)

Biltong ist das südafrikanische Paradebeispiel eines Fleischerzeugnisses mit intermediärem Feuchtigkeitsgehalt und ein außergewöhnlich gut untersuchter Fall der Hürdentechnologie. Anders als Jerky enthält es keinen Wärmebehandlungsschritt; die Sicherheit beruht ausschließlich auf dem physikalisch-chemischen Hürdensystem, das beim Salzen, der Essigbehandlung und dem Trocknen entsteht. [Ref. 24, 25, 26]

Hürde	Zielbereich	Hinweise
NaCl	4–8 % im Produkt	Primäres aw-senkendes Mittel; auch ionische antimikrobielle Wirkung auf Gramnegative
Essigsäure (Essig)	pH der Marinade 3,0–4,5; Produkt-pH 4,8–5,9	Organische Säure als Hürde; undissoziierte Essigsäure wirkt antimikrobiell; senkt Produkt-pH

Trocknung (aw)	Trockenes Biltong: aw 0,65–0,68; feuchtes Biltong: aw 0,85–0,89	Unterhalb 0,70: umgebungsstabil für die meisten lebensmittelrelevanten Pathogene und Verderbnisorganismen; wichtige Ausnahmen verbleiben einschließlich xrophiler Pilze (siehe Abschnitt 2 aw-Schwellenwerttabelle). 0,85–0,89 erfordert Kühlung und zusätzliche validierte Hürden.
pH-Wert	4,8–5,9	Wirkt synergistisch mit aw; nahe dem isoelektrischen Punkt von Muskelprotein (~5,1–5,2)
Gewürze (Koriander, Pfeffer)	Traditionelle Anwendung	Geringer antimikrobieller Beitrag (ätherische Ölphenole); primär sensorisch
Trocknungstemperatur	20–35 °C; kommerziell 35 °C mit starker Luftzirkulation	Kein Abtötungsschritt; beeinflusst Trocknungsrate und damit die Verweildauer bei intermediärer aw während der Verarbeitung

Ergebnisse der Challengestudie: Gavai, Karolenko & Muriana (2022) demonstrierten eine >5-log-Reduktion von E. coli O157:H7, L. monocytogenes und S. aureus in Biltong, das durch Vakuumtumbeln in Essig + Salz + Gewürzen behandelt und bei 23,9 °C/55 % rel. Luftfeuchtigkeit 6–8 Tage auf aw < 0,85 getrocknet wurde, ohne einen Wärme-Lethality-Schritt. Die begutachtete wissenschaftliche Schlussfolgerung lautet: aw < 0,85, über ausreichende Trocknungszeit mit Essig und Salz erreicht, stellt eine wirksame Multihürden-Lethalbehandlung für diese Organismen in diesem Produkt dar. [Ref. 26] „Feuchtes“ Biltong bei aw 0,85–0,89 hat diesen validierten Trocknungsendpunkt nicht erreicht. Bei aw über 0,85 können S. aureus, L. monocytogenes und E. coli O157:H7 je nach pH-Wert, Temperatur, Salz und Verpackungsbedingungen wachsen, was ein Kühlkettenmanagement und eine Prozessvalidierung erforderlich macht. Das FSIS-Lagerstabilitätskriterium aw < 0,85 [Ref. 46] stimmt mit diesen begutachteten Challengestudienergebnissen überein; es wird hier als bestätigender regulatorischer Kontext, nicht als primäre wissenschaftliche Grundlage angegeben. [Ref. 24, 25, 26]

Hinweis zur südafrikanischen Compliance: In der südafrikanischen Gesetzgebung existiert keine formale aw-Spezifikation für Biltong (im Gegensatz zu US-Vorschriften; siehe FSIS-GD-2023-0002 weiter unten). Dies ist ein Bereich, in dem die Produktgestaltung auf die internationale Evidenzbasis zurückgreifen sollte. [Ref. 32, 46]

3.4 Kilishi (Rind, Hammel, Ziege: Nigerianisches getrocknetes Fleisch)

Kilishi ist ein traditionelles westafrikanisches lagerstabiles getrocknetes Fleischerzeugnis, das vorwiegend in Nordnigeria hergestellt wird, mit einem Hürdensystem, das dem Biltong dem Grundsatz nach eng verwandt, in der Ausführung jedoch eigenständig ist. Das Produkt besteht aus dünnen Fleischscheiben, einer Erdnuss-/Gewürzpaste und Sonnentrocknung, wodurch ein ohne Kühlung lagerstabiles Produkt entsteht. [Ref. 27, 28]

Hürde	Zielbereich	Hinweise
Sonnentrocknung / Austrocknung (aw)	aw 0,55–0,70 (in der Literatur dokumentiert)	Primäre Hürde; traditionelle Freilufttrocknung; kommerzielle Produktion sollte kontrollierte Trocknung verwenden
NaCl / Würzmittel	3–6 % NaCl-Äquivalent	Trägt zur aw-Senkung bei; antimikrobielle Wirkung
Erdnuss-/Gewürzpaste	Variabel; als Überzug aufgetragen	Lipidbarriere gegen Feuchtwiederaufnahme; Gewürzphenole (antimikrobiell); sensorische Funktion

pH-Wert	Moderat sauer (berichteter Bereich 5,5–6,0)	Weniger stark sauer als Biltong aufgrund des fehlenden Essigs; geringerer pH-Hürdenbeitrag
Wärmebehandlung	Kurzes Grillen oder Blanchieren in manchen Varianten	Bietet Oberflächenpasteurisierung in einigen Zubereitungsstilen; nicht universell

Anerkanntes potenzielles Sicherheitsbedenken: Traditionelle Freiluft-Sonnentrocknung schafft eine kritische Phase intermediärer aw (0,75–0,90), in der sowohl Restwachstum von Pathogenen als auch Rekontamination durch Insekten, Staub und Handhabung auftreten können (aus aw-Grundsätzen und Produktbeschreibungen in der Primärliteratur abgeleitet; nicht durch Ausbruchsuntersuchungsdaten für dieses spezifische Produkt belegt). Die kommerzielle Kilishi-Produktion würde von einer Kammertrocknung mit kontrollierter Temperatur und Luftfeuchtigkeit profitieren, um diese Anfälligkeit zu verringern. Der moderat saure pH-Wert leistet einen geringeren Säurehürden-Beitrag als Biltong, sodass die aw-Senkung durch ausreichende Trocknung die entscheidendere Kontrolle darstellt. [Ref. 27, 28]

3.5 Pastrami (Rind: Heißgeräucherter gepökelter Ganzmuskel)

Pastrami ist ein gepökelt, gewürzt, kalt geräuchertes und anschließend dampfgegartes Rindfleischprodukt, typischerweise aus der Brust. Der mehrstufige Herstellungsprozess schafft ein sequentielles Hürdensystem. [Ref. 4, 22]

Hürde	Zielbereich	Hinweise
Pökellung (NaCl + Nitrit)	2,5–3,5 % NaCl; 120–150 ppm Nitrit	Pökel/Trockenpökel; senkt aw auf ~0,96–0,97; Nitrit für Botulinum-Sicherheit und Farbe
Gewürzrub (Pfeffer, Koriander)	Oberflächenauftrag	Sensorisch; geringer antimikrobieller Beitrag aus phenolischen Verbindungen
Kalträuchern	15–25 °C; Oberflächenauftrag	Oberflächlich antimikrobiell (Phenole, Formaldehyd); Oberflächentrocknung; kein Abtötungsschritt für das Kerninnere
Dampfgearen (F-Hürde)	Kerntemperatur min. 72–74 °C	Pasteurisierung-Abtötungsschritt; 5-log-Reduktion vegetativer Pathogene; Sporen überleben
Kühlung + Vakuum/MAP	0–4 °C; Vakuum oder CO ₂ /N ₂	Post-Gar-Hürde; verhindert Wachstum von L. monocytogenes bei Post-Prozess-Rekontamination

Der Dampfgearschritt verwandelt Pastrami von einem rohen gepökelt Produkt in ein gegartes verzehrfertig (RTE) Erzeugnis. Post-Gar-Kontamination mit L. monocytogenes ist danach das primäre Sicherheitsbedenken, sodass Kühlung und Verpackung die entscheidenden Post-Prozess-Hürden darstellen. [Ref. 22, 23]

3.6 Ganzmuskeln-Schinken: Kasseler, Geformte Schinken (Schwein, Rind, Huhn)

Ganzmuskeln-Schinken umfassen eine breite Produktpalette von traditionellen trockengesalzenen Landschinken bis hin zu injektionsgepökelt gegarten Erzeugnissen. Das Hürdensystem variiert je nach Feuchtigkeitsgehalt und beabsichtigter Haltbarkeit erheblich. [Ref. 4, 22]

Hürde	Zielbereich / Hinweise	Produkttyp
-------	------------------------	------------

NaCl	Injektion: 2–3 % im Produkt; Trockenpökellung: 5–10 %	Alle Typen; höher in Langpökelerzeugnissen
Nitrit/Nitrat	100–150 ppm Nitrit ingoing; Nitrat bei Langpökelsystemen	Botulinum-Sicherheit; Farbe; Geschmack; Antioxidans
Phosphate (Polyphosphate)	0,2–0,5 % im Produkt (regulatorische Grenzwerte)	Erhöhen WHC; reduzieren Tropfverlust; leichte antimikrobielle Synergie mit Salz
Thermische Behandlung (F)	Kerntemperatur 72 °C (pasteurisiert); 121 °C (lagerstabil)	Pasteurisierte Schinken: gekühlt; lagerstabil; Vollsterilisierung, andere Hürdenbelastung
Kühlung (t)	0–5 °C für pasteurisierte Produkte	Wesentliche Hürde für Post-Prozess-Sicherheit in gegarten Produkten mit Restsporen von <i>C. botulinum</i>
Vakuum/MAP-Verpackung	O ₂ < 0,5 %	Verhindert aerobes Wachstum; verlängert Haltbarkeit; verändert Mikrobiologie hin zu anaerober Flora

Geformte Schinken mit Transglutaminase-Bindung: Die Hürdenprinzipien sind identisch mit injektionsgepökelten Schinken. Das Bindungssystem trägt keine Konservierungshürde bei, kann aber die Wasserverteilung innerhalb des Produkts beeinflussen, was geringfügige Auswirkungen auf die aw-Verteilung hat und bei der Haltbarkeitsvalidierung berücksichtigt werden muss. [Ref. 4, 22]

Ganzmuskeln-Schinken von Huhn, Rind und Lamm: Der gleiche Hürdenrahmen gilt. Es ist zu beachten, dass Huhn einen höheren natürlichen pH-Wert aufweist (6,3–6,5) im Vergleich zu Schwein (5,5–5,8), was bedeutet, dass die pH-Hürde ohne Ansäuerung weniger leicht verfügbar ist. Dies verschiebt die Belastung leicht in Richtung Nitrit- und aw-Kontrolle bei Hühnerprodukten.

3.7 Krainer-artige Würste (Russische und Ungarische Wurst: Gegart, Geräuchert)

Russische und ungarische Würste (Russkije Kolbasy, Magyar Kolbász), Krainer (slowenisch/österreichischer Stil) und ihre südafrikanischen kommerziellen Entsprechungen sind gegarte, geräucherte, emulgierte Würste. Sie sind als RTE-Produkte (verzehrfertig) ab Werk erhältlich und stützen sich auf ihr Hürdensystem für die Haltbarkeit und nicht auf weiteres Garen durch den Verbraucher. [Ref. 4, 22]

Hürde	Zielbereich	Hinweise
NaCl	1,5–2,5 % in der Formulierung	aw-Beitrag; Geschmack; bindet freies Wasser in der Emulsion
Nitrit	80–150 ppm ingoing	Farbe (Nitrosomyochrom); Geschmack (Pökel); Botulinum-Sicherheit in Vakuumverpackung
Heißräuchern	Kern 70–75 °C; Rauch bis Kerntemperatur oder Oberfläche	Abtötungsschritt (bei ausreichender Kerntemperatur); oberflächlich antimikrobiell; Farbe; Geschmack
Wasseraktivität	aw 0,94–0,97 typisch	Allein nicht ausreichend für Umgebungsstabilität; kombiniert mit anderen Hürden für Kühl-Haltbarkeit
Kühlung (t)	0–7 °C	Wesentliche Post-Räucher-Hürde; verhindert <i>L. monocytogenes</i> -Wachstum in Vakuumverpackung
Vakuum / MAP-Verpackung	Vakuum oder CO ₂ /N ₂	Aerobe Verderbnisverhinderung; Haltbarkeitsverlängerung; anaerobes Milieu verschiebt Bedenken auf Botulinum
pH-Wert	5,8–6,4 (typisch für gegarte Emulsionen)	Weniger sauer als fermentierte Produkte; pH-Hürde schwächer; nur unterstützende Rolle

Haltbarkeitsrealität: Typische vakuumverpackte gegarte Räucherwürste erreichen 21–42 Tage Kühlhaltbarkeit. Eine Verlängerung über 42 Tage ohne Rezepturanpassung oder zusätzliche Hürden (HPP, Bakteriozin-Tauchbad, MAP-Optimierung) ergibt typischerweise inakzeptablen Verderb durch gasbildende Organismen oder Säuerung.

3.8 Wiener Würstchen / Frankfurter (Rind, Schwein, Huhn)

Wiener Würstchen und Frankfurter sind fein emulgierte, gegarte Würste mit einem sehr ähnlichen Hürdenprofil wie Krainer-Würste, jedoch typischerweise mit feinerer Emulgierung, höherem Feuchtigkeitsgehalt und oft dünneren Hüllen mit geringerer Barrierewirkung. [Ref. 4, 22]

Das Hürdensystem ist im Wesentlichen identisch mit Abschnitt 3.7 mit folgenden Unterschieden: Geringere Salzgehalte sind typisch (1,5–2,0 %), die aw ist typischerweise höher (0,95–0,97), die Feinemulsion verteilt Salz und Nitrit gleichmäßiger in der gesamten Matrix (vorteilhaft für die Hürdenwirksamkeit), und das Hot-Dog-Format ohne starke Trocknung bedeutet, dass die aw-Senkung minimal ist. Die Kühlungs- und Nitrithürden sind daher relativ bedeutsamer, und die post-prozessuale *L. monocytogenes*-Kontrolle durch Kühlung und Verpackungsintegrität ist entscheidend. Hühner-Wiener zeigen denselben pH-Nachteil wie in Abschnitt 3.6 beschrieben.

3.9 Luncheon-Fleisch (Gegarte Formerzeugnisse: Alle Arten)

Luncheon-Fleisch umfasst SPAM-artige Dosenprodukte und aufgeschnittene Deli-artige gegarte Formerzeugnisse. Die Hürdensysteme unterscheiden sich zwischen lagerstabilen Dosen- und gekühlten Aufschnittsprodukten. [Ref. 4, 22]

Hürde	Konserve (lagerstabil)	Gekühlt aufgeschnitten
NaCl	2,0–3,0 %	1,5–2,5 %
Nitrit	50–100 ppm	100–150 ppm ingoing; nimmt während der Haltbarkeit ab
Thermisch (F)	104 °C / 121 °C je nach pH und aw	72–80 °C Kern (nur pasteurisiert)
pH-Wert	6,0–6,4 typisch	6,0–6,4 typisch
aw	0,95–0,97	0,96–0,98 (hohe Feuchtigkeit primär durch T und Verpackung konserviert)
Kühlung	Nicht erforderlich (lagerstabile Dose)	0–5 °C unbedingt erforderlich; produktdefinierende Hürde
Verpackung	Hermetisch versiegelte Dose (Eh-Kontrolle)	Vakuum oder MAP (CO ₂ /N ₂)

Dosenluncheon-Fleisch stützt sich auf F₀ (Sterilisierungsäquivalent) zur Elimination von *Cl. botulinum*-Sporen; die hohe aw (0,96–0,97) und der nahezu neutrale pH-Wert bedeuten, dass bei Kompromittierung der hermetischen Versiegelung oder unzureichendem F-Wert ein Botulismusrisiko besteht. pH 6,0–6,4 liegt über dem *Cl. botulinum*-Hemmschwellenwert von ~4,6; thermische Sterilisierung ist daher zwingend erforderlich. [Ref. 4, 22]

3.10 Frischfleisch ohne MAP (Alle Arten)

Frischfleisch ohne Schutzatmosphärenverpackung stützt sich auf ein minimales, aber kritisches Hürdenset. Das Konservierungsziel ist nicht Lagerstabilität, sondern die Minimierung von Verderb und Sicherheitsrisiken während einer kurzen gekühlten Haltbarkeit. [Ref. 4, 22]

Aktive Hürden: Temperatur (Kühlung auf 0–4 °C), aw ~0,99 (keine Senkung möglich), pH 5,5–6,4 (arten- und muskelabhängig), gute Herstellungspraxis (niedrige Ausgangskeimzahl). Die Kühlkette ist im Wesentlichen die einzige bedeutende aktive Hürde. Ohne MAP haben aerobe Verderbnisorganismen unbeschränkten Zugang zu Sauerstoff und können ungehindert wachsen. Erwartete Haltbarkeit: 3–7 Tage für den Einzelhandel, abhängig von anfänglichem Kontaminationsgrad, Temperaturmanagement und Hygiene.

Artenhinweis: Dunkelschnittiges Rindfleisch (DFD, pH > 6,0) hat aufgrund des höheren pH-Werts eine deutlich kürzere Haltbarkeit: Die pH-Hürde fehlt im Wesentlichen, und selbst moderate Mengen von Verderbnisbakterien können schnell wachsen. Bleiches, weiches, exsudatives (PSE) Schweinefleisch hat einen niedrigeren pH-Wert (~5,2), was die Haltbarkeit leicht verbessert, aber Tropfsaft erzeugt, der das Oberflächenbakterienwachstum unterstützen kann.

3.11 Frischfleisch mit MAP

Die Schutzatmosphärenverpackung (MAP) führt die Gaszusammensetzung als zusätzliche Hürde ein. Standard-MAP für Frischfleisch im Einzelhandel verwendet sauerstoffhaltige Formulierungen (typischerweise 70–80 % O₂ / 20–30 % CO₂), um eine leuchtend rote Oxymyoglobinfarbe zu erhalten und gleichzeitig CO₂ als antimikrobielles Mittel einzusetzen. [Ref. 22, 29]

Gasmischung	Anwendung	Wirkung
70–80 % O ₂ / 20–30 % CO ₂	Einzelhandel Frischfleisch (Rind, Lamm, Schwein)	Leuchtende Farbe (Bloom); CO ₂ unterdrückt aeroben Verderb; Haltbarkeit 8–14 Tage vs. 3–5 Tage in Luft
0 % O ₂ / 30 % CO ₂ / 70 % N ₂	Einzelhandel Geflügel und Schwein (farbstabil)	Anaerob; CO ₂ unterdrückt Verderb; kein Farbbenefit bei myoglobinreichem Muskel; Haltbarkeitsverlängerung
100 % CO ₂	Einige Großlageranwendungen	Stark bakteriostatisch; Geschmackswirkung bei hoher Konzentration; löst sich in Feuchtigkeit zu Kohlensäure
N ₂ allein (nahezu anaerob)	Einige Anwendungen	Inert; verhindert Oxidation; weniger bakteriostatisch als CO ₂ ; manchmal bei gepökelten Produkten im Display verwendet

CO₂-Mechanismus: Kohlendioxid löst sich in der wässrigen Phase des Fleisches zu Kohlensäure (H₂CO₃) auf, was den Oberflächen-pH senkt. In gelöster Form durchdringt CO₂ Bakterienzellmembranen, stört Carboxylierungsreaktionen und senkt den intrazellulären pH-Wert. Dies ist eine echte chemische Hürde, die synergistisch mit der Kühlung wirkt. [Ref. 29]

3.12 Vakuumverpacktes und Skin-verpacktes Fleisch

Vakuumverpackung (VP) und Skin-Verpackung (SP) erzielen im Wesentlichen denselben mikrobiellen Effekt durch unterschiedliche physikalische Mittel. Beide

eliminieren Sauerstoff und schaffen ein anaerobes Milieu, das gegen aerobe Verderbnisflora selektiert. [Ref. 22, 29]

Hürdensystem: Temperatur (0–4 °C) + niedriges Eh (Sauerstoffentzug) + aw (produktspezifisch) + pH (produktspezifisch). In Abwesenheit von Sauerstoff verschiebt sich die dominante Verderbnisflora von aeroben Pseudomonas und Enterobacteriaceae hin zu Milchsäurebakterien (LAB) und potenziell zu anaeroben Pathogenen einschließlich *Cl. botulinum*.

Skin-Verpackung bietet den zusätzlichen Vorteil, dass die Folie eng an der Produktoberfläche anliegt, den Kopfraum und die Möglichkeit der Tropfsaftansammlung reduziert, die das Verderbnisbakterienwachstum an der Fleisch-Folien-Grenzfläche unterstützen kann. Haltbarkeitsverbesserungen gegenüber Standard-VP von 50–100 % wurden in Studien berichtet, in denen Restsauerstoff und Tropfsaftansammlung die begrenzenden Variablen sind, obwohl die tatsächliche Verlängerung von Produkttyp, Temperatur und anfänglicher Keimbelastung abhängt. [Ref. 29]

Das Sicherheitsbedenken bei allen vakuum-/skin-verpackten Systemen: Wenn die Kühlkette versagt und Produkte nicht-nitritkontrollierte Sporenpopulationen enthalten, unterdrückt das anaerobe Milieu, das aeroben Verderb hemmt, auch die visuellen und olfaktorischen Verderbnissignale, die sonst einen Verbraucher oder Einzelhändler warnen würden. Ein temperaturmisshandeltes, nitritfreies oder unterschrittenes vakuumverpacktes Produkt kann keine sichtbaren oder sensorischen Verderbnisanzeichen zeigen, während *Cl. botulinum*-Auskeimung und Toxinproduktion unter Temperaturbedingungen auftreten könnten – ein Risiko, das das primäre wissenschaftliche Argument für die Beibehaltung von Nitrit in Produkten für Vakuumverpackung unter nicht-sterilisierenden Bedingungen darstellt. Dieses Risiko ist produkt- und temperaturprofilabhängig und sollte ohne produktspezifische Gefährdungsanalyse nicht verallgemeinert werden. [Ref. 4, 22]

ABSCHNITT 4: HOCHDRUCKVERARBEITUNG (HPP) ALS HÜRDE

4.1 Die Wissenschaft der HPP

Die Hochdruckverarbeitung (HPP), auch als Hochhydrostatischer Druck (HHP) oder Ultrahochdruckbehandlung (UHP) bezeichnet, setzt Lebensmittel – versiegelt in ihrer Endverpackung – isostatischen Drücken von typischerweise 300–600 MPa (3.000–6.000 Atmosphären) bei Umgebungs- oder Kühltemperaturen für Haltezeiten von 2–5 Minuten aus. Dies sind typische berichtete Bereiche aus veröffentlichten Studien und kommerzieller Praxis; es handelt sich nicht um universelle Leitlinien; wirksame Parameter sind produktspezifisch und müssen je Produktmatrix, Zielorganismus und beabsichtigtem Ergebnis validiert werden. Das Verfahren ist in dem Sinne nicht-thermisch, dass es nicht auf Wärme als primären Inaktivierungsmechanismus angewiesen ist. [Ref. 30, 31]

Der antimikrobielle Mechanismus der HPP wirkt durch druckinduzierte Störung nicht-kovalenter molekularer Strukturen. Bei 300–600 MPa werden Zellmembranen beeinträchtigt: Die Phospholipid-Doppelschicht wechselt von einer flüssigen in eine Gelphase, was die Membranproteinfunktion stört und die Permeabilität erhöht. Intrazelluläre Proteine denaturieren oder aggregieren. Wichtige zelluläre Maschinerie (Ribosomen, ATPasen, Schlüsselenzyme) verlieren ihre Funktion. Das Ergebnis ist die Inaktivierung vegetativer Bakterienzellen, Hefen und Schimmelpilze. [Ref. 30]

Kritische Einschränkung: Bakterielle Endosporen werden durch Druck allein bei den in der Lebensmittelverarbeitung eingesetzten Drücken und Temperaturen nicht zuverlässig inaktiviert. *Cl. botulinum*-Sporen erfordern insbesondere Druck in Kombination mit erhöhter Temperatur (>90 °C und >600 MPa, „druckunterstützte thermische Sterilisierung“, PATS), um ein sterilisierungsäquivalentes Abtöten zu erreichen. Aus diesem Grund müssen HPP-behandelte Kühlprodukte unter Kühlung verbleiben; HPP ist unter normalen Betriebsbedingungen eine Pasteurisierungsäquivalent-Technologie, keine Sterilisierungstechnologie. [Ref. 30, 31]

4.2 HPP-Anwendungen in der Fleischverarbeitung

Die primäre kommerzielle Anwendung von HPP in der Fleischindustrie ist die Post-Prozess-Dekontamination von gegarten verzehrsfertig (RTE) Fleischerzeugnissen, insbesondere aufgeschnittener Aufschnittware und gegarter Würste, zur Kontrolle von *L. monocytogenes*, das Produkte nach dem Garen während des Aufschneidens und Verpackens kontaminieren kann. [Ref. 31, 32]

HPP bei 600 MPa, Ausgangstemperatur <10 °C, für 2–3 Minuten hat in veröffentlichten Challengestudien eine 5-log-Reduktion von *L. monocytogenes* in gegarten Fleischmatrizes erzielt, obwohl die Wirksamkeit matrixabhängig ist (beeinflusst durch Fettgehalt, Salz, aw, Temperatur, Stamm und Verpackung) und nicht ohne produktspezifische Validierung auf andere Produkttypen übertragen werden kann. [Ref. 23, 30] Der regulatorische USDA FSIS-Rahmen für *L.*

monocytogenes-Kontrolle in RTE-Fleisch- und Geflügelerzeugnissen ist in der Abschlussregel von 2003 (68 FR 34208, Juni 2003) festgelegt, die Post-Lethalitätsbehandlungen und antimikrobielle Mittel als anerkannte Kontrollinterventionen identifiziert. HPP wurde in FSIS-Leitlinien als akzeptable Post-Lethalitätsbehandlung in diesem Rahmen aufgenommen. [Ref. 32]

Weitere Fleischanwendungen:

- Aufgeschnittene gepökelte Fleischwaren (Schinken, Pastrami, Salami): Verlängerung der Kühlhaltbarkeit durch kombinierte HPP + MAP + Kühlung; Haltbarkeitsverlängerungen von 50–100 % wurden in veröffentlichten Studien unter kontrollierten Bedingungen berichtet, obwohl tatsächliche Ergebnisse produkt- und prozessspezifisch sind.
- Mariniertes Frischfleisch: HPP kann die Oberflächenkeimbelastung auf marinierten Produkten für den Einzelhandel reduzieren, ohne in den meisten Formulierungen Farbe oder Textur zu beeinträchtigen.
- Fermentierte Würste: Post-Fermentations-HPP kann Resten von STEC und anderen Pathogenen reduzieren, ohne das etablierte Geschmacksprofil des fermentierten Produkts zu beeinträchtigen.

4.3 HPP-Kosten-Nutzen-Analyse gegenüber traditionellen Konservierungsmitteln

Dies ist die praktisch wichtigste Frage für die meisten Fleischverarbeiter, die HPP in Betracht ziehen. Die Analyse muss Investitionskosten, Betriebskosten, Durchsatzbeschränkungen und den erzielten Konservierungsnutzen berücksichtigen. Das Folgende stellt eine Synthese veröffentlichter Schätzungen dar. [Ref. 34]

Parameter	HPP	Traditionell (Nitrit + Salz + Kühlung)	Hinweise
Investitionskosten	USD 0,77–3,15 Mio. pro Anlage (55–420-L-Behälter)	Minimal für Ausrüstung; Kühlketteninvestition erforderlich	Kostenbereich je Sampedro et al. (2014); genaue Zahlen variieren je nach Anbieter, Behältergröße und Hilfsausrüstung. [Ref. 34]
Betriebskosten pro kg	USD 0,05–0,20/kg geschätzter Bereich	USD 0,005–0,015/kg (Konservierungsmittelkosten)	HPP-Gesamtkosten 7× höher als konventionelle thermische Verarbeitung laut veröffentlichten Vergleichen
Erzielte Log-Reduktion	5-log vegetative Bakterien bei 600 MPa / 3 Min.	Variabel je System; 5-log mit validiertem Wärmeschritt	HPP kann keine Sporen abtöten; traditionelle Systeme können Sterilisierung einschließen
Sporeninaktivierung	Unter Standardbedingungen nicht erreicht	Bei 121 °C+ (Retorte) erreicht	Grundlegende HPP-Einschränkung für lagerstabile Dosenprodukte
Qualitätseigenschaften	Erhält Farbe, Textur, Geschmack; minimale Auswirkungen	Wärmebehandlung kann Textur, Farbe bei manchen Produkten reduzieren	Primäre kommerzielle Rechtfertigung von HPP bei Premium-RTE-Fleischwaren
Listeria-Kontrolle (RTE)	5-log validiert in veröffentlichten Studien (matrixabhängig; produktspezifische	Erfordert validierten Garschritt + Kühlkettenmanagement	HPP unter FSIS-Abschlussregel 2003 als Post-Lethalitätsbehandlung

	Validierung erforderlich)		für Listeria-Kontrolle akzeptiert
Regulatorische Klarheit	Unter FSIS-Abschlussregel 2003 akzeptiert (USA); EU-Regulierungsstatus: aktuelle EFSA-Leitlinien prüfen	Langjährig etablierter globaler Regulierungsrahmen	Aktuelle FSIS- und EFSA-Leitlinien für jurisdiktionsspezifische Anforderungen konsultieren
Lohnverarbeitung	Verfügbar über Dienstleister	Nicht anwendbar	Senkt die Einstiegshürde für mittelgroße Verarbeiter

Schlussfolgerungen zur HPP-Wirtschaftlichkeit:

- HPP ist eine legitime und validierte Hürde für die Post-Prozess-Pathogenkontrolle in gegarten RTE-Fleischerzeugnissen, insbesondere für *L. monocytogenes*, wo es in FSIS-Leitlinien unter der Abschlussregel 2003 aufgenommen wurde. Eine produktspezifische Challengestudie-Validierung bleibt zwingend erforderlich.
- Bei veröffentlichten Investitionskosten von USD 0,77–3,15 Mio. pro Behälter und Betriebskosten von etwa 7× höher als konventionelle thermische Verarbeitung (Sampedro et al. 2014) ist HPP wirtschaftlich nur in Premium-Produktsegmenten, hochwertigen Exportmärkten oder dort rentabel, wo regulatorische Nicht-Compliance-Kosten (Rückrufe, rechtliche Haftung) die Investition rational machen. [Ref. 34]
- HPP ist KEIN vollständiges Konservierungssystem für frische oder rohe Fleischerzeugnisse. Es muss mit Kühlung als wesentlicher unterstützender Hürde kombiniert werden, da es keine Sporen inaktiviert.
- Für mittelständische und kleine afrikanische Fleischverarbeiter ist die Investitionskostenbarriere prohibitiv. Lohnverarbeitungsdienstleistungen (Produktversand an einen Drittanbieter-HPP-Betrieb) bieten einen Zugang ohne Investitionskosten, typischerweise zu niedrigeren Kosten als der Eigenbetrieb.
- HPPs Wert im Kontext von Clean-Label-Fleischerzeugnissen (reduziertes Nitrit, reduziertes Salz) wächst als kompensierende Hürde, wenn traditionelle Konservierungsmittelspiegel gesenkt werden. Dies könnte die primäre wirtschaftliche Rechtfertigung für HPP-Adoption in Premium-Deli-Märkten werden. [Ref. 30, 34]

ABSCHNITT 5: WAS SEIT LEISTNER GELERNT WURDE

Leistners grundlegende Arbeit war bis Mitte der 2000er Jahre im Wesentlichen abgeschlossen. Die seither vergangenen zwei Jahrzehnte haben seinen Rahmen nicht umgestoßen; sie haben ihn vertieft, quantifiziert und erweitert. Das Folgende fasst die bedeutendsten Entwicklungen für praktizierende Fleischwissenschaftler zusammen.

5.1 Quantitative Prädiktive Mikrobiologie

Die Integration der Hürdentechnologie mit der prädiktiven Mikrobiologie – mathematische Modelle, die mikrobielles Wachstum, Überleben und Inaktivierung als Funktion der Hürdenparameter vorhersagen – war die praktisch transformativste Entwicklung seit Leistners Ära. Werkzeuge wie ComBase (eine gemeinsame USDA/AFNS-Datenbank), das USDA Pathogen Modeling Program (PMP) und der FDA Food Spoilage and Safety Predictor ermöglichen es Produktentwicklern nun, das erwartete mikrobielle Verhalten in spezifischen Hürdensystemen zu modellieren, bevor vollständige Challengestudien durchgeführt werden. [Ref. 35, 36]

Dies beseitigt nicht die Notwendigkeit von Challengestudien – alle quantitativen Risikobewertungen erfordern letztlich eine experimentelle Validierung –, reduziert aber den experimentellen Aufwand erheblich und ermöglicht es, die Produktentwicklung in frühen Phasen durch mikrobiologisch fundierte Parameterauswahl zu leiten. Die Wachstum/Kein-Wachstum-Grenzflächenmodellierung, wegweisend von Gruppen einschließlich Ratkowsky, Ross und Zwietering, liefert probabilistische Vorhersagen, ob eine gegebene Kombination von Hürdenparametern das Wachstum von Zielorganismen unterstützen oder hemmen wird. [Ref. 36]

5.2 Die Gamma-Hypothese und Synergiequantifizierung

Gorris und Kollegen entwickelten die „Gamma-Hypothese“ (auch Gamma-Konzept genannt), die vorschlägt, dass hemmende Umgebungsfaktoren die maximale spezifische Wachstumsrate von Mikroorganismen auf multiplikative (statt einfach additive) Weise reduzieren. Dies liefert einen mathematischen Rahmen zur Vorhersage der kombinierten Wirkung mehrerer Hürden. [Ref. 12]

Praktisch ausgedrückt: Wenn a_w bei 0,96 die maximale Wachstumsrate von *Listeria* auf 60 % ihres Optimums reduziert und pH 5,3 sie auf 50 % des Optimums reduziert, sagt die Gamma-Hypothese den kombinierten Effekt als $60\% \times 50\% = 30\%$ des Optimums voraus – eine stärkere hemmende Wirkung als jede Hürde allein. Die experimentelle Validierung hat dieses multiplikative Modell für Kombinationen von a_w und pH über eine Reihe von Organismen hinweg bestätigt, obwohl Abweichungen auftreten, wenn Hürden denselben zellulären Mechanismus ansprechen. [Ref. 12]

5.3 Biokonservierung: Milchsäurebakterien als gezielte Hürde

Der gezielte Einsatz ausgewählter Milchsäurebakterienkulturen als Biokonservierende Hürden hat sich seit den späten 1990er Jahren vom Forschungskonzept zur industriellen Praxis entwickelt. Schutzkulturen, die gegarten und rohen Fleischerzeugnissen zugesetzt werden, konkurrieren mit Verderbs- und pathogenen Organismen durch: Milchsäureproduktion (pH-Hürde), Bakteriozinproduktion (Nisin, Pediocin, Sakacin, direkte antimikrobielle Peptide), Wasserstoffperoxidproduktion und Konkurrenzausschluss. [Ref. 9, 13]

Kommerzielle Schutzkulturen für Fleischerzeugnisse sind nun von führenden Starterkulturenlieferanten erhältlich und werden in gegarten Delikatessenfleischwaren, Frischbratwürsten und fermentierten Produkten eingesetzt. Der Beitrag von LAB als gezielte Hürde wird zunehmend in formale Haltbarkeits- und Sicherheitsvalidierungen einbezogen. Dies erweitert Leistners Konzept der Konkurrenzflora-Hürde von der natürlichen Fermentation zur konstruierten Biokonservierung.

5.4 Natürliche Antimikrobielle

Die wachsende Verbrauchernachfrage nach „Clean-Label“-Produkten ohne synthetische Konservierungsmittel hat erhebliche Forschung zu natürlichen Antimikrobiellen als Ersatz- oder Ergänzungshürden angetrieben. Ätherische Öle und ihre Bestandteile (Thymol, Carvacrol, Eugenol, Zimtaldehyd), organische Säuren (Milch-, Essig-, Zitronensäure), pflanzliche Polyphenole, Lactoferrin und Lysozym wurden alle intensiv untersucht. [Ref. 9, 37]

Die ehrliche Einschätzung: Natürliche Antimikrobielle sind im Allgemeinen weniger wirksam und weniger zuverlässig als synthetische Äquivalente bei den sensorisch akzeptablen Konzentrationen. Sie wirken am besten als zusätzliche Hürden in bereits gut gestalteten Systemen, nicht als direkter Ersatz für Nitrit oder hohe Salzgehalte in Produkten, bei denen diese kritische Sicherheitsrollen spielen. Die vielversprechendsten Anwendungen sind Oberflächendekontaminationsbäder, Hüllenbehandlungen und die Einarbeitung in Verpackungsmaterialien zur kontrollierten Freisetzung.

5.5 Implikationen der antimikrobiellen Resistenz

Das Aufkommen antimikrobieller Resistenz bei lebensmittelbedingten Pathogenen, insbesondere bei Salmonella, Listeria und Campylobacter, hat der Hürdensystemgestaltung eine neue Dimension hinzugefügt. Subletaler Stress durch Lebensmittelkonservierungshürden kann grundsätzlich stresstolerante Stämme selektieren, und Kreuztoleranz zwischen Säurestressresistenz und Antibiotikaresistenz wurde dokumentiert. [Ref. 35, 37]

Dies invalidiert die Hürdentechnologie nicht. Wirksame Hürdensysteme sind darauf ausgelegt, Pathogenwachstum zu verhindern und Inaktivierung sicherzustellen, nicht lediglich subletalen Stress zu verursachen. Systeme, die das Pathogenwachstum an mehreren Zielen robust hemmen, reduzieren die für adaptive Reaktionen und Resistenzwahl verfügbare Zeit. Die Lehre ist, dass Hürdensysteme validiert werden müssen, um echte Hemmung und Abtötung zu erreichen, nicht nur Wachstumsreduktion.

5.6 Intelligente Verpackung als aktive Hürde

Die jüngste Entwicklung mit direkter Relevanz für die Fleischkonservierung ist das Aufkommen aktiver und intelligenter Verpackung als echte Hürdenträger. Antimikrobielle Verpackungsfolien mit Nisin, ätherischen Ölen, organischen Säuren oder Silbernanopartikeln bieten eine Dauerfreisetzungshürde an der Produktoberfläche – genau dort, wo Post-Prozess-Kontamination konzentriert ist und wo Wachstum beginnt. Sauerstoffabsorber senken Eh unter den Schwellenwert für aeroben Verderb. CO₂-Emitter erhalten eine bakteriostatische Atmosphäre innerhalb der Verpackung. [Ref. 37, 38]

Diese Technologien sind im Jahr 2025 kommerziell verfügbar, wenn auch nicht universell eingesetzt. Ihre Kosteneffektivität hängt vom Produktwert und den Haltbarkeitszielen ab. [Ref. 37, 38]

ABSCHNITT 6: DIE ZUKUNFT: KONSERVIERUNGSWISSENSCHAFT IM JAHR 2075

Eine Projektion fünfzig Jahre in die Zukunft ist von Natur aus spekulativ. Was folgt, gründet auf aktuellen Forschungstrends und technologischer Machbarkeit, nicht auf Extrapolation über das hinaus, was die Evidenz stützt.

6.1 KI-gestaltete Hürdensysteme

Die Integration von künstlicher Intelligenz mit prädiktiver Mikrobiologie ist in Forschungskontexten bereits im Gange. Innerhalb der nächsten zwei Jahrzehnte werden Produktentwickler wahrscheinlich Zugang zu KI-gestützten Systemen haben, die bei einem Zielproduktprofil (aw-Bereich, pH-Ziel, beabsichtigte Haltbarkeit, Gefährdungsorganismus, Regulierungsjurisdiktion, Verpackungsformat) eine optimierte Hürdelkombination basierend auf validierten Prognosemodellen und Challengestudie-Datenbanken generieren. [Ref. 39, 40]

Dies wird mikrobiologisches Fachwissen nicht ersetzen; validierte Challengestudien werden weiterhin erforderlich sein, aber es wird den Entwicklungszyklus von Monaten auf Wochen komprimieren und den experimentellen Aufwand erheblich reduzieren. Bis 2075 könnte KI-gestützte Hürdengestaltung als Standardwerkzeug für jedes Fleischproduktentwicklungslabor in Qualitätsmanagementsoftware eingebettet sein.

6.2 Biologische Hürden: Bakteriophagen und maßgeschneiderte antimikrobielle Peptide

Die aktuelle Ära erlebt die ersten kommerziellen Anwendungen der Phagenbiokontrollen in Lebensmittelsystemen, primär bei Frischerzeugnissen. Gezielte Bakteriophagen (Viren, die spezifische bakterielle Wirte infizieren) bieten das Potenzial für hochspezifische, rückstandsfreie biologische Hürden, die Zielpathogene abtöten, ohne kommensale oder Konkurrenzflora, Schutzkulturen oder das humane Darmmikrobiom zu beeinflussen. [Ref. 41]

Antimikrobielle Peptide (AMPs), durch KI-gesteuertes Moleküldesign entwickelt, stellen die nächste Generation präziser biologischer Hürden dar. Anders als Breitspektrum-Konservierungsmittel können AMPs so konzipiert werden, dass sie auf spezifische Zellmembranstrukturen spezifischer Pathogene abzielen. In 2025 veröffentlichte Forschungen deuten darauf hin, dass KI-gesteuerte AMP-Entdeckung die Identifizierung von Kandidatensequenzen drastisch beschleunigt hat. Die regulatorische Akzeptanz für direkte Lebensmittelanwendung bleibt ein Hindernis; dies ist ein 20–30-jähriger Horizont für den Mainstream-Einsatz. [Ref. 41, 42]

6.3 Personalisierte Konservierung und Verbraucherdaten

Da Sequenzierungstechnologie und IoT-Geräte die Echtzeitverfolgung von Lebensmittellieferkettenbedingungen ermöglichen, könnten zukünftige Konservierungssysteme dynamisch werden – Hürdenparameter basierend auf

Echtzeitdaten zu Produkthistorie, Kühlkettenintegrität und sogar Verbraucherkühlschranktemperaturen anpassen. Intelligente Verpackung, die „weiß“, dass sie Temperaturmisshandlung ausgesetzt war, und dies einem Scangerät am Verbrauchspunkt signalisiert, ist technologisch im Prinzip machbar; ob eine kommerzielle Einführung im Lebensmittelindustriemaßstab innerhalb von 10–15 Jahren erfolgt, ist eine Prognose, die von regulatorischen Wegen, Kostensenkung und Infrastrukturakzeptanz abhängt – kein bestätigter Zeitplan. [Ref. 40]

6.4 Clean-Label-Druck und Nitritreduktion

Der anhaltende Verbraucher- und Regulierungsdruck in Richtung reduzierter Nitritverwendung in gepökelten Fleischerzeugnissen wird die Hürdensysteminnovation weiter antreiben. Die Evidenzbasis für nitritfreie Botulinum-Sicherheitssysteme in vakuumverpackten gegarten Produkten ist zum Zeitpunkt der Niederschrift (2026) weiterhin unzureichend. Dies stellt eine echte Sicherheitsherausforderung dar, die die Industrie mit validierter Wissenschaft statt Marketingnarrationen angehen muss. Bis 2075 wird die Lösung wahrscheinlich eine Kombination aus HPP, gezielter Biokonservierung, natürlichen Antimikrobiellen und modifizierter Verpackung umfassen – aber jedes Element dieser Kombination muss auf dem Sicherheitsstandard validiert werden, den Nitrit derzeit erfüllt. [Ref. 22, 31]

6.5 Systembiologie des mikrobiellen Stresses

Die „Black Box“, wie Mikroorganismen auf kombinierte Hürden reagieren, wird durch systembiologische Ansätze geöffnet: Transkriptomik, Proteomik und Metabolomik, angewendet auf bakterielle Stressreaktionen. Innerhalb des nächsten Jahrzehnts werden detaillierte molekulare Karten davon, wie spezifische Organismen auf spezifische Hürdelkombinationen reagieren, verfügbar sein. Dies wird echtes mechanistisches Hürdendesign ermöglichen – Kombinationen auswählen, die gleichzeitig spezifische, nicht-redundante zelluläre Signalwege angreifen – und wird die mechanistische Grundlage für das Multitarget-Konservierungskonzept liefern, das Leistner befürwortete, aber mit den ihm zur Verfügung stehenden Mitteln nicht experimentell validieren konnte. [Ref. 9, 42]

SCHLUSSFOLGERUNG

Das Hürdenkonzept ist keine jüngere Innovation. Es ist die wissenschaftliche Systematisierung einer Praxis, die die Menschheit seit dem ersten gesalzenen, geräucherten, fermentierten Fleisch, das für den Winter eingelagert wurde, angewendet hat. Was Lothar Leistner und seine Kollegen beitrugen, war der intellektuelle Rahmen, der es ermöglicht, diese Praxis bewusst, überprüfbar und optimal statt empirisch und unsicher zu gestalten.

Die Kette intellektueller Beiträge, die diesen Rahmen hervorbrachte, ist klar. William James Scotts Veröffentlichungen von 1953 und 1957 begründeten, dass die Wasseraktivität und nicht der Wassergehalt das mikrobielle Wachstum in Lebensmitteln regelt, und demonstrierten mit experimenteller Strenge, dass die thermodynamische Verfügbarkeit von Wasser (seine Fugazität relativ zu reinem Wasser) der Parameter ist, der bestimmt, ob Mikroorganismen auf das Wasser zugreifen können, das sie zum Überleben benötigen. M. Loncin erkannte 1976, dass die Kombination milder Konservierungsfaktoren extreme Einzelfaktor-Behandlungen ersetzen kann. Leistner benannte die Hürden, zeichnete das Diagramm und verbrachte dreißig Jahre damit, ihre Anwendung in den Fleischprodukten und Lebensmittelsystemen der Welt zu dokumentieren, kulminierend im Multitarget-Konzept. Gorris und Gould erklärten, warum die Kombinationen funktionieren, indem sie untersuchten, was die Hürden tatsächlich in Mikrobenzellen bewirken. Die Wissenschaft, die sie gemeinsam aufgebaut haben, ist eine der wirklich robusten Errungenschaften der Lebensmittelmikrobiologie des zwanzigsten Jahrhunderts.

Für den praktizierenden Fleischwissenschaftler sind die Kernlehren: aw spezifizieren, nicht den Feuchtigkeitsgehalt; für mehrere gleichzeitige Hürdenziele gestalten; die Gefährdungsorganismen kennen; mit Challengestudien validieren; quantitative Prognosemodelle als Entwicklungswerkzeug verwenden, aber niemals als Ersatz für experimentelle Bestätigung; und die Kühlkette als nicht verhandelbare Hürde behandeln, die alles andere ermöglicht. Bei hydrokolloidhaltenden Formulierungen daran erinnern, dass Wasserbindung keine aw-Senkung ist: Die beiden Konzepte sind thermodynamisch verschieden, und die Verwechslung kann zu unsicheren Produkten führen. Leistners Hürdendiagramme, an den Wänden der Bundesanstalt für Fleischforschung in Kulmbach gezeichnet, bleiben das praktisch nützlichste visuelle Werkzeug in der Lebensmittelkonservierungswissenschaft.

Die Wissenschaft entwickelt sich weiter. HPP, Biokonservierung, aktive Verpackung und KI-gestützte Gestaltung sind keine Ersätze für klassisches Hürdendenken; sie sind Erweiterungen davon. Der Rahmen ist im Jahr 2026 ebenso solide wie 1985. Seine Anwendung erfordert jedoch eine fortlaufende Anpassung an neue Organismen, neue Produktkategorien, neue Verbrauchererwartungen und neue regulatorische Umgebungen – genau die Art intelligenter, evidenzbasierter Arbeit, die Lothar Leistner während seiner gesamten Karriere als Vorbild diente.

LITERATURVERZEICHNIS

Die folgenden Referenzen werden in diesem Dokument zitiert. Primärquellen wurden bevorzugt. Wo Sekundärquellen Primärarbeiten zitieren, die nicht direkt gesichtet werden konnten, ist dies im Text vermerkt.

- [1] Scott, W.J. (1953). Water relations of *Staphylococcus aureus* at 30°C. *Australian Journal of Biological Sciences*, 6, 549–564.
- [2] Scott, W.J. (1957). Water relations of food spoilage microorganisms. *Advances in Food Research*, 7, 83–127.
- [3] Leistner, L. und Rödel, W. (1976). In: Davies, R., Birch, G.G. und Parker, K.J. (Hrsg.), *Intermediate Moisture Foods*. Applied Science Publishers, London, S. 120. [Erste dokumentierte Verwendung von „Hürden“ in diesem Kontext.]
- [4] Leistner, L. und Gould, G.W. (2002). *Hurdle Technologies: Combination Treatments for Food Stability, Safety and Quality*. Food Engineering Series. Springer US. ISBN 978-0-306-47263-3.
- [5] Leistner, L. (1985). Hurdle technology applied to meat products of the shelf stable product and intermediate moisture food types. In: Simatos, D. und Multon, J.L. (Hrsg.), *Properties of Water in Foods in Relation to Quality and Stability*. NATO ASI Series, Bd. 90. Springer, Dordrecht, S. 309–329. DOI: 10.1007/978-94-009-5103-7_19.
- [6] Leistner, L. (1978). Hurdle effect and energy saving. In: Downey, W.K. (Hrsg.), *Food Quality and Nutrition*. Applied Science Publishers, London, S. 553–557.
- [7] Leistner, L. (1994). *Food Design by Hurdle Technology and HACCP*. 62 S. Kulmbach: Adalbert-Raps-Stiftung.
- [8] Leistner, L. (1995). Principles and applications of hurdle technology. In: Gould, G.W. (Hrsg.), *New Methods of Food Preservation*. Springer, Boston, MA, S. 1–21. DOI: 10.1007/978-1-4615-2105-1_1.
- [9] Leistner, L. (2000). Basic aspects of food preservation by hurdle technology. *International Journal of Food Microbiology*, 55(1–2), 181–186. DOI: 10.1016/S0168-1605(00)00161-6.
- [10] Leistner, L. (1994). Further developments in the utilization of hurdle technology for food preservation. *Journal of Food Engineering*, 22(1–4), 421–432. DOI: 10.1016/0260-8774(94)90044-2.
- [11] Gorris, L.G.M. (2024). *Curriculum Vitae*. Food Safety Freelance. Verfügbar unter: irp.cdn-website.com/30ddef01/files/uploaded/CV%20LGM%20Gorris%20FSF%2028MAR2024. [Zugriff Februar 2026.]
- [12] Gorris, L.G.M. (2014). Hurdle Technology. In: *Encyclopedia of Food Microbiology*, Zweite Auflage. Elsevier, S. 221–227. DOI: 10.1016/B978-0-12-384730-0.00166-X.
- [13] Leistner, L. und Gorris, L.G.M. (1995). Food preservation by hurdle technology. *Trends in Food Science and Technology*, 6(2), 41–46. DOI: 10.1016/S0924-2244(00)88941-4.
- [14] Leistner, L. und Gorris, L.G.M. (Hrsg.) (1994). *Food Preservation by Combined Processes*. FLAIR Abschlussbericht EUR 15776 EN. Brüssel: Europäische Kommission GD XII.
- [15] Gould, G.W. (1995). Homeostatic mechanisms during food preservation by combined methods. In: Barbosa-Cánovas, G.V. und Welti-Chanes, J. (Hrsg.), *Food Preservation by Moisture Control: Fundamentals and Applications*. Technomic Publishing, Lancaster, PA, S. 397–410.
- [16] Gould, G.W. (Hrsg.) (1995). *New Methods of Food Preservation*. Blackie Academic and Professional, London.
- [17] Barbosa-Cánovas, G.V., Fontana Jr., A.J., Schmidt, S.J. und Labuza, T.P. (Hrsg.) (2007). *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*. IFT Press / Blackwell Publishing. DOI: 10.1002/9780470376386.
- [18] Bull, H.B. (1944). Adsorption of water vapour by proteins. *Journal of the American Chemical Society*, 66, 1499–1507.
- [19] Fennema, O. (1973). Water and ice. In: Fennema, O., Powrie, W.D. und Marth, E.H. (Hrsg.), *Low Temperature Preservation of Foods and Living Matter*. Marcel Dekker, New York, S. 1–77.
- [20] Offer, G. und Trinick, J. (1983). On the mechanism of water holding in meat: the swelling and shrinking of myofibrils. *Meat Science*, 8(4), 245–281.
- [21] Leistner, L. und Rödel, W. (1975). In: Duckworth, R.B. (Hrsg.), *Water Relations of Foods*. Academic Press, London, S. 309–323.

- [22] Heinz, G. und Hautzinger, P. (2007). Meat Processing Technology for Small- to Medium-Scale Producers. RAP Publication 2007/20. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok.
- [23] Garriga, M., Aymerich, M.T. und Hugas, M. (2002). Effect of high pressure processing on the microbiology of ham and fermented sausages. In: Smelt, J.P.P.M. (Hrsg.), High Pressure Processing of Foods. Blackwell Science.
- [24] Petit, T., Caro, Y., Petit, A.S., Santchurn, S.J. und Collignan, A. (2014). Physicochemical and microbiological characteristics of biltong, a traditional salted dried meat of South Africa. *Meat Science*, 96(3), 1313–1317. DOI: 10.1016/j.meatsci.2013.11.009.
- [25] Jones, V., Thibaud, F., Coroller, L., Zuber, E., Collignan, A. und Le Marc, Y. (2019). Effects of the addition of vinegar, weight loss and packaging method on the physicochemical properties and microbiological profile of biltong. *Meat Science*, 148, 56–65. DOI: 10.1016/j.meatsci.2018.09.008.
- [26] Gavai, K., Karolenko, C. und Muriana, P.M. (2022). Effect of biltong dried beef processing on the reduction of *Listeria monocytogenes*, *E. coli* O157:H7, and *Staphylococcus aureus*, and the contribution of the major marinade components. *Microorganisms*, 10(7), 1308. doi:10.3390/microorganisms10071308.
- [27] Igwegbe, A.O., Samson, T.N. und Ugwuanyi, J.O. (2009). Processing and quality evaluation of kilishi, a dry Nigerian meat product. *Journal of Food Technology*, 7(5), 131–137.
- [28] Omojola, A.B. (2008). Yield and organoleptic characteristics of suya (a roasted meat product) prepared from three different muscles of a matured bull. *African Journal of Biotechnology*, 7(13), 2254–2257.
- [29] Belcher, J.N. (2006). Industrial packaging developments for the global meat market. *Meat Science*, 74(1), 143–148.
- [30] Balasubramaniam, V.M., Martínez-Monteagudo, S.I. und Gupta, R. (2015). Principles and application of high pressure-based technologies in the food industry. *Annual Review of Food Science and Technology*, 6, 435–462. DOI: 10.1146/annurev-food-022814-015539.
- [31] Patterson, M.F. und Knoerzer, K. (2016). High pressure processing. In: Lelieveld, H.L.M. et al. (Hrsg.), *Handbook of Hygiene Control in the Food Industry*, 2. Auflage. Woodhead Publishing.
- [32] USDA FSIS (2003). Control of *Listeria monocytogenes* in Ready-to-Eat Meat and Poultry Products: Final Rule. *Federal Register*, 68 FR 34208, 6. Juni 2003.
- [33] [Referenznummer zurückgezogen.]
- [34] Sampedro, F., McAloon, A., Yee, W., Fan, X. und Geveke, D.J. (2014). Cost analysis and environmental impact of pulsed electric fields and high pressure processing in comparison with thermal pasteurization. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 1928–1937.
- [35] McMeekin, T.A. et al. (1997). Quantitative microbiology: a basis for food safety. *Emerging Infectious Diseases*, 3(4), 541–549.
- [36] Ratkowsky, D.A. und Ross, T. (1995). Modelling the bacterial growth/no growth interface. *Letters in Applied Microbiology*, 20(1), 29–33.
- [37] Kourkoutas, Y. und Proestos, C. (2020). Food preservation: challenges and efforts for the future. *Foods*, 9(4), 469. DOI: 10.3390/foods9040469.
- [38] Zhang, J. et al. (2025). Review of recent advances in intelligent and antibacterial packaging for meat quality and safety. *Foods*, 14(7), 1157. doi:10.3390/foods14071157.
- [39] Stavropoulou, E. und Bezirtzoglou, E. (2019). Predictive modelling of microbial behavior in food. *Foods*, 8(12), 654. DOI: 10.3390/foods8120654.
- [40] AI-Driven Food Packaging Systems (Madhu et al., 2025). *Journal of Food Science*. DOI: 10.1111/1750-3841.70716.
- [41] [Zitat entfernt: Santos-Júnior et al. (2024) über KI-gestützte antimikrobielle Peptidsuche konnte zum Zeitpunkt dieser Überarbeitung nicht mit einer vollständigen und stabilen bibliografischen Referenz verifiziert werden.]
- [42] Chu, Z. et al. (2024). Research on food preservation based on antibacterial technology: progress and future prospects. *Molecules*, 29(14), 3318. doi:10.3390/molecules29143318.
- [43] Leistner, L. (1992). Food preservation by combined methods. *Food Research International*, 25, 151–158.
- [44] Christian, J.H.B. und Scott, W.J. (1953). Water relations of *Salmonellae* at 30°C. *Australian Journal of Biological Sciences*, 6, 565–573.
- [45] Gorris, L.G.M. und Peck, M.V. (1998). Microbiological safety considerations when using hurdle technology with refrigerated processed foods of extended durability. In: Ghazala, S. (Hrsg.), *Sous Vide and Cook-Chill Processing for the Food Industry*. Aspen Publishers, Gaithersburg, S. 206–233.
- [46] USDA FSIS (2023). FSIS Compliance Guideline for Ready-to-Eat Fermented, Salt-Cured, and Dried Meat and Poultry Products. FSIS-GD-2023-0002. Verfügbar unter: fsis.usda.gov/policy/fsis-notice/19-23.

- [47] Pitt, J.I. und Hocking, A.D. (2009). *Fungi and Food Spoilage*, 3. Auflage. Springer, Dordrecht.
- [48] Troller, J.A. (1972). Effect of water activity on enterotoxin A production and growth of *Staphylococcus aureus*. *Applied Microbiology*, 24(3), 440–443. PMID: 4627730.
- [49] Europäisches Parlament und Rat (2011). Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 über die Information der Verbraucher über Lebensmittel. *Amtsblatt der Europäischen Union*, L 304, 18–63. Anhang VI Teil A Punkt 6. Verfügbar unter: eur-lex.europa.eu.
- [50] Europäische Kommission (2018). Mitteilung der Kommission: Leitlinien für die Anwendung von Anhang VI der Verordnung (EU) Nr. 1169/2011. *Amtsblatt C 196*, 8.6.2018.
- [51] Republik Südafrika (1972, in der jeweils geltenden Fassung). *Foodstuffs, Cosmetics and Disinfectants Act 54 of 1972*. *Government Gazette*.
- [52] Republik Südafrika. *Regulations relating to Meat, Inspection of Abattoirs, Meat Classification and Marking, R.1183 (und nachfolgende Änderungen)*. *Government Gazette*.
- [53] Europäisches Parlament und Rat (2008). Verordnung (EG) Nr. 1333/2008 über Lebensmittelzusatzstoffe. *Amtsblatt der Europäischen Union*, L 354, 16–33 und Anhang II. Verfügbar unter: eur-lex.europa.eu.
- [54] US FDA / USDA (aktuell). 21 CFR 172.175 (Natriumnitrit) und 21 CFR 172.170 (Natriumnitrat). *Code of Federal Regulations Title 21*. Verfügbar unter: ecfr.gov.
- [55] Farkas, J. (1998). Irradiation as a method for decontaminating food: a review. *International Journal of Food Microbiology*, 44(3), 189–204. DOI: 10.1016/S0168-1605(98)00132-9.