Karlsruher Institut für Technologie

Heat Resilience of Hospitals: Identification of Key Resilience Dimensions and Development of a Conceptual Structure Model

Sonja Rosenberg, Ines Hofmann,
Median Akel, Claudius Amon, Azra Kutan,
Jonas Schiele, Jan-Niklas Weck, Frank Schultmann

No. 83 | NOVEMBER 2026

WORKING PAPER SERIES IN PRODUCTION AND ENERGY



Heat Resilience of Hospitals: Identification of Key Resilience Dimensions and Development of a Conceptual Structure Model
An Exploratory Study Based on Literature Analysis and Expert Interviews

---

Hitzeresilienz von Krankenhäusern: Identifikation zentraler Resilienzdimensionen und Entwicklung eines konzeptionellen Strukturmodells
Eine explorative Untersuchung mittels Literaturanalyse und Experteninterviews

Autoren: Sonja Rosenberg*, Ines Hofmann, Median Akel, Claudius Amon, Azra Kutan, Jonas Schiele, Jan-Niklas Weck, Frank Schultmann

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP),
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe
*Korrespondierende Autorin, E-Mail: sonja.rosenberg@kit.edu

Abstract:

Heatwaves are becoming more frequent and intense due to climate change, creating growing challenges for hospitals that must maintain essential healthcare services while coping with increased thermal stress. Despite the increasing relevance of climate adaptation in healthcare, a conceptual framework for understanding heat resilience at the hospital level remains largely underdeveloped. This working paper develops a conceptual structure model of hospital heat resilience by combining an exploratory literature review with qualitative expert interviews conducted in the German hospital sector. The analysis identifies four core internal dimensions of hospital heat resilience: governance and management, buildings and technical infrastructure, patient care and clinical processes, and workforce. Findings suggest that resilience emerges not from isolated measures within these domains but from their interaction and mutual dependence. In addition, financing and investment capacity as well as external cooperation and networking are identified as overarching contextual factors shaping the implementation and effectiveness of adaptation measures to reach heat resilience in individual hospitals.

The resulting structure model provides a systematic framework for understanding hospital heat resilience and highlights the distinction between internal resilience dimensions and external enabling conditions. While the findings are exploratory and based on a limited number of expert interviews, the model offers a foundation for future empirical validation and the development of indicator-based assessment, self-evaluation, and decision-support tools for hospital climate adaptation.

Kurzzusammenfassung:

Der Klimawandel führt zu einer zunehmenden Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen, wodurch Krankenhäuser vor die Herausforderung gestellt werden, ihre Versorgungs- und Betriebsfähigkeit auch unter steigenden thermischen Belastungen aufrechtzuerhalten. Auf Grundlage einer explorativen Literaturauswertung und qualitativer Experteninterviews wird ein konzeptionelles Strukturmodell der Hitzeresilienz von Krankenhäusern entwickelt. Die Analyse identifiziert vier organisationsinterne Resilienzdimensionen: Organisation und Steuerung, Gebäude und technische Infrastruktur, Patientenversorgung und klinische Prozesse sowie Personal. Ergänzend werden Finanzierung und Investitionsfähigkeit sowie externe Kooperation und Vernetzung als übergreifende Rahmenbedingungen identifiziert. Das entwickelte Strukturmodell bietet einen systematischen Bezugsrahmen für die Analyse von Hitzeresilienz und kann als Grundlage für zukünftige indikatorbasierte Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungsinstrumente dienen.

www.kit.edu

Heat Resilience of Hospitals: Identification of Key Resilience Dimensions and Development of a Conceptual Structure Model

An Exploratory Study Based on Literature Analysis and Expert Interviews

Hitzeresilienz von Krankenhäusern: Identifikation zentraler Resilienzdimensionen und Entwicklung eines konzeptionellen Strukturmodells
Eine explorative Untersuchung mittels Literaturanalyse und Experteninterviews

Sonja Rosenberg, Ines Hofmann,
Median Akel, Claudius Amon, Azra Kutan, Jonas Schiele, Jan-Niklas Weck,
Frank Schultmann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion

Note on Language and Translation This working paper is available in both German and English. The German version starts on page 9, and the English version starts on page 2. German was the primary language of the research. Accordingly, the interviews were conducted in German and transcribed and analyzed in the same language.

Abstract

Heatwaves are becoming more frequent and intense due to climate change, creating growing challenges for hospitals that must maintain essential healthcare services while coping with increased thermal stress. Despite the increasing relevance of climate adaptation in healthcare, a conceptual framework for understanding heat resilience at the hospital level remains largely underdeveloped. This working paper develops a conceptual structure model of hospital heat resilience by combining an exploratory literature review with qualitative expert interviews conducted in the German hospital sector. The analysis identifies four core internal dimensions of hospital heat resilience: governance and management, buildings and technical infrastructure, patient care and clinical processes, and workforce. Findings suggest that resilience emerges not from isolated measures within these domains but from their interaction and mutual dependence. In addition, financing and investment capacity as well as external cooperation and networking are identified as overarching contextual factors shaping the implementation and effectiveness of adaptation measures to reach heat resilience in individual hospitals. The resulting structure model provides a systematic framework for understanding hospital heat resilience and highlights the distinction between internal resilience dimensions and external enabling conditions. While the findings are exploratory and based on a limited number of expert interviews, the model offers a foundation for future empirical validation and the development of indicator-based assessment, self-evaluation, and decision-support tools for hospital climate adaptation.

Kurzzusammenfassung

Der Klimawandel führt zu einer zunehmenden Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen, wodurch Krankenhäuser vor die Herausforderung gestellt werden, ihre Versorgungs- und Betriebsfähigkeit auch unter steigenden thermischen Belastungen aufrechtzuerhalten. Auf Grundlage einer explorativen Literaturauswertung und qualitativer Experteninterviews wird ein konzeptionelles Strukturmodell der Hitzeresilienz von Krankenhäusern entwickelt. Die Analyse identifiziert vier organisationsinterne Resilienzdimensionen: Organisation und Steuerung, Gebäude und technische Infrastruktur, Patientenversorgung und klinische Prozesse sowie Personal. Ergänzend werden Finanzierung und Investitionsfähigkeit sowie externe Kooperation und Vernetzung als übergreifende Rahmenbedingungen identifiziert. Das entwickelte Strukturmodell bietet einen systematischen Bezugsrahmen für die Analyse von Hitzeresilienz und kann als Grundlage für zukünftige indikatorbasierte Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungsinstrumente dienen.

1 Introduction

Climate change is increasing the frequency of extreme weather events worldwide, especially heatwaves. This trend is now clearly visible in Germany as well. Analyses by the German Meteorological Service (Deutscher Wetterdienst, DWD) show a substantial rise in heat events: since the 1950s, the number of summer days has roughly doubled, while the number of hot days has quadrupled. Climate projections also indicate that heat stress in Germany will continue to intensify in the coming decades (Deutscher Wetterdienst 2025; Deutscher Wetterdienst 2026).

Because heatwaves place simultaneous strain on buildings, technical systems and organizational processes, existing infrastructures need to adapt. Hospitals are particularly affected: as critical infrastructure, they face a dual challenge (eClinicalMedicine 2026). On the one hand, demand for care rises during heat periods as heat-related acute illnesses increase and chronic conditions worsen. On the other hand, hospitals themselves come under pressure. Patient rooms and work areas heat up, medical and building technology must be kept stable under difficult conditions, and staff face additional strain.

In this paper, heat resilience is defined as a hospital's ability to anticipate recurring and increasing heat stress, cope with its effects and adapt to it, while maintaining its core care and operational functions. This working definition draws on the understanding of health system resilience found in both the scientific literature and international guidelines (World Health Organization 2022; World Health Organization 2020; Khalil et al. 2022). Heat resilience in hospitals therefore encompasses safe patient care, functioning technical and structural facilities, and effective protection of staff and particularly vulnerable patient groups from heat-related health risks. It is not limited to individual measures or areas; rather, it emerges from the interplay of technical, organizational, staff-related and clinical factors.

This working paper aims to develop a conceptual model of heat resilience in hospitals. To this end, key dimensions of heat resilience are identified from the literature and complemented empirically by semi-structured expert interviews from the German hospital sector. The interviews explore how relevant the identified resilience dimensions are in practice and how they interact under the institutional and organizational conditions of German hospitals.

Building on this, a conceptual model is developed that captures the key resilience dimensions, their interrelations and overarching influencing factors.

To operationalize this objective, the following main research question is posed:

How can the heat resilience of hospitals be conceptually structured?

To answer this question, the paper first examines which key dimensions and interactions of hospital heat resilience can be identified from the literature review and the expert interviews. It then analyzes which overarching contextual conditions shape these dimensions and their further development.

The working paper thus contributes to the conceptual foundation of hospital heat resilience and lays the groundwork for further research and operationalization.

The paper is structured according to this research logic. Section 2 derives key dimensions and interactions of hospital heat resilience from the literature. Section 3 adds the perspective of the expert interviews. Section 4 draws on the results of the preceding sections to develop a conceptual model of heat resilience in hospitals. Section 5 discusses the research approach and the results, and Section 6 concludes with a summary.

2 Literature-Based Foundations of Hospital Heat Resilience

The literature review was conducted as an exploratory, iterative screening rather than as a standardized review procedure. Starting with relevant guidelines and heat protection plans, scientific and practice-oriented sources were searched for and continuously added using databases such as Scopus and Google Scholar. The search covered both individual dimensions of heat resilience, i.e., its key pillars, and overarching terms relating to hospitals, heat, resilience, and climate adaptation. Sources were included based on their thematic relevance and their contribution to the conceptual understanding of heat-related resilience in the hospital context.

To keep this working paper concise, it does not examine different understandings of resilience in depth. Instead, the working definition of heat resilience presented in the introduction serves as the analytical basis. Likewise, the paper does not systematically distinguish heat resilience from related concepts such as vulnerability, robustness or adaptive capacity; these are considered only where they are directly relevant to heat-related resilience in hospitals. Where needed to develop the conceptual framework, the paper also draws on findings from the general hospital resilience literature that do not explicitly address heat events. This applies in particular to Section 2.5, which considers fundamental resilience mechanisms and organizational fields of action.

2.1 Organization and Governance

The organizational dimension of heat resilience describes a hospital's ability to permanently embed the management of heat in its leadership, planning, and decision-making structures.

This includes, in particular, clearly defined responsibilities, a facility-specific heat protection plan, reliable warning and communication channels, and established procedures for triggering and coordinating measures when a disruptive heat event occurs (Bundesministerium für Gesundheit 2024; Neto et al. 2026). Organizational resilience also includes the ability to systematically document and evaluate experiences from stress events and to use them to further develop existing processes (Neto et al. 2026). For heat events, this means evaluating past heat periods and feeding the lessons learned into the adaptation of protective measures.

The literature describes governance, coordination, communication and organizational learning as key prerequisites for resilient health systems (Accoe et al. 2023; Lyng et al. 2022). From this perspective, resilience does not stem solely from technical or staff resources, but from how these resources are embedded within appropriate management and decision-making structures (World Health Organization 2020). The model heat protection plan of the Federal Ministry of Health reflects these requirements, recommending clear responsibilities, facility-specific concepts, and defined communication and escalation channels (Bundesministerium für Gesundheit 2024).

2.2 Buildings and Technical Infrastructure

The technical and infrastructural resilience of healthcare facilities describes the ability to prepare and adapt buildings, technical installations and care-relevant systems so that they remain functional and essential care services can be provided even under exceptional stress (Khalil et al. 2022). It is a key prerequisite for hospitals to maintain their core care services during a disruptive event, i.e., to be resilient. For heat events, this dimension covers both limiting thermal stress inside the building and protecting technical and logistical processes against heat-related impairments.

Buildings and technology cannot be considered in isolation, as spatial conditions, technical systems and clinical processes are closely intertwined. Thermal stress inside a hospital is not determined by the outdoor temperature alone. Other important factors include the building envelope, summer thermal protection, the orientation and size of windows, shading, internal heat sources, and existing ventilation and cooling systems (Dickson et al. 2023; Fifield et al. 2018). If the building does not cool down sufficiently at night, heat can accumulate over several consecutive hot days, increasing thermal stress (Zhang et al. 2026). At the same time, people differ in how they perceive the degree of cooling (Beckmann et al. 2021).

The federal recommendation on heat protection in hospitals therefore calls for assessing the heat-relevant structural condition and surroundings of the facility, identifying particularly affected rooms and building areas, and developing suitable sun protection, ventilation and air-conditioning concepts (Bundesministerium für Gesundheit 2024).

Structural and technical measures, intended mainly as medium- to long-term heat protection for existing buildings, include external shading and suitable sun protection. However, a recommendation by the German Society for General and Hospital Hygiene (DGKH) points to a potential conflict between effective sun and heat protection through shading on the one hand and adequate daylight on the other (DGKH 2024). Installing and expanding technical cooling and air-conditioning systems also counts as a structural and technical measure. Hospitals, however, have more stringent requirements for ventilation and cooling systems to mitigate potential hazards, such as infection risks associated with air exchange (DGKH et al. 2002). Structural heat resilience therefore does not mean maximum cooling. Instead, it requires a coordinated combination of thermal protection, shading, ventilation, cooling, and the functional requirements of hospital operations.

2.3 Patient Care and Clinical Processes

The resilience of patient care refers to a hospital's ability to maintain its core care services despite heat-related stress and to respond effectively to changing care needs (Khalil et al. 2022). Heatwaves affect both the health of patients and the organization of the clinical processes that serve to prevent and reduce heat-related health stress (Brooks et al. 2023). Studies suggest that heatwaves are associated with more heat-related hospital admissions and can thus increase demand for medical services (Åström et al. 2013).

Among other things, the model heat protection plan of the Federal Ministry of Health recommends systematically identifying patients at risk from heat, regularly monitoring fluid status and body temperature, and adapting nursing and medical measures during heat events (Bundesministerium für Gesundheit 2024). These measures aim to prevent heat-related complications early and to ensure patient safety and compliance with quality standards in service.

Beyond direct patient care, heat can also affect clinical processes. Hospitals must therefore be able to adapt processes flexibly to changing conditions, for example by prioritizing particularly affected wards, providing additional resources, or adjusting operational procedures (Bundesministerium für Gesundheit 2024).

2.4 Staff

The staff dimension of heat resilience describes a hospital's ability to maintain the health, performance, and operational readiness of its employees even during extreme heat events. This dimension matters not only because staff are essential for maintaining patient care, but also because employers are responsible for providing safe and healthy working conditions. Council Directive 89/391/EEC of 12 June 1989 requires employers in the European Union to ensure the safety and health of workers (Council of the European Communities 1989). This obligation applies regardless of sector or activity and therefore also covers protection against health risks from high workplace temperatures. In hospitals, this aspect becomes even more important as heat stress increases, since the staff's ability to work is also a key prerequisite for patient care. Zink et al. (2026) show that nurses perceive heat as a growing challenge in everyday hospital work and see a need for organizational and technical support measures.

Current research indicates that workplace heat stress can be associated with health risks and productivity losses and therefore calls for stronger adaptation measures in occupational safety (Drescher und Janzen 2025).

To reduce the effects of increasing heat stress on employees, the Federal Ministry of Health's model heat protection plan for hospitals recommends measures in four key fields of action: information and awareness-raising, occupational safety and health, adaptation of work organization, and protection of particularly heat-exposed employee groups (Bundesministerium für Gesundheit 2024).

2.5 Interconnections and Interactions of the Dimensions

The identified dimensions and their sub-aspects are all documented in the literature. However, the interactions between them have so far only partially been brought together systematically into a common concept.

In their scoping review, Khalil et al. (2022) identify six interconnected components of hospital resilience: premises, equipment, staff, systems, strategies and services. They emphasize that hospital resilience emerges from the interplay of these components and spans structural and technical prerequisites as well as staff-related, organizational and care-related aspects. Other conceptual approaches also structure hospital resilience along several dimensions, for example by distinguishing between structural, infrastructural and administrative areas (Fallah-Aliabadi et al. 2020) or by considering safety, disaster preparedness, the maintenance of essential medical services, and recovery or adaptation Zhong et al. (2014). These approaches show that hospital resilience cannot be reduced to individual structural or organizational characteristics. Instead, it comprises various prerequisites and capabilities that jointly help maintain core functions.

Existing studies also highlight the importance of interactions between resilience factors. World Health Organization

(2024) and Berg et al. (2018) argue that resilience in healthcare must be understood as a complex, multi-level phenomenon, whereas empirical studies often focus on individual fields of action or specific aspects of adaptive capacity. In their qualitative study of resilience capacities in healthcare, Lyng et al. (2022) highlight, among other things, the importance of governance, coordination, communication, and organizational learning. These capacities are closely linked to how adaptation measures are designed and implemented and therefore cannot be viewed purely in isolation. Similarly, Carbonara et al. (2024), in their systematic literature review on hospital resilience, call for greater attention to resources, organizational capabilities and their interplay. It is important, however, to distinguish between acknowledging interdependencies conceptually and investigating them empirically: describing several dimensions as interconnected does not necessarily mean that the concrete relationships between them have been systematically analyzed or empirically tested.

An integrative system perspective on hospital heat resilience is therefore still needed, as existing systemic resilience approaches do not explicitly address heat as a specific stressor.

It remains unclear how the described interconnections between resilience dimensions can be transferred to the specific context of heat stress, and to what extent they adequately capture the interactions between Organization and Governance, Buildings and Technical Infrastructure, Patient Care and Clinical Processes, and Staff.

Against this background, the following section examines the dimensions and interrelations identified in the literature from an empirical perspective.

3 Expert Interviews

3.1 Design and Research Approach

Following the literature review, semi-structured expert interviews were conducted to complement the theoretical foundation with empirical practical knowledge and to identify implementation barriers in everyday hospital practice.

The interview guide combined structured and open questions and consisted of a general part and a domain-specific part. The general part comprised nine questions asked of all interviewees. These covered the individual perception of heat stress over time, the assessment of already implemented measures, awareness of heat protection plans, organizational responsibilities, key implementation barriers, and a self-assessment of the interviewee's hospital's heat resilience, including existing gaps.

In addition, domain-specific questions were developed: six additional questions each for physicians and administration, and five each for nursing and building technology. These addressed, among other things, specific risks during medical procedures, the nursing care and documentation workload, structural and technical adaptation needs, and questions of strategic planning and financing.

The interviews were conducted with experts from the German hospital sector. In total, 14 interviews were held with representatives from four key functional areas (see Table 1). All experts were selected purposively based on three criteria: leadership responsibility, professional competence and proximity to decision-makers.

The data were analyzed systematically using the content-structuring qualitative content analysis according to Kuckartz (2018). The procedure follows a modified six-step sequence:

1. **Initial text work and memos**
   All 14 transcripts were reviewed intensively, and case-related memos (case portraits) were written to anchor the specifics of each stakeholder group in context.

2. **Development of the main categories**

   - Deductive derivation of the core categories from the literature-based resilience dimensions: *Organization and Governance* (C1), *Buildings and Technical Infrastructure* (C2), *Patient Care and Clinical Processes* (C3), *Staff* (C4)
   - Inductive addition of further thematic fields from the material: *Financing* (C5) and *External Cooperation and Networking* (C6)

3. **First coding cycle (coarse coding)**
   The entire text material was coded along the six main categories.

4. **Differentiation and formation of subcategories**
   Refined subcategories were derived inductively from the compiled text passages to specify the interrelations.

5. **Second coding cycle (fine coding)**
   The entire material was coded again using the differentiated system of main categories and subcategories (C1.x–C6.x).

6. **Presentation and visualization of results**
   The findings were written up, supported by direct evidence, and integrated into the model.

The analysis deliberately focuses on core topics and interrelations across stakeholder groups. A separate cross-case matrix, which would normally form an additional phase of the procedure by Kuckartz (2018), was not included, as comparing the four stakeholder groups added little value for answering the research question. Moreover, the uneven representation of professional groups in the sample calls for caution when interpreting group-specific differences.

The interviews took place between late May and late June 2026 and lasted between 30 and 75 minutes. They were recorded, transcribed with software support, manually checked for quality and then pseudonymized. For the analysis, interviewees were anonymized using expert identifiers (Exp. 1 to Exp. 14).

3.2 Analysis by Resilience Dimension

The content analysis, based on the Kuckartz procedure, enables a differentiated examination of the four literature-based resilience dimensions. The fine coding in the second coding cycle identified specific subcategories within the main categories, which capture in detail the interrelations and barriers in everyday hospital practice.

3.2.1 Organization and Governance (C1)

The organizational dimension describes how heat protection measures are structurally embedded in leadership, planning and decision-making processes. The interviews reveal a gap in the *availability and awareness of heat protection plans* (C1.1) in day-to-day operations. Physicians generally do not consult heat-health action plans during treatment; instead, they adjust therapies ad hoc based on experience. In nursing, too, formal guidelines play only a minor role. On the wards, nurses tend to act immediately and situationally, emphasizing pragmatic

Tabelle 1: Assignment of the interviewed experts to the four functional areas

Area	Reference numbers
Medical area (7 interviews / 9 persons)	1, 2, 3, 4, 5, 8, 9
Nursing (3 interviews)	10, 11, 12
Administration (2 interviews)	6, 7
Buildings & Technology (2 interviews)	13, 14

protective measures at the bedside, such as encouraging fluid intake, close fluid balance monitoring or neck cooling towels (Exp. 2, 10)

Responsibilities and governance structures (C1.2) vary widely and are spread across hospital management, occupational safety, technical management, quality management and nursing (Exp. 9, 13, 14). One positive example is pioneering hospitals with an established heat working group that brings together those responsible for occupational safety, climate protection, occupational medicine, technology, construction, nursing and finance (Exp. 6, 7). Other hospitals, by contrast, have no clearly responsible individual at all (Exp. 5, 9, 10, 12).

Regarding *integration into risk and quality management* (C1.3), experts call for binding standard operating procedures and uniform escalation paths. In some cases, an existing Critical Incident Reporting System is used, for example, to report impending loss of sterility in the operating room or technical overheating (Exp. 1, 9, 12).

3.2.2 Buildings and Technical Infrastructure (C2)

The structural and technical infrastructure is the physical prerequisite for continuous operations. The analysis reveals *differences between functional areas and general wards* (C2.1). Critical core areas such as operating rooms, intensive care units, laboratories, blood banks and IT server rooms are cooled throughout, whereas general wards almost entirely lack reliable cooling (Exp. 1, 3, 5, 12).

Thermal stress indoors is closely linked to the *building fabric and façade design* (C2.2). Uninsulated 1970s buildings and historic structures retain summer heat for days (Exp. 2, 8). Modern functional buildings with large glass façades and no adequate external shading, in turn, create an extreme heat-trapping effect (Exp. 4, 12). At extreme outdoor temperatures, existing cooling systems reach their physical limits, which can cause *technical malfunctions and overheating failures* (C2.3) in medical technology and IT infrastructure (Exp. 1, 8, 9, 13, 14).

3.2.3 Patient Care and Clinical Processes (C3)

The resilience of patient care describes the maintenance of treatment quality under heat stress. The interviews allow a precise *identification of vulnerable patient groups* (C3.1): geriatric patients with a diminished sense of thirst (Exp. 2), multimorbid and chronically ill patients (Exp. 3, 8), patients with dementia and immobile patients (Exp. 4, 12), and surgical patients with high fluid losses (Exp. 2, 3).

Regarding the predominant *clinical symptoms and process adaptations* (C3.2), interviewees report more frequent cases of dehydration, electrolyte imbalances, deteriorating renal function, circulatory instability and acute delirium (Exp. 2, 9).

As for *medication safety and cold chains* (C3.3), room temperatures above 30 °C on general wards shorten the stability window for preparing and administering heat-sensitive drugs (Exp. 4, 12).

3.2.4 Staff and Occupational Safety (C4)

The staff dimension proves to be a central bottleneck of clinical heat resilience. *Thermal and physical stress* (C4.1) during shift work in uncooled rooms and when working in impermeable protective clothing (e.g., in operating rooms or isolation wards) leads to premature exhaustion and reduced concentration among staff (Exp. 1, 3, 6).

The *heat-related additional nursing workload* (C4.2), for example encouraging fluid intake, coincides with the structural shortage of skilled workers and vacation-related staff shortages in the summer months (Exp. 10, 11, 12). The relief measures taken by management are mostly ad hoc, such as providing additional drinking water and ice, neck cooling towels, fans and cool packs (Exp. 1, 2, 4, 5, 6, 8, 10, 12).

There are also clear *deficits in training and knowledge transfer* (C4.3). Mandatory training on heat resilience and heat pathophysiology is largely absent from curricula (Exp. 1, 7, 9).

3.2.5 Interactions of the Resilience Dimensions

The analysis reveals a close functional coupling between the core dimensions of hospital resilience to heat events. Reciprocal interrelations are particularly evident between Buildings and Technical Infrastructure (C2), Patient Care and Clinical Processes (C3), and Staff and Occupational Safety (C4). Infrastructure deficits, such as a lack of cooling or insufficient shading on general wards, lead to higher indoor temperatures during summer heat periods. This increases the health burden, especially for vulnerable patient groups, and makes heat-related complications such as dehydration, electrolyte disorders or acute delirium more likely (Exp. 2, 4, 9, 10, 12).

The increase in these complications directly affects patient care and raises the nursing and medical care workload. Additional measures such as fluid intake charts, fluid balancing and close monitoring of vital signs tie up staff resources and increase employees' workload (Exp. 2, 10, 11, 12).

This heat-related additional workload often coincides with existing staff shortages, which are further aggravated by seasonal vacation peaks and the thermal stress on employees (Exp. 1, 4, 6, 12). As a result, maintaining regular treatment and care processes becomes increasingly difficult, which can jeopardize continuity of care.

Within these interrelations, the dimension Organization and Governance (C1) plays a central cross-cutting and coordinating role (Exp. 7, 9, 11, 12, 14). Where clear responsibilities are lacking or existing heat protection plans are not sufficiently known at the operational level, protective measures depend largely on experience and the personal commitment of individual employees (Exp. 1, 12, 13). Only when heat protection is systematically embedded in risk management can technical,

staff-related and organizational measures be linked effectively. This enables preventive coordination of building technology, staff scheduling and patient monitoring and thus strengthens the hospital's resilience to heat-related stress (Exp. 6, 7, 9, 11).

3.2.6 Inductively Derived Contextual Conditions

Beyond the four literature-based internal dimensions (C1–C4), the Kuckartz analysis identifies two overarching, inductively derived contextual conditions that influence and shape hospital heat resilience: Financing and Investment Capacity (C5) and External Cooperation and Networking (C6).

A universally cited primary barrier to the implementation of heat protection measures is the macroeconomic financing structure of hospitals in Germany (Exp. 1, 4, 7, 8, 11, 12, 13, 14). This main category comprises two key subcategories. Regarding the *restrictions of dual financing* (C5.1), the gradual withdrawal of the federal states from covering investment costs has led to a massive investment backlog in retrofitting existing buildings with cooling (Exp. 1, 8, 12). The problem is compounded by *exclusion from funding programs and reform pressure* (C5.2): non-profit and university hospitals are often not eligible for public climate adaptation funding programs, and upcoming hospital reforms threaten to push heat protection projects further down the agenda (Exp. 7, 8, 13, 14). These financial restrictions severely limit the capacity of the management level (C1) to act across all dimensions.

As a second overarching contextual condition, the analysis shows that heat resilience does not develop in isolation within the hospital walls but depends heavily on External Cooperation and Networking (C6) (Exp. 1, 7, 9, 12, 13, 14). This category comprises three specific subcategories. Through the *connection to weather and early warning systems* (C6.1), heat warnings from the German Meteorological Service serve as an external trigger for internal warning and escalation chains (Exp. 3, 7, 8, 9, 11, 12). In the area of *care coordination and regional hospitals* (C6.2), close coordination with emergency medical services, dispatch centers and neighboring hospitals is essential during temporary capacity bottlenecks or temperature-related surgery cancellations (Exp. 1, 12). Finally, involvement in *municipal alliances and civil protection* (C6.3) strengthens the crisis resilience of the facility as a whole – for example through municipal heat protection alliances, the use of public model heat-health action plans and participation in cross-state exercises such as LÜKEX (Exp. 6, 7, 12, 13, 14).

Overall, the interviews confirm the fundamental relevance of the resilience dimensions developed in the literature section (C1–C4). They also indicate that Financing (C5) and External Networking (C6) in particular must be understood as overarching contextual conditions that determine the implementation and effectiveness of measures in all internal dimensions.

4 Derivation of a Conceptual Model

The literature review and the exploratory analysis of the expert interviews consistently show that hospital heat resilience cannot be reduced to individual measures or functional areas. Instead, it emerges from the interplay of several organizational, technical, clinical, and staff-related factors. Against this background, a conceptual model is developed that integrates the identified resilience dimensions, their interactions and overarching influencing factors.

The literature review and the expert interviews identify four key internal resilience dimensions: Organization and Governance, Buildings and Technical Infrastructure, Patient Care and Clinical Processes, and Staff. While the literature establishes their conceptual relevance, the interviews illustrate how they manifest in everyday hospital practice.

The dimension Organization and Governance plays a special role. The results suggest that it serves a coordinating cross-cutting function by enabling the planning, prioritization, and implementation of measures in the other dimensions. Deficits in the structural and technical infrastructure can directly affect patient care and the strain on staff. Conversely, staff resources largely determine the ability to cope with heat-related additional demands in care. A hospital's resilience therefore does not result from the isolated performance of individual dimensions, but from their interplay.

Beyond these internal dimensions, the interview analysis identifies two further factors that significantly influence heat resilience: Financing and Investment Capacity, and External Cooperation and Networking. Both categories were derived inductively from the data. Unlike the four core areas, they are not independent internal functional areas. Instead, they shape the conditions for implementing and further developing resilience measures across all dimensions. Financing particularly affects the ability to make infrastructural adaptations, provide staff resources, or permanently embed organizational measures. External networking, by contrast, supports access to early warning information, regional care coordination, and the exchange of knowledge and resources with external actors. Both factors are therefore treated as overarching contextual conditions of the model.

The resulting conceptual model is shown in Figure 2. It describes heat resilience as the outcome of the interplay of the four key resilience dimensions under the influence of financial and external contextual conditions. The model also accounts for feedback and learning processes through which experiences from heat events can inform the further development of existing structures, processes, and measures. It does not claim to empirically validate cause-and-effect relationships; rather, it serves as a conceptual framework for systematically classifying factors relevant to heat resilience in hospitals.

5 Discussion

The model helps to bring together the previously fragmented treatment of hospital heat resilience into an integrative conceptual framework.

Its added value lies less in identifying individual resilience dimensions, some of which have already been described in the literature, than in integrating them into a common conceptual framework. In addition, distinguishing between internal resilience dimensions and overarching contextual conditions allows a more differentiated view of the factors that influence hospital heat resilience.

The conceptual model is broadly consistent with existing concepts of hospital resilience, which describe resilience as the interplay of various organizational, infrastructural, and staff-related capabilities. The working paper shows that these general resilience approaches need to be tailored to the specific context of recurring heat events. Many existing models focus primarily on disasters, pandemics, or sudden disruptions (Zhong et al. 2014; Fallah-Aliabadi et al. 2020; Khalil et al. 2022). Heat, by contrast, is a creeping, seasonally recurring

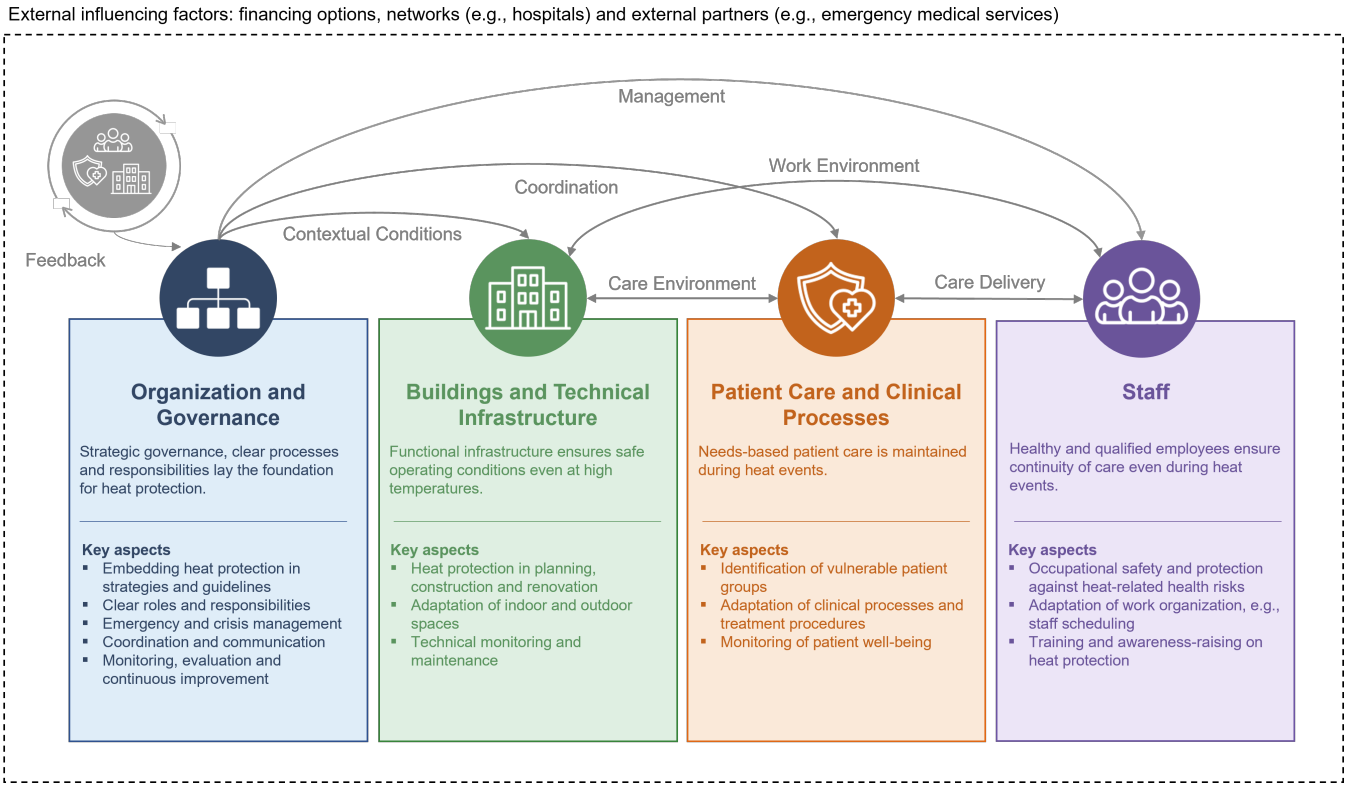


Abbildung 1: Conceptual model of hospital heat resilience

stressor that affects buildings, technical systems, clinical processes and employees. Heat resilience can thus be understood as a specific form of hospital resilience.

The role of the dimension Organization and Governance deserves particular attention. Both the literature review and the expert interviews suggest that technical, infrastructural and staff-related measures can only be effective if they are coordinated through suitable governance and communication structures. The results thus support the assumption that resilience does not arise solely from available resources, but depends substantially on organizational capabilities for coordination, adaptation and organizational learning.

Financing and Investment Capacity emerge as particularly relevant contextual conditions of heat resilience. The importance of this category is likely due in part to institutional characteristics of the German hospital sector. Under the dual hospital financing system, investments in hospital infrastructure are fundamentally the responsibility of the federal states (§ 9 KHG, Bundesministerium der Justiz (n.d.)). Investment bottlenecks can therefore considerably hinder the implementation of long-term adaptation measures, for example in structural heat protection or cooling infrastructure.

However, the investment bottlenecks and financing restrictions described by the interviewees indicate that necessary climate adaptation and heat protection measures often compete with other investment needs. As a result, long-term, capital-intensive measures in particular, such as improving summer thermal protection or retrofitting technical cooling systems, are delayed or not implemented at all. Heat resilience thus appears to depend not only on operational decisions, but also on overarching health-policy and financial conditions.

The interviews also show that hospitals do not act in isolation when coping with heat-related stress. Instead, they rely on functioning early warning, communication, and cooperation structures with external actors. Classifying these factors as contextual conditions makes clear that a hospital's heat resilience is not determined solely by internal measures, but is also shaped by institutional and systemic prerequisites.

Beyond their conceptual contribution, the results offer starting points for developing practice-oriented decision-support and management instruments. The model can serve as a basis for operationalizing heat resilience in hospitals. In particular, the identified dimensions, sub-aspects, and interactions provide a foundation for developing indicator-based assessment procedures. Such an approach could enable a systematic assessment of hospitals' adaptation status and help decision-makers identify where action is needed. One option would be a self-assessment or maturity model that evaluates the dimensions Organization and Governance, Buildings and Technical Infrastructure, Patient Care and Clinical Processes, and Staff using defined qualitative or quantitative indicators. The contextual conditions identified in the interviews, Financing and External Networking, could be incorporated as context factors that influence the feasibility and effectiveness of adaptation measures. An indicator-based approach of this kind could help hospitals prioritize investment and adaptation measures and systematically track their progress in building heat resilience.

The results of this working paper should, however, be interpreted in light of several limitations. First, the paper takes an exploratory approach and does not claim to empirically validate the interrelations presented. Rather, the model is a conceptual synthesis of the literature and interview results. Second, the empirical study is based on a limited number of 14 expert interviews. Third, some professional groups, particularly physicians, were more strongly represented than others. The results, therefore, do not allow conclusions about the

relative importance of individual dimensions or causal relationships. Instead, they should be seen as a starting point for further research that empirically tests and refines the identified interrelations.

Future research should empirically investigate and validate the interrelations shown in the model. In particular, it should examine which dimensions and influencing factors contribute most to hospital heat resilience and how their interactions can be measured. Building on this, robust indicator sets, maturity models or self-assessment instruments could be developed that meet both scientific and practical requirements. It would also be worthwhile to study different hospital types, ownership structures and regional conditions in Germany in order to further improve the transferability and differentiation of the model.

This working paper focuses on heat events as a specific stressor. Overlaps with established concepts of risk, crisis and disaster management and of business continuity management were deliberately not explored in depth. Nevertheless, the results suggest that heat resilience shares many requirements with concepts of organizational crisis preparedness, the maintenance of critical operational functions and the adaptive capacity of healthcare facilities. The relationship between heat resilience, hospital resilience, business continuity management, climate adaptation and disaster resilience therefore offers a promising avenue for future research.

6 Summary

Climate change is increasing the frequency and intensity of heatwaves, challenging hospitals to maintain their care and operational capacity under rising thermal stress. Against this background, this working paper develops a conceptual model of hospital heat resilience. To this end, an exploratory literature review was combined with 14 semi-structured expert interviews from medicine, nursing, administration, and building and operational technology.

The paper identifies four internal resilience dimensions: Organization and Governance, Buildings and Technical Infrastructure, Patient Care and Clinical Processes, and Staff. Heat resilience emerges from their interplay. These core dimensions are complemented by two contextual conditions: Financing and Investment Capacity, and External Cooperation and Networking. On this basis, a conceptual model of hospital heat resilience is developed.

The findings should be interpreted in light of the study's exploratory nature. The model is a conceptual synthesis of the literature and interview results and has not been empirically validated. Moreover, the study is based on a limited number of expert interviews, so no conclusions can be drawn about causal relationships or the relative importance of individual influencing factors.

The model provides a basis for future research and operationalization. In particular, developing indicator-based assessment and maturity models appears promising as a way to systematically assess hospitals' adaptation status, identify where action is needed, and support decisions on prioritizing investment and adaptation measures.

Author Contributions

SR: idea generation, literature search and analysis, study conception, research design, data analysis and interpretation, and writing of the manuscript. IH: idea generation, study conception, research design, and revision of the manuscript. MA, CA, AK, JS and JNW: research design, data collection, conducting the interviews, and transcription of the data. FS: revision of the manuscript. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Declaration on the Use of Generative AI

Generative AI tools were used for language editing of the manuscript and to support the qualitative content analysis according to Kuckartz. This included, in particular, developing coding suggestions, reflecting on categories and discussing interpretive approaches. The AI-assisted coding of the data was reviewed and validated by the authors. Generative AI tools were also used to translate the manuscript from German into English. The interpretation of the findings, the drawing of conclusions and the overall scientific responsibility for the content of this working paper lay with the authors, in accordance with their declared contributions.

Literature Sources at the end of the document

1 Einleitung

Der Klimawandel führt weltweit zu einer Zunahme von Extremwetterereignissen, insbesondere von Hitzewellen. Diese Entwicklungen sind inzwischen auch in Deutschland deutlich sichtbar: Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes zeigen eine markante Zunahme von Hitzeereignissen. So hat sich die Zahl der Sommertage seit den 1950er-Jahren etwa verdoppelt und die Zahl der heißen Tage sogar vervierfacht. Klimaprojektionen weisen zudem darauf hin, dass sich die Hitzebelastung in Deutschland in den kommenden Jahrzehnten weiter verstärken wird (Deutscher Wetterdienst 2025; Deutscher Wetterdienst 2026).

Die zunehmenden Hitzewellen erfordern Anpassungen bestehender Infrastrukturen, da sie Gebäude, technische Systeme und organisatorische Abläufe gleichzeitig belasten. Krankenhäuser sind in besonderem Maße betroffen, weil sie als Einrichtungen der kritischen Infrastruktur einer doppelten Herausforderung gegenüberstehen (eClinicalMedicine 2026). Einerseits steigt während Hitzeperioden der Versorgungsbedarf durch hitzebedingte Akuterkrankungen und die Verschlechterung chronischer Leiden. Andererseits geraten die Krankenhäuser selbst unter Druck: Patientenzimmer und Arbeitsbereiche heizen sich auf, Medizin- und Gebäudetechnik müssen unter erschwerten Bedingungen stabil gehalten werden und das Personal ist zusätzlich belastet.

Unter Hitzeresilienz wird in dieser Arbeit die Fähigkeit eines Krankenhauses verstanden, wiederkehrende und zunehmende Hitzebelastungen zu antizipieren, deren Auswirkungen zu bewältigen, sich an diese anzupassen und dabei seine zentralen Versorgungs- und Betriebsfunktionen aufrechtzuerhalten. Diese Arbeitsdefinition orientiert sich dabei am Resilienzverständnis von Gesundheitssystemen, das sich sowohl in wissenschaftlicher Literatur als auch internationalen Leitlinien findet (World Health Organization 2022; World Health Organization 2020; Khalil et al. 2022). Hitzeresilienz von Krankenhäusern umfasst demnach eine sichere Patientenversorgung, die Funktionsfähigkeit technischer und baulicher Strukturen, sowie den wirksamen Schutz des Personals und besonders vulnerabler Patientengruppen vor hitzebedingten Gesundheitsrisiken. Hitzeresilienz ist somit nicht auf einzelne Maßnahmen oder Bereiche beschränkt, sondern ergibt sich aus dem Zusammenspiel technischer, organisatorischer, personeller und klinischer Faktoren.

Ziel dieses Arbeitspapiers ist die Entwicklung eines konzeptionellen Strukturmodells zur Hitzeresilienz von Krankenhäusern. Hierzu werden literaturgestützt zentrale Dimensionen der Hitzeresilienz identifiziert und durch leitfadengestützte Experteninterviews aus dem deutschen Krankenhauswesen empirisch ergänzt. Die Interviews dienen der Exploration der praktischen Relevanz der identifizierten Resilienzdimensionen sowie ihres Zusammenwirkens unter den institutionellen und organisatorischen Rahmenbedingungen deutscher Krankenhäuser.

Auf dieser Grundlage wird ein konzeptionelles Strukturmodell entwickelt, das sowohl zentrale Resilienzdimensionen als auch deren Zusammenhänge und übergreifende Einflussfaktoren berücksichtigt.

Zur Operationalisierung dieses Forschungsziels wird folgende Hauptforschungsfrage formuliert:

Wie lässt sich die Hitzeresilienz von Krankenhäusern konzeptionell strukturieren?

Zur Beantwortung dieser Frage wird zunächst untersucht, welche zentralen Dimensionen und Wechselwirkungen der Hitzeresilienz von Krankenhäusern durch die Literaturauswertung und die Durchführung von Experteninterviews identifiziert werden können. Anschließend wird analysiert, welche übergeordneten Rahmenbedingungen die Ausprägung und Weiterentwicklung dieser Dimensionen beeinflussen.

Das Arbeitspapier leistet damit einen Beitrag zur konzeptionellen Fundierung der Hitzeresilienz von Krankenhäusern und schafft eine Grundlage für weiterführende Forschungs- und Operationalisierungsarbeiten.

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an dieser Forschungslogik. Das folgende Kapitel 2 widmet sich der Herleitung zentraler Dimensionen und Wechselwirkungen der Hitzeresilienz von Krankenhäusern aus der Literatur. Kapitel 3 ergänzt diese Perspektive durch die Auswertung von Experteninterviews. In Kapitel 4 wird auf Basis der Ergebnisse aus den vorherigen Kapitel ein konzeptionelles Strukturmodell für Hitzeresilienz in Krankenhäusern aufgestellt. In Kapitel 5 erfolgt eine Diskussion des Forschungsansatzes und der Ergebnisse, bevor eine Zusammenfassung das Arbeitspapier in Kapitel 6 abschließt.

2 Literaturbasierte Grundlagen der Hitzeresilienz von Krankenhäusern

Die Literaturauswertung erfolgte als explorative und iterative Literatursichtung und nicht im Rahmen eines standardisierten Review-Verfahrens. Ausgehend von einschlägigen Leitlinien und Hitzeschutzplänen wurden relevante wissenschaftliche und praxisbezogene Quellen recherchiert und fortlaufend ergänzt. Hierfür wurden unter anderem die Datenbanken Scopus und Google Scholar genutzt. Die Recherche orientierte sich sowohl an einzelnen Dimensionen von Hitzeresilienz, also zentralen Eckpfeilern, als auch an übergreifenden Suchbegriffen zu Krankenhäusern, Hitze, Resilienz und Klimaanpassung. Die Einbeziehung der Literatur erfolgte auf Grundlage ihrer thematischen Relevanz und ihres Beitrags zum konzeptionellen Verständnis hitzebedingter Resilienz im Krankenhauskontext.

Zur Wahrung des kompakten Charakters des vorliegenden Arbeitspapiers wurde auf eine vertiefte konzeptionelle Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Resilienzverständnissen verzichtet. Stattdessen wird die in der Einleitung vorgestellte Arbeitsdefinition von Hitzeresilienz als analytische Grundlage verwendet. Ebenso erfolgt keine systematische Abgrenzung zu verwandten Konzepten wie Vulnerabilität, Robustheit oder Anpassungsfähigkeit. Diese Konzepte werden nur insoweit berücksichtigt, wie sie für das Verständnis hitzebedingter Resilienz im Krankenhauskontext unmittelbar relevant sind. Sofern für die Entwicklung des konzeptionellen Rahmens erforderlich, werden teilweise auch Erkenntnisse aus der allgemeinen Literatur zur Resilienz von Krankenhäusern herangezogen, die keinen expliziten Bezug zu Hitzeereignissen aufweisen. Dies betrifft insbesondere Abschnitt 2.5 in dem grundlegende Resilienzmechanismen und organisationale Handlungsfelder betrachtet werden.

2.1 Organisation und Steuerung

Die organisatorische Dimension der Hitzeresilienz beschreibt die Fähigkeit eines Krankenhauses, den Umgang mit Hitze dauerhaft in seinen Führungs-, Planungs- und Entscheidungsstrukturen zu verankern.

Dazu gehören insbesondere klar definierte Zuständigkeiten, ein einrichtungsspezifischer Hitzeschutzplan, verlässliche Warn- und Kommunikationswege sowie geregelte Verfahren zur Auslösung und Koordination von Maßnahmen im Falle eines beeinträchtigenden Hitzeereignisses (Bundesministerium für Gesundheit 2024; Neto et al. 2026). Darüber hinaus umfasst organisatorische Resilienz die Fähigkeit, Erfahrungen aus Belastungsereignissen systematisch zu dokumentieren, auszuwerten und für die Weiterentwicklung bestehender Prozesse zu nutzen (Neto et al. 2026). Auf Hitzeereignisse übertragen bedeutet dies, zurückliegende Hitzeperioden zu evaluieren und gewonnene Erkenntnisse in die Anpassung von Schutzmaßnahmen einfließen zu lassen.

Steuerung, Koordination, Kommunikation und organisationales Lernen werden in der Literatur als zentrale Voraussetzungen resilienter Gesundheitssysteme beschrieben (Accoe et al. 2023; Lyng et al. 2022). Resilienz entsteht demnach nicht allein durch technische oder personelle Ressourcen, sondern durch deren Einbettung in geeignete Management- und Entscheidungsstrukturen (World Health Organization 2020). Diese Anforderungen spiegeln sich auch im Musterhitzeschutzplan des Bundesministeriums für Gesundheit wider, der klare Verantwortlichkeiten, einrichtungsspezifische Konzepte sowie definierte Kommunikations- und Eskalationswege empfiehlt (Bundesministerium für Gesundheit 2024).

2.2 Gebäude und technische Infrastruktur

Die technische und infrastrukturelle Resilienz von Gesundheitseinrichtungen beschreibt die Fähigkeit, Gebäude, technische Anlagen und versorgungsrelevante Systeme so vorzubereiten und anzupassen, dass ihre Funktionsfähigkeit und die Erbringung wesentlicher Versorgungsleistungen auch unter außergewöhnlichen Belastungen aufrechterhalten werden können (Khalil et al. 2022). Sie bildet eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass Krankenhäuser ihre zentralen Versorgungsleistungen während eines Störungsereignisses aufrechterhalten können, also entsprechende Resilienz aufweisen. Auf Hitzeereignisse übertragen umfasst diese Dimension sowohl die Begrenzung thermischer Belastungen innerhalb des Gebäudes als auch die Absicherung technischer und logistischer Prozesse gegen hitzebedingte Beeinträchtigungen.

Gebäude und Technik sind dabei nicht isoliert zu betrachten, da räumliche Bedingungen, technische Systeme und klinische Abläufe eng miteinander verbunden sind. Die thermische Belastung innerhalb eines Krankenhauses wird nicht allein durch die Außentemperatur bestimmt. Von Bedeutung sind auch die Beschaffenheit der Gebäudehülle, der sommerliche Wärmeschutz, die Ausrichtung und Größe der Fensterflächen, die Verschattung, interne Wärmequellen sowie die vorhandenen Lüftungs- und Kühlsysteme (Dickson et al. 2023; Fifield et al. 2018). Eine unzureichende nächtliche Abkühlung kann dazu führen, dass sich Wärme über mehrere aufeinanderfolgende Hitzetage im Gebäude anreichert und die thermische Belastung zunimmt (Zhang et al. 2026), wobei menschliches Empfinden bei der Wahrnehmung des Grads der Abkühlung Unterschiede aufweist (Beckmann et al. 2021).

Die Bundesempfehlung zum Hitzeschutz in Krankenhäusern sieht deshalb vor, den hitzerelevanten Bauzustand und die Umgebung der Einrichtung zu erfassen, besonders belastete Räume und Gebäudebereiche zu identifizieren und geeignete Sonnenschutz-, Lüftungs- und Klimatisierungskonzepte zu entwickeln (Bundesministerium für Gesundheit 2024).

Zu bautechnischen Maßnahmen, die vor allem als mittel- bis langfristige Maßnahmen als Hitzeschutz für Bestandsimmobilien dienen sollen, zählen etwa die außenliegende Verschattung und geeigneter Sonnenschutz. Eine Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Allgemeine und Krankenhaus-Hygiene (DGKH) nennt jedoch einen möglichen Zielkonflikt zwischen wirksamen Sonnen- und Hitzeschutz durch Verschattung und einer ausreichenden Tageslichtversorgung (DGKH 2024). Auch der Einbau und die Erweiterung von technischen Kühl- und Klimatisierungssystemen zählen zu bautechnischen Maßnahmen. Dabei bestehen in Krankenhäusern erhöhte Ansprüche an Lüftungs- und Kühlungssysteme, um möglichen Gefahren z. B. Infektionsrisiken durch Luftaustausch entgegenzuwirken (DGKH et al. 2002). Bauliche Hitzeresilienz besteht deshalb nicht in einer maximalen Kühlung, sondern in einer abgestimmten Kombination aus Wärmeschutz, Verschattung, Lüftung, Kühlung und funktionalen Anforderungen des Krankenhausbetriebs.

2.3 Patientenversorgung und klinische Prozesse

Die Resilienz der Patientenversorgung beschreibt die Fähigkeit eines Krankenhauses, seine zentralen Versorgungsleistungen trotz hitzebedingter Belastungen aufrechtzuerhalten und veränderten Versorgungsbedarfen wirksam zu begegnen (Khalil et al. 2022). Hitzewellen wirken sich sowohl auf die Gesundheit der behandelten Patientinnen und Patienten als auch auf die Organisation klinischer Prozesse aus, die der Prävention und Verringerung hitzebedingter Gesundheitsbelastungen dienen (Brooks et al. 2023). Untersuchungen deuten darauf hin, dass Hitzewellen mit einem erhöhten Auftreten hitzebedingter Krankenhausaufnahmen einhergehen und dadurch die Nachfrage nach medizinischen Leistungen steigern können (Åström et al. 2013).

Der Musterhitzeschutzplan des Bundesministeriums für Gesundheit empfiehlt unter anderem die systematische Erfassung hitzegefährdeter Patientinnen und Patienten, eine regelmäßige Beobachtung von Flüssigkeitsstatus und Körpertemperatur sowie die Anpassung pflegerischer und medizinischer Maßnahmen während Hitzeereignissen (Bundesministerium für Gesundheit 2024). Solche Maßnahmen dienen dazu, hitzebedingte Komplikationen frühzeitig zu verhindern und die Patientensicherheit sowie die Einhaltung von Qualitätsstandards im Service zu gewährleisten.

Neben der direkten Patientenversorgung kann Hitze auch klinische Abläufe beeinflussen. Krankenhäuser müssen daher in der Lage sein, Prozesse flexibel an veränderte Bedingungen anzupassen, beispielsweise durch die Priorisierung besonders belasteter Stationen, die Bereitstellung zusätzlicher Ressourcen oder die Anpassung betrieblicher Abläufe (Bundesministerium für Gesundheit 2024).

2.4 Personal

Die personelle Dimension der Hitzeresilienz beschreibt die Fähigkeit eines Krankenhauses, die Gesundheit, Leistungsfähigkeit und Einsatzbereitschaft seiner Beschäftigten auch während extremer Hitzeereignisse aufrechtzuerhalten. Die Bedeutung der personellen Dimension ergibt sich nicht allein aus ihrer Funktion für die Aufrechterhaltung der Patientenversorgung, sondern auch aus der Verantwortung von Arbeitgebern, sichere und gesundheitsgerechte Arbeitsbedingungen bereitzustellen. Die Richtlinie 89/391/EWG des Rates vom 12. Juni 1989 verpflichtet Arbeitgeber in der Europäischen Union da-

zu, die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten bei der Arbeit zu gewährleisten (Council of the European Communities 1989). Diese Verpflichtung gilt unabhängig von Branche oder Tätigkeit und umfasst somit auch den Schutz vor gesundheitlichen Risiken durch hohe Temperaturen am Arbeitsplatz. Im Krankenhauskontext gewinnt dieser Aspekt angesichts zunehmender Hitzebelastungen zusätzlich an Bedeutung, da die Arbeitsfähigkeit des Personals zugleich eine wesentliche Voraussetzung für die Versorgung von Patientinnen und Patienten darstellt. Zink et al. (2026) zeigen, dass Pflegekräfte Hitze als eine zunehmende Herausforderung im Krankenhausalltag wahrnehmen und einen Bedarf an organisatorischen sowie technischen Unterstützungsmaßnahmen sehen.

Aktuelle Forschung weist darauf hin, dass Hitzebelastung am Arbeitsplatz mit gesundheitlichen Risiken sowie Produktivitätsverlusten verbunden sein kann und daher verstärkte Anpassungsmaßnahmen im Arbeitsschutz erforderlich macht (Drescher und Janzen 2025).

Um die Auswirkungen zunehmender Hitzebelastungen auf die Beschäftigten zu reduzieren, empfiehlt der Musterhitzeschutzplan für Krankenhäuser des Bundesministeriums für Gesundheit die Umsetzung von Maßnahmen in vier zentralen Handlungsbereichen: Information und Sensibilisierung, Arbeits- und Gesundheitsschutz, Anpassung der Arbeitsorganisation sowie der Schutz besonders hitzeexponierter Beschäftigtengruppen (Bundesministerium für Gesundheit 2024).

2.5 Verbindungen und Wechselwirkungen der Dimensionen

Die identifizierten Dimensionen und ihre jeweiligen Teilaspekte lassen sich in der Literatur nachweisen. Wechselwirkungen zwischen diesen Bereichen werden bislang jedoch nur teilweise systematisch zu einem gemeinsamen Konzept zusammengeführt.

Khalil et al. (2022) identifizieren in ihrer Scoping Review sechs miteinander verbundene Komponenten der Krankenhausresilienz: Räumlichkeiten, Ausrüstung, Personal, Systeme, Strategien und Dienstleistungen. Das Paper betont, dass die Resilienz eines Krankenhauses aus dem Zusammenspiel dieser Komponenten hervorgeht und sowohl bauliche und technische Voraussetzungen als auch personelle, organisatorische und versorgungsbezogene Aspekte umfasst. Auch andere konzeptionelle Ansätze strukturieren Krankenhausresilienz anhand mehrerer Dimensionen, beispielsweise durch die Unterscheidung zwischen baulichen, infrastrukturellen und administrativen Bereichen (Fallah-Aliabadi et al. 2020) oder durch die Betrachtung von Sicherheit, Katastrophenvorsorge, Aufrechterhaltung wesentlicher medizinischer Leistungen und Wiederherstellung beziehungsweise Anpassung Zhong et al. (2014). Diese Ansätze verdeutlichen, dass Krankenhausresilienz nicht auf einzelne strukturelle oder organisatorische Merkmale reduziert werden kann, sondern unterschiedliche Voraussetzungen und Fähigkeiten umfasst, die gemeinsam zur Aufrechterhaltung zentraler Funktionen beitragen.

Darüber hinaus weisen bestehende Arbeiten auf die Bedeutung von Wechselwirkungen zwischen Resilienzfaktoren hin. World Health Organization (2024) und Berg et al. (2018) argumentieren, dass Resilienz im Gesundheitswesen als komplexes und ebenenübergreifendes Phänomen verstanden werden muss, während empirische Untersuchungen häufig auf einzelne Handlungsfelder oder bestimmte Aspekte der Anpassungsfähigkeit fokussieren. Lyng et al. (2022) heben in ihrer qualitativen Untersuchung von Resilienzfähigkeiten im Gesundheitswesen unter anderem die Bedeutung von Steuerung, Koordination, Kommunikation und organisationalem Lernen hervor. Diese Fähigkeiten stehen in engem Zusammenhang mit der Gestaltung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen und lassen sich daher nicht ausschließlich isoliert betrachten. Auch Carbonara et al. (2024) verweisen in ihrer systematischen Literaturübersicht zur Resilienz von Krankenhäusern auf die Notwendigkeit, Ressourcen und organisationale Fähigkeiten sowie deren Zusammenwirken stärker in den Blick zu nehmen. Dabei ist zwischen der konzeptionellen Berücksichtigung von Interdependenzen und ihrer empirischen Untersuchung zu unterscheiden: Dass mehrere Dimensionen als miteinander verbunden beschrieben werden, bedeutet nicht zwangsläufig, dass die konkreten Beziehungen zwischen ihnen systematisch analysiert oder empirisch überprüft wurden.

Eine integrative Systemperspektive ist für die Hitzeresilienz von Krankenhäusern weiterhin erforderlich, da bisherige systemische Resilienzansätze keinen expliziten Bezug zu Hitze als spezifischem Belastungsfaktor herstellen.

Offen bleibt bislang, wie sich die beschriebenen Verknüpfungen von Resilienzdimensionen auf den spezifischen Belastungskontext Hitze übertragen lassen und inwieweit sie die Wechselwirkungen zwischen Organisation und Steuerung, Gebäude und technischer Infrastruktur, Patientenversorgung und klinischen Prozessen sowie Personal angemessen abbilden.

Vor diesem Hintergrund erfolgt im folgenden Kapitel eine empirische Perspektivierung der literaturgestützt identifizierten Dimensionen und Zusammenhänge.

3 Experteninterviews

3.1 Aufbau und Forschungsansatz

Um das theoretische Fundament durch empirisches Praxiswissen zu ergänzen und Umsetzungsbarrieren im Krankenhausalltag zu identifizieren, wurden im Anschluss an die Literaturrecherche leitfadengestützte Experteninterviews durchgeführt.

Der Interviewleitfaden kombinierte strukturierende und offene Fragestellungen und gliederte sich in einen allgemeinen sowie einen bereichsspezifischen Teil. Der allgemeine Teil umfasste neun Fragen, die allen Befragten einheitlich vorgelegt wurden. Er behandelte die individuelle Wahrnehmung der Hitzebelastung im zeitlichen Verlauf, die Bewertung bereits umgesetzter Maßnahmen, die Bekanntheit von Hitzeschutzplänen, organisatorische Zuständigkeiten, wesentliche Umsetzungsbarrieren sowie eine Selbsteinschätzung der Hitzeresilienz des eigenen Hauses inklusive einer Identifikation bestehender Lücken.

Ergänzend wurden bereichsspezifische Fragen entwickelt. Für die Ärzteschaft und die Verwaltung wurden jeweils sechs Zusatzfragen formuliert, während für die Pflege und die Gebäudetechnik jeweils fünf Zusatzfragen integriert wurden. Diese adressierten unter anderem spezifische Risiken bei medizinischen Eingriffen, den pflegerischen Betreuungs- und Dokumentationsaufwand, baulich-technische Anpassungserfordernisse sowie Fragen der strategischen Planung und Finanzierung.

Die Interviews wurden mit Expertinnen und Experten aus dem deutschen Krankenhauswesen durchgeführt. Die Erhebung umfasst insgesamt 14 Interviews mit Vertreterinnen und Vertretern aus vier zentralen Funktionsbereichen des Krankenhauswesens (siehe Tabelle 2). Die Auswahl aller Experten

erfolgte gezielt anhand der Kriterien Führungsverantwortung, fachliche Zuständigkeit und Nähe zu Entscheidungsträgern.

Die methodische Auswertung des Datenmaterials erfolgte regelgeleitet nach der inhaltlich-strukturierenden Qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2018). Das gewählte Verfahren folgt einem sechsstufigen Ablauf, was einer Abwandlung entspricht:

1. **Initiierende Textarbeit und Memos**
   Intensives Sichten aller 14 Transkripte unter Anfertigung fallbezogener Memos (Fallporträts), um die Spezifika der jeweiligen Akteursgruppen kontextuell zu verankern.

2. **Entwicklung der Hauptkategorien**

   - Deduktive Ableitung der Kernkategorien auf literaturbasierten Resilienzdimensionen: *Organisation und Governance* (K1), *Gebäude und Infrastruktur* (K2), *Patientenversorgung* (K3), *Personal* (K4)
   - Induktive Ergänzung weiterer Themenfelder aus dem Material: *Finanzierung* (K5) und *Externe Kooperation und Vernetzung* (K6)

3. **Erster Kodierdurchgang (Grobkodierung)**
   Vollständiges Kodieren des gesamten Textmaterials entlang der sechs Hauptkategorien.

4. **Differenzierung und Subkategorienbildung**
   Induktive Ableitung feingliedriger Subkategorien aus den zusammengestellten Textpassagen zur Präzisierung der Wirkungszusammenhänge.

5. **Zweiter Kodierdurchgang (Feinkodierung)**
   Erneuter Durchlauf des Gesamtmaterials anhand des differenzierten Haupt- und Unterkategoriensystems (K1.x - K6.x).

6. **Ergebnisdarstellung und Visualisierung**
   Ausformulierung der Befunde inklusive direkter Belege und Modellintegration.

In der Analyse liegt der Schwerpunkt bewusst auf akteursübergreifenden Kernthemen und Zusammenhängen. Auf die Einbindung einer eigenständigen Cross-Case-Matrix, welche normalerweise eine zusätzliche Phase des Verfahren von Kuckartz (2018) darstellt, wurde verzichtet, da die vergleichende Betrachtung der vier Akteursgruppen keinen wesentlichen Mehrwert für die Beantwortung der Forschungsfrage lieferte. Zudem erfordert die ungleiche personelle Besetzung der Berufsgruppen im Sample eine zurückhaltende Interpretation gruppenspezifischer Unterschiede.

Die Interviews wurden zwischen Ende Mai und Ende Juni 2026 durchgeführt und dauerten zwischen 30 und 75 Minuten. Die Gespräche wurden aufgezeichnet, softwaregestützt transkribiert, manuell qualitätsgesichert und anschließend pseudonymisiert. Für die Auswertung wurden die Interviewpartner mittels Experten-Identifikatoren (Exp. 1 bis Exp. 14) anonymisiert.

3.2 Auswertung in Bezug auf Resilienzdimensionen

Die inhaltsanalytische Auswertung entlang des Kuckartz- Verfahrens ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der vier literaturbasierten Resilienzdimensionen. Durch die Feinkodierung im zweiten Kodierdurchgang wurden innerhalb der Hauptkategorien spezifische Unterkategorien identifiziert, welche die Wirkungszusammenhänge und Barrieren im Krankenhausalltag detailliert abbilden.

3.2.1 Organisation und Steuerung (K1)

Die organisatorische Dimension beschreibt die strukturelle Verankerung von Hitzeschutzmaßnahmen in den Führungs-, Planungs- und Entscheidungsprozessen. Die Befragung verdeutlicht eine Lücke hinsichtlich des *Verfügbarkeitheit und Bekanntheitsgrads von Hitzeschutzplänen* (K1.1) im operativen Einsatz. Im Behandlungsalltag konsultiert die Ärzteschaft Hitzeaktionspläne in der Regel nicht; therapeutische Anpassungen erfolgen stattdessen ad hoc und erfahrungsbasiert. Auch im Pflegedienst spielen formale Leitfäden eine untergeordnete Rolle; Pflegekräfte agieren im Stationsalltag vielmehr unmittelbar, situativ und heben pragmatische Schutzmaßnahmen (wie Trinkanimation, engmaschige Bilanzierung oder Nackenkühltücher) direkt am Patientenbett hervor (Exp. 2, 10)

Hinsichtlich der *Zuständigkeiten und Steuerungsstrukturen* (K1.2) stellt sich als heterogenes Feld dar zwischen Klinikleitung, Arbeitssicherheit, Technischer Leitung, Qualitätsmanagement und Pflegedienst (Exp. 9, 13, 14). Ein positives Praxisbeispiel bilden Pionierstrukturen mit einem fest etablierten Arbeitskreis Hitze, welcher Verantwortliche aus Arbeitssicherheit, Klimaschutz, Betriebsarzt, Technik, Bau, Pflege und Finanzen an einen Tisch bringt (Exp. 6, 7). In anderen Häusern fehlt eine eindeutig verantwortliche Einzelperson dagegen komplett (Exp. 5, 9, 10, 12).

Bezüglich der *Verankerung im Risiko- und Qualitätsmanagement* (K1.3) fordern Experten verbindliche Standardarbeitsanweisungen und einheitliche Eskalationspfade. Punktuell greift ein bestehendes Critical Incident Reporting System, etwa zur Meldung drohender Sterilitätsverluste im OP oder technischer Überhitzungen (Exp. 1, 9, 12).

3.2.2 Gebäude und technische Infrastruktur (K2)

Die baulich-technische Infrastruktur stellt die physische Voraussetzung für den kontinuierlichen Betrieb dar. Die Auswertung zeigt *Unterschiede zwischen Funktionsbereichen und Normalstationen* (K2.1). Während kritische Kernbereiche wie Operationssäle, Intensivstationen, Laboratorien, Blutbanken und IT-Serverräume flächendeckend gekühlt werden, fehlen auf Normalstationen verlässliche Kühlmöglichkeiten nahezu vollständig (Exp. 1, 3, 5, 12).

Die thermische Innenraumbelastung korreliert eng mit der *Bausubstanz und der Fassadenarchitektur* (K2.2). Ungedämmte Bauten aus den 1970er-Jahren sowie historische Altbauten halten die Sommerhitze über Tage hinweg (Exp. 2, 8). Zudem erzeugen moderne Funktionsbauten durch großflächige Glasfassaden ohne adäquate Außenverschattung einen extremen Wärmestauungseffekt (Exp. 4, 12). Bei extremen Außentemperaturen geraten bestehende Kühlsysteme an physikalische Grenzen, was zu *technischen Störungen und Überhitzungsausfällen* (K2.3) von Medizintechnik und IT-Infrastruktur führen kann (Exp. 1, 8, 9, 13, 14).

3.2.3 Patientenversorgung und klinische Prozesse (K3)

Die Resilienz der Patientenversorgung beschreibt die Aufrechterhaltung der Behandlungsqualität unter Hitzestress. Die Interviews erlauben eine präzise *Identifikation vulnerabler Patientengruppen* (K3.1): geriatrische Patienten mit nachlassendem Durstgefühl (Exp. 2), multimorbide und chronisch

Tabelle 2: Zuordnung der befragten Experten zu den vier Funktionsbereichen

Bereich	Referenznummern
Ärztlicher Bereich (7 Interviews / 9 Personen)	1, 2, 3, 4, 5, 8, 9
Pflege (3 Interviews)	10, 11, 12
Verwaltung (2 Interviews)	6, 7
Gebäude & Technik (2 Interviews)	13, 14

Kranke (Exp. 3, 8), dementielle und immobile Patienten (Exp. 4, 12) sowie chirurgische Patienten mit hohen Flüssigkeitsverlusten (Exp. 2, 3).

Als vorherrschende *klinische Symptomatiken und Prozessanpassungen* (K3.2) berichten die Befragten von gehäuften Exsikkosen, Elektrolytverschiebungen, Nierenfunktionsverschlechterungen, Kreislaufinstabilitäten und Akut-Delirien (Exp. 2, 9).

Bezüglich der *Medikamentensicherheit und Kühlketten* (K3.3) verkürzt sich bei Raumtemperaturen von über 30 °C auf Normalstationen das Stabilitätsfenster für die Zubereitung und Verabreichung hitzeempfindlicher Arzneien (Exp. 4, 12).

3.2.4 Personal und Arbeitsschutz (K4)

Die personelle Dimension erweist sich als zentraler Engpass der klinischen Hitzeresilienz. Die *thermische und physische Belastung* (K4.1) führt bei Schichtarbeit in ungekühlten Räumen sowie beim Arbeiten in Dichtschutzkleidung (z. B. OP Isolierstationen) zu vorzeitiger Erschöpfung und Konzentrationsabfall beim Personal (Exp. 1, 3, 6).

Ein *hitzebedingte Pflegemehraufwand* (K4.2) (z. B. Trinkanimation) trifft auf den strukturellen Fachkräftemangel und urlaubsbedingte Personalengpässe in den Sommermonaten (Exp. 10, 11, 12). Von den Leitungen praktizierte Entlastungsmaßnahmen besitzen überwiegend Ad-hoc-Charakter und umfassen etwa die Bereitstellung von zusätzlichen Trinkwasser und Eis, Nackenkühltücher, Ventilatoren und Coolpacks (Exp. 1, 2, 4, 5, 6, 8, 10, 12).

Zudem zeigen sich deutliche *Defizite bei Schulungen und Wissensvermittlung* (K4.3). Verbindliche Fortbildungsangebote zu Hitzeresilienz und Hitzepathophysiologie fehlen in den Curricula weitgehend (Exp. 1, 7, 9).

3.2.5 Wechselwirkungen der Resilienzdimensionen

Die Analyse verdeutlicht eine enge funktionale Kopplung zwischen den Kerndimensionen der Krankenhausresilienz gegenüber Hitzeereignissen. Besonders deutlich zeigen sich wechselseitige Wirkungszusammenhänge zwischen der baulich-technischen Infrastruktur (K2), der Patientenversorgung (K3) und dem Personal und Arbeitsschutz (K4). Defizite in der Infrastruktur, etwa durch mangelnde Kühlung oder unzureichende Verschattung auf Normalstationen, führen während sommerlicher Hitzeperioden zu erhöhten Innenraumtemperaturen. Dies erhöht insbesondere für vulnerable Patientengruppen die gesundheitliche Belastung und begünstigt das Auftreten hitzebedingter Komplikationen wie Exsikkosen, Elektrolytstörungen oder Akut-Delirien (Exp. 2, 4, 9, 10, 12).

Das vermehrte Auftreten dieser Komplikationen wirkt sich unmittelbar auf die Patientenversorgung aus und führt zu einem erhöhten pflegerischen sowie ärztlichen Betreuungsaufwand. Zusätzliche Maßnahmen wie die Durchführung von Trinkprotokollen, die Flüssigkeitsbilanzierung oder engmaschige Vitalzeichenkontrollen binden personelle Ressourcen und erhöhen die Arbeitsbelastung der Beschäftigten (Exp. 2, 10, 11, 12).

Dieser hitzebedingte Mehraufwand trifft wiederum häufig auf bereits bestehende Personalengpässe, die durch saisonale Urlaubsspitzen und die thermische Belastung der Mitarbeitenden zusätzlich verschärft werden (Exp. 1, 4, 6, 12). In der Folge gerät die Aufrechterhaltung regulärer Behandlungs- und Versorgungsprozesse zunehmend unter Druck, wodurch die Versorgungssicherheit beeinträchtigt werden kann.

Innerhalb dieser Zusammenhänge der Dimensionen übernimmt die Dimension Organisation und Steuerung (K1) eine zentrale Querschnitts- und Koordinationsfunktion (Exp. 7, 9, 11, 12, 14). Fehlen klare Zuständigkeiten oder sind bestehende Hitzeschutzpläne auf operativer Ebene nicht ausreichend bekannt, werden Schutzmaßnahmen überwiegend erfahrungsbasiert und abhängig vom individuellen Engagement einzelner Beschäftigter umgesetzt (Exp. 1, 12, 13). Erst durch die systematische Verankerung des Hitzeschutzes im Risikomanagement können technische, personelle und organisatorische Maßnahmen wirksam miteinander verknüpft werden. Dies ermöglicht eine präventive Abstimmung von Gebäudetechnik, Dienstplanung und Patientenmonitoring und stärkt damit die Resilienz des Krankenhauses gegenüber hitzebedingten Belastungen (Exp. 6, 7, 9, 11).

3.2.6 Induktiv abgeleitete Rahmenbedingungen

Über die vier literaturbasierten Binnendimensionen (K1–K4) hinaus identifiziert die Kuckartz-Analyse zwei übergeordnete, induktiv abgeleitete Rahmenbedingungen, die die Hitzeresilienz von Krankenhäusern beeinflussen und mitgestalten: die Finanzierung und Investitionsfähigkeit (K5) sowie die externe Kooperation und Vernetzung (K6).

Als universelle Hauptbarriere für die Umsetzung von Hitzeschutzmaßnahmen wird einhellig die makroökonomische Finanzierungsstruktur für Krankenhäuser in Deutschland genannt (Exp. 1, 4, 7, 8, 11, 12, 13, 14). Diese Hauptkategorie gliedert sich inhaltlich in zwei zentrale Subkategorien. Hinsichtlich der *Restriktionen der dualen Finanzierung* (K5.1) führt der schrittweise Rückzug der Bundesländer aus der Investitionskostenübernahme zu einem massiven Investitionsstau bei der Kältenachrüstung von Bestandsbauten (Exp. 1, 8, 12). Zudem verstärken der *Ausschluss aus Fördertöpfen und der Reformdruck* (K5.2) diese Problematik, da gemeinnützige und universitäre Kliniken häufig nicht für öffentliche Förderprogramme zur Klimaanpassung antragsberechtigt sind und anstehende Krankenhausreformen Hitzeschutzprojekte weiter zu verdrängen drohen (Exp. 7, 8, 13, 14). Diese finanziellen Restriktionen schränken die Handlungsfähigkeit der Steuerungsebene (K1) in allen Dimensionen drastisch ein.

Als zweite übergeordnete Rahmenbedingung zeigt die Auswertung, dass Hitzeresilienz nicht isoliert innerhalb der Krankenhausmauern entsteht, sondern maßgeblich von der externen Kooperation und Vernetzung (K6) abhängt (Exp. 1,

7, 9, 12, 13, 14). Diese Kategorie umfasst drei spezifische Unterkategorien. Über die *Anbindung an Wetter- und Frühwarnsysteme* (K6.1) dienen die Hitzewarnungen des Deutschen Wetterdienstes als externer Impulsgeber für interne Warn- und Eskalationsketten (Exp. 3, 7, 8, 9, 11, 12). Im Bereich der *Versorgungssteuerung und Regionalkliniken* (K6.2) ist die enge Abstimmung mit Rettungsdiensten, Leitstellen und umliegenden Krankenhäusern bei temporären Kapazitätsengpässen oder temperaturbedingten OP-Absagen unverzichtbar (Exp. 1, 12). Schließlich stärkt die Einbindung in *kommunale Bündnisse und den Katastrophenschutz* (K6.3) – etwa durch städtische Hitzeschutzallianzen, die Nutzung öffentlicher Muster-Hitzeaktionspläne sowie die Teilnahme an länderübergreifenden Übungen wie LÜKEX – die Krisenfestigkeit der Gesamteinrichtung (Exp. 6, 7, 12, 13, 14).

Insgesamt verdeutlichen die Interviews die grundsätzliche Relevanz der im Literaturteil entwickelten Resilienzdimensionen (K1–K4). Dabei weisen sie darauf hin, dass insbesondere Finanzierung (K5) und externe Vernetzung (K6) als übergreifende Rahmenbedingungen verstanden werden müssen, welche die Umsetzung und Wirksamkeit von Maßnahmen in allen Binnendimensionen determinieren.

4 Ableitung eines konzeptionellen Strukturmodells

Die Literaturauswertung und die explorative Analyse der Experteninterviews zeigen übereinstimmend, dass die Hitzeresilienz von Krankenhäusern nicht auf einzelne Maßnahmen oder Funktionsbereiche reduziert werden kann. Vielmehr entsteht sie aus dem Zusammenwirken mehrerer organisatorischer, technischer, klinischer und personeller Faktoren. Vor diesem Hintergrund wird ein konzeptionelles Strukturmodell entwickelt, das die identifizierten Resilienzdimensionen, ihre Wechselwirkungen sowie übergreifende Einflussfaktoren integriert.

Die Literaturauswertung und die Experteninterviews identifizieren vier zentrale organisationsinterne Resilienzdimensionen: Organisation und Steuerung, Gebäude und technische Infrastruktur, Patientenversorgung und klinische Prozesse sowie Personal. Während die Literatur deren konzeptionelle Relevanz begründet, illustrieren die Interviews deren praktische Ausprägung im Krankenhausalltag.

Eine besondere Rolle kommt dabei der Dimension Organisation und Steuerung zu. Die Ergebnisse legen nahe, dass sie eine koordinierende Querschnittsfunktion einnimmt, indem sie die Planung, Priorisierung und Umsetzung von Maßnahmen in den übrigen Dimensionen ermöglicht. Defizite in der baulich-technischen Infrastruktur wirken sich unmittelbar auf die Patientenversorgung und die Belastung des Personals haben können. Umgekehrt beeinflussen personelle Ressourcen maßgeblich die Fähigkeit, hitzebedingte Mehrbelastungen in der Versorgung zu bewältigen. Die Resilienz des Krankenhauses ergibt sich somit nicht aus der isolierten Leistungsfähigkeit einzelner Dimensionen, sondern aus deren Zusammenspiel.

Über diese organisationsinternen Dimensionen hinaus identifiziert die Interviewanalyse zwei weitere Faktoren, die die Hitzeresilienz maßgeblich beeinflussen. Hierbei handelt es sich um die Finanzierung und Investitionsfähigkeit sowie die externe Kooperation und Vernetzung. Beide Kategorien wurden induktiv aus dem Datenmaterial abgeleitet und unterscheiden sich von den vier Kernbereichen dadurch, dass sie keine eigenständigen innerbetrieblichen Funktionsbereiche darstellen. Vielmehr beeinflussen sie die Voraussetzungen zur Umsetzung und Weiterentwicklung von Resilienzmaßnahmen übergreifend in allen Dimensionen. Die Finanzierung wirkt insbesondere auf die Möglichkeit, infrastrukturelle Anpassungen vorzunehmen, personelle Ressourcen bereitzustellen oder organisatorische Maßnahmen dauerhaft zu verankern. Die externe Vernetzung unterstützt hingegen den Zugang zu Frühwarninformationen, die regionale Versorgungskoordination sowie den Wissens- und Ressourcenaustausch mit externen Akteuren. Beide Faktoren werden daher als übergeordnete Rahmenbedingungen des Modells verstanden.

Das daraus abgeleitete konzeptionelle Strukturmodell ist in Abbildung 2 dargestellt. Es beschreibt Hitzeresilienz als das Ergebnis des Zusammenwirkens der vier zentralen Resilienzdimensionen unter dem Einfluss finanzieller und externer Rahmenbedingungen. Zugleich berücksichtigt das Modell Rückkopplungs- und Lernprozesse, durch die Erfahrungen aus Hitzeereignissen zur Weiterentwicklung bestehender Strukturen, Prozesse und Maßnahmen beitragen können. Das Modell erhebt keinen Anspruch auf eine empirische Validierung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen, sondern dient als konzeptioneller Bezugsrahmen zur systematischen Einordnung hitzeresilienzrelevanter Faktoren im Krankenhauskontext.

5 Diskussion

Das aufgestellte Strukturmodell trägt dazu bei, die bislang fragmentierte Betrachtung der Hitzeresilienz von Krankenhäusern zu einem integrativen konzeptionellen Rahmen zusammenzuführen.

Der Mehrwert des entwickelten Strukturmodells liegt dabei weniger in der Identifikation einzelner Resilienzdimensionen, die in der Literatur teilweise bereits beschrieben werden, sondern in deren Integration in einen gemeinsamen konzeptionellen Rahmen. Darüber hinaus ermöglicht die Unterscheidung zwischen organisationsinternen Resilienzdimensionen und übergeordneten Rahmenbedingungen eine differenziertere Betrachtung der Faktoren, die die Hitzeresilienz von Krankenhäusern beeinflussen.

Das konzeptionelle Strukturmodell steht grundsätzlich im Einklang mit bestehenden Konzepten der Krankenhausresilienz, welche Resilienz als Zusammenspiel verschiedener organisatorischer, infrastruktureller und personeller Fähigkeiten beschreiben. Das Arbeitspapier verdeutlicht, dass diese allgemeinen Resilienzansätze für den spezifischen Belastungskontext wiederkehrender Hitzeereignisse konkretisiert werden müssen. Während viele bestehende Modelle primär auf Katastrophen, Pandemien oder plötzliche Störungen ausgerichtet sind (Zhong et al. 2014; Fallah-Aliabadi et al. 2020; Khalil et al. 2022), stellt Hitze einen schleichenden, saisonal wiederkehrenden Belastungsfaktor dar, der sich auf Gebäude, technische Systeme, klinische Prozesse und Beschäftigte auswirkt. Hitzeresilienz kann somit als eine spezifische Ausprägung von Krankenhausresilienz verstanden werden.

Besonders hervorzuheben ist die Rolle der Dimension Organisation und Steuerung. Sowohl die Literaturauswertung als auch die Experteninterviews deuten darauf hin, dass technische, infrastrukturelle und personelle Maßnahmen nur dann wirksam werden können, wenn sie durch geeignete Steuerungs- und Kommunikationsstrukturen koordiniert werden, die Entscheidungsprozesse unterstützen. Die Ergebnisse stützen damit die Annahme, dass Resilienz nicht allein aus verfügbaren Ressourcen entsteht, sondern wesentlich von organisationalen

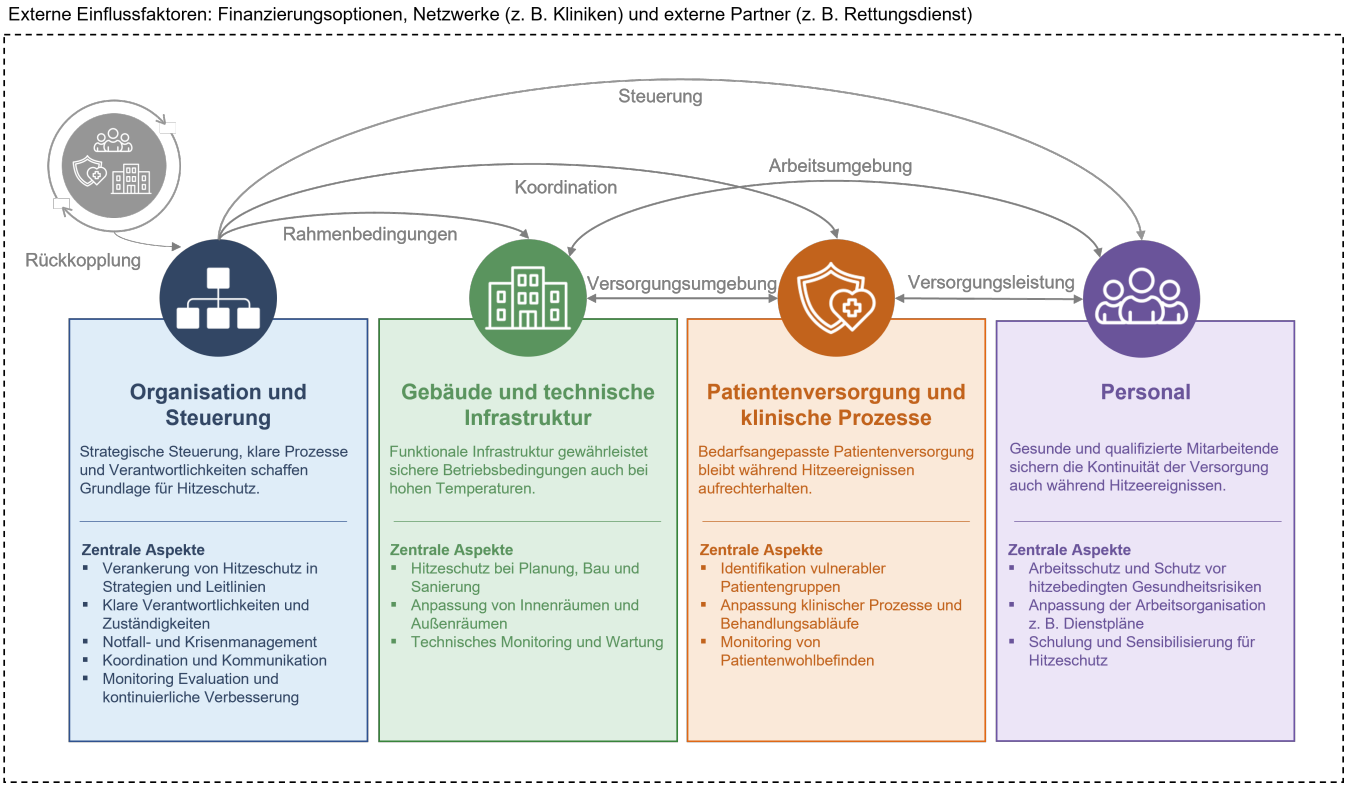


Abbildung 2: Entwickeltes konzeptionelles Strukturmodell zur Hitzeresilienz von Krankenhäusern

Fähigkeiten zur Koordination, Anpassung und zum organisationalen Lernen abhängt.

Finanzierung und Investitionsfähigkeit erweisen sich als besonders relevante Rahmenbedingungen der Hitzeresilienz. Die Bedeutung dieser Kategorie dürfte teilweise auf institutionelle Besonderheiten des deutschen Krankenhauswesens zurückzuführen sein. So obliegt die Finanzierung von Investitionen in die Krankenhausinfrastruktur im Rahmen der dualen Krankenhausfinanzierung grundsätzlich den Bundesländern (§ 9 KHG, Bundesministerium der Justiz (n.d.)). Investitionsengpässe können dadurch die Umsetzung langfristiger Anpassungsmaßnahmen, etwa im Bereich baulicher Hitzeschutz- oder Kühlinfrastruktur, erheblich erschweren.

Die von den Interviewpartnern geschilderten Investitionsengpässe und Finanzierungsrestriktionen deuten jedoch darauf hin, dass notwendige Maßnahmen zur Klimaanpassung und zum Hitzeschutz häufig mit anderen Investitionsbedarfen konkurrieren. Dadurch können gerade langfristige und kapitalintensive Maßnahmen, etwa zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes oder zur Nachrüstung technischer Kühlsysteme, nur verzögert oder gar nicht umgesetzt werden. Hitzeresilienz erscheint damit nicht allein als Frage betrieblicher Entscheidungen, sondern auch als Ergebnis übergeordneter gesundheitspolitischer und finanzieller Rahmenbedingungen.

Gleichzeitig wird durch die Interviews sichtbar, dass Krankenhäuser bei der Bewältigung hitzebedingter Belastungen nicht isoliert agieren, sondern auf funktionierende Frühwarn-, Kommunikations- und Kooperationsstrukturen mit externen Akteuren angewiesen sind. Die Einordnung dieser Faktoren als Rahmenbedingungen verdeutlicht, dass die Hitzeresilienz eines Krankenhauses nicht ausschließlich durch innerbetriebliche Maßnahmen bestimmt wird, sondern auch von institutionellen und systemischen Voraussetzungen beeinflusst wird.

Über den konzeptionellen Beitrag hinaus ergeben sich aus den Ergebnissen Ansatzpunkte für die Entwicklung praxisorientierter Entscheidungs- und Steuerungsinstrumente. Das entwickelte Strukturmodell kann als Grundlage für die Operationalisierung von Hitzeresilienz in Krankenhäusern dienen. Insbesondere die identifizierten Dimensionen, Teilaspekte und Wechselwirkungen bieten Ansatzpunkte für die Entwicklung indikatorbasierter Bewertungsverfahren. Ein solcher Ansatz könnte die systematische Erfassung des Anpassungsstands von Krankenhäusern ermöglichen und Entscheidungsträger bei der Identifikation von Handlungsbedarfen unterstützen. Denkbar wäre beispielsweise die Entwicklung eines Selbstbewertungs- oder Reifegradmodells, in dem die Dimensionen Organisation und Steuerung, Gebäude und technische Infrastruktur, Patientenversorgung sowie Personal anhand definierter qualitativer oder quantitativer Indikatoren bewertet werden. Die im Rahmen der Interviews identifizierten Rahmenbedingungen Finanzierung sowie externe Vernetzung könnten dabei als Kontextfaktoren berücksichtigt werden, welche die Umsetzbarkeit und Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen beeinflussen. Ein solcher indikatorbasierter Ansatz könnte Krankenhäusern helfen, Investitions- und Anpassungsmaßnahmen zu priorisieren und Fortschritte im Aufbau von Hitzeresilienz systematisch zu verfolgen.

Die Ergebnisse dieses Arbeitspapiers sind jedoch vor dem Hintergrund mehrerer Einschränkungen zu interpretieren. Erstens verfolgt die Arbeit einen explorativen Ansatz und erhebt nicht den Anspruch, die dargestellten Zusammenhänge empirisch zu validieren. Das Strukturmodell stellt vielmehr eine konzeptionelle Synthese der Literatur- und Interviewergebnisse dar. Zweitens basiert die empirische Untersuchung auf einer begrenzten Zahl von 14 Experteninterviews. Drittens waren einzelne Berufsgruppen, insbesondere die Ärzteschaft, stärker

vertreten als andere Perspektiven. Die Ergebnisse erlauben daher keine Aussagen über die relative Bedeutung einzelner Dimensionen oder über kausale Wirkungszusammenhänge. Sie sind vielmehr als Ausgangspunkt für weiterführende Forschungsarbeiten zu verstehen, die die identifizierten Zusammenhänge empirisch überprüfen und weiterentwickeln können.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten die im Strukturmodell dargestellten Zusammenhänge empirisch untersuchen und validieren. Insbesondere wäre zu prüfen, welche Dimensionen und Einflussfaktoren den größten Beitrag zur Hitzeresilienz von Krankenhäusern leisten und wie sich deren Wechselwirkungen messen lassen. Darauf aufbauend könnten belastbare Indikatorensets, Reifegradmodelle oder Selbstbewertungsinstrumente entwickelt werden, die sowohl wissenschaftlichen als auch praktischen Anforderungen gerecht werden. Ebenso erscheint die Untersuchung unterschiedlicher Krankenhaustypen, Trägerstrukturen und regionaler Rahmenbedingungen für Deutschland sinnvoll, um die Übertragbarkeit und Differenzierbarkeit des Modells weiter zu verbessern.

Dieses Arbeitspapier fokussiert Hitzeereignisse als spezifischen Belastungsfaktor. Überschneidungen mit etablierten Konzepten des Risiko-, Krisen- und Katastrophenmanagements sowie des Business Continuity Managements wurden bewusst nicht vertieft betrachtet. Gleichwohl deuten die Ergebnisse darauf hin, dass Hitzeresilienz zahlreiche Anforderungen mit Konzepten der organisatorischen Krisenvorsorge, der Aufrechterhaltung kritischer Betriebsfunktionen und der Anpassungsfähigkeit von Gesundheitseinrichtungen teilt. Die Beziehung zwischen Hitzeresilienz, Krankenhausresilienz, Business Continuity Management, Klimaanpassung und Katastrophenresilienz stellt daher einen vielversprechenden Ansatzpunkt für zukünftige Forschungsarbeiten dar.

6 Zusammenfassung

Der Klimawandel führt zu einer zunehmenden Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen, wodurch Krankenhäuser vor die Herausforderung gestellt werden, ihre Versorgungs- und Betriebsfähigkeit auch unter steigenden thermischen Belastungen aufrechtzuerhalten. Ausgehend davon entwickelt das vorliegende Arbeitspapiers ein konzeptionelles Strukturmodell der Hitzeresilienz von Krankenhäusern. Hierfür wurden eine explorative Literaturauswertung mit 14 leitfadengestützten Experteninterviews aus den Bereichen Medizin, Pflege, Verwaltung sowie Gebäude- und Betriebstechnik kombiniert.

Identifiziert wurden vier organisationsinterne Resilienzdimensionen: Organisation und Steuerung, Gebäude und technische Infrastruktur, Patientenversorgung und klinische Prozesse sowie Personal. Hitzeresilienz entsteht dabei aus ihrem Zusammenspiel. Ergänzt werden diese Kerndimensionen durch die Rahmenbedingungen Finanzierung und Investitionsfähigkeit sowie externe Kooperation und Vernetzung. Auf dieser Basis wird ein konzeptionelles Strukturmodell der Hitzeresilienz von Krankenhäusern entwickelt.

Bei der Interpretation der Befunde ist der explorative Charakter der Untersuchung zu berücksichtigen. Das entwickelte Strukturmodell stellt eine konzeptionelle Synthese der Literatur- und Interviewergebnisse dar und wurde nicht empirisch validiert. Darüber hinaus basiert die Untersuchung auf einer begrenzten Zahl von Experteninterviews, wodurch keine Aussagen über kausale Zusammenhänge oder die relative Bedeutung einzelner Einflussfaktoren möglich sind.

Das Strukturmodell bietet eine Grundlage für zukünftige Forschungs- und Operationalisierungsarbeiten. Insbesondere erscheint die Entwicklung indikatorbasierter Bewertungs- und Reifegradmodelle vielversprechend, um den Anpassungsstand von Krankenhäusern systematisch zu erfassen, Handlungsbedarfe zu identifizieren und Entscheidungen zur Priorisierung von Investitions- und Anpassungsmaßnahmen zu unterstützen.

Autorenbeiträge

SR: Ideengenerierung, Literatursuche und -auswertung, Konzeption der Studie, Forschungsdesign, Datenauswertung und -interpretation sowie Schreiben der Veröffentlichung. IH: Ideengenerierung, Konzeption der Studie, Forschungsdesign, Überarbeitung der Veröffentlichung. MA, CA, AK, JS und JNW: Forschungsdesign, Datenerhebung, Durchführung der Interviews und Transkription des Datenmaterials. FS: Überarbeitung der Veröffentlichung. Alle Autorinnen und Autoren haben die finale Fassung des Manuskripts gelesen und freigegeben.

Erklärung zum Einsatz generativer KI

Generative KI-Werkzeuge wurden zur sprachlichen Ausarbeitung des Manuskripts sowie zur Unterstützung der qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz eingesetzt. Dies umfasste insbesondere die Entwicklung von Kodierungsvorschlägen, die Reflexion von Kategorien sowie die Diskussion von Interpretationsansätzen. Die durch KI unterstützte Kodierung des Datenmaterials wurde durch die Autorenschaft überprüft und validiert. KI-Werkezuge wurden außerdem zu Übersetzungszwecken des Manuskripts genutzt. Die Interpretation der Befunde, die Ableitung der Schlussfolgerungen sowie die wissenschaftliche Gesamtverantwortung für den Inhalt des Arbeitspapiers lagen bei der Autorenschaft entsprechend deren deklarierten Beiträge.

Literature Sources/Literaturverzeichnis

Accoe, Kirsten et al. (2023). "Conditions for health system resilience in the response to the COVID-19 pandemic in Mauritania". In: *BMJ Global Health* 8.12, e013943. ISSN: 2059-7908. DOI: 10.1136/bmjgh-2023-013943.

Åström, Christofer et al. (2013). "Heat-related respiratory hospital admissions in Europe in a changing climate: a health impact assessment". In: *BMJ Open* 3.1, e001842. ISSN: 2044-6055, 2044-6055. DOI: 10.1136/bmjopen-2012-001842.

Beckmann, Sabrina Katharina, Michael Hiete und Christoph Beck (2021). "Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments—Analysing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany". In: *Climate Risk Management* 32, S. 100286. ISSN: 22120963. DOI: 10.1016/j.crm.2021.100286.

Berg, Siv Hilde et al. (2018). "Methodological strategies in resilient health care studies: An integrative review". In: *Safety Science* 110, S. 300–312. ISSN: 09257535. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.08.025.

Brooks, Katya et al. (2023). "Heatwaves, hospitals and health system resilience in England: a qualitative assessment of frontline perspectives from the hot summer of 2019". In: *BMJ Open* 13.3, e068298. ISSN: 2044-6055, 2044-6055. DOI: 10.1136/bmjopen-2022-068298.

Bundesministerium der Justiz (n.d.). *Krankenhausfinanzierungsgesetz (KHG)*. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/khg/.

Bundesministerium für Gesundheit (2024). *Bundesempfehlung: Musterhitzeschutzplan für Krankenhäuser*. Bundesempfehlung. Berlin: Bundesministerium für Gesundheit. URL: https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/3_Downloads/H/Hitzeschutzplan/Musterhitzeschutzplan_Krankenhaeuser_BF.pdf.

Carbonara, Nunzia, Roberta Pellegrino und Cristina De Luca (2024). "Resilience of hospitals in an age of disruptions: a systematic literature review on resources and capabilities". In: *Health Systems* 13.3, S. 192–228. ISSN: 2047-6965, 2047-6973. DOI: 10.1080/20476965.2024.2365144.

Council of the European Communities (1989). *Council Directive 89/391/EEC of 12 June 1989 on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work*. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A01989L0391-20081211.

Deutscher Wetterdienst (2025). *Deutschland im Klimawandel: Neues Faktenpapier veröffentlicht*. URL: https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2025/9/28.html.

— (2026). *Klimaprojektionen. Wie wird das Klima in Deutschland in dreißig bis hundert Jahren aussehen?* URL: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel_neu/gestern_heute_morgen/klimaprojektionen/_node.html.

DGKH (2024). *Bauhygienische Maßnahmen zum Hitzeschutz im Krankenhaus: Hitze- und Sonnenschutz vs. Tageslichtversorgung*. Deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene e.V. (DGKH). URL: https://www.krankenhaushygiene.de/pdfdata/2024_07_08_Bauhygienische_Massnahmen_zum_Hitzeschutz_im_Krankenhaus.pdf.

DGKH, SGSH und ÖGHMP (2002). *Guidelines (Draft): Designing and Operating Heating, Ventilation and Air- Conditioning (HVAC) in Hospitals*. URL: https://www.krankenhaushygiene.de/pdfdata/leitlinien/rlt-anlagen_e_gelb.pdf.

Dickson, James M. et al. (2023). "Monitoring temperature variability inside a healthcare facility during an extreme heat event using low-cost sensors". In: *Journal of Hospital Management and Health Policy* 7, S. 22–22. ISSN: 25232533. DOI: 10.21037/jhmhp-23-81.

Drescher, Katharina und Benedikt Janzen (2025). "When weather wounds workers: The impact of temperature on workplace accidents". In: *Journal of Public Economics* 241, S. 105258. ISSN: 00472727. DOI: 10.1016/j.jpubeco.2024.105258.

eClinicalMedicine (2026). "Heatwaves and health system resilience in Europe". In: *eClinicalMedicine* 98, S. 104168. ISSN: 25895370. DOI: 10.1016/j.eclinm.2026.104168.

Fallah-Aliabadi, Saeed et al. (2020). "Towards developing a model for the evaluation of hospital disaster resilience: a systematic review". In: *BMC Health Services Research* 20.1, S. 64. ISSN: 1472-6963. DOI: 10.1186/s12913-020-4915-2.

Fifield, L.J. et al. (2018). "Hospital wards and modular construction: Summertime overheating and energy efficiency". In: *Building and Environment* 141, S. 28–44. ISSN: 03601323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.05.041.

Khalil, Merette et al. (2022). "What is "hospital resilience"? A scoping review on conceptualization, operationalization, and evaluation". In: *Frontiers in Public Health* 10, S. 1009400. ISSN: 2296-2565. DOI: 10.3389/fpubh.2022.1009400.

Kuckartz, Udo (2018). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. 4. Aufl. Weinheim und Basel: Beltz Juventa. ISBN: 978-3-7799-3682-4.

Lyng, Hilda Bø et al. (2022). "Capacities for resilience in healthcare; a qualitative study across different healthcare contexts". In: *BMC Health Services Research* 22.1, S. 474. ISSN: 1472-6963. DOI: 10.1186/s12913-022-07887-6.

Neto, Arlindo Souza Amaral et al. (2026). "From emergency preparedness to organisational maturity: A systematic review of health systems resilience". In: *Health Policy and Technology* 15.10, S. 101318. ISSN: 22118837. DOI: 10.1016/j.hlpt.2026.101318.

World Health Organization (2020). *WHO Guidance for Climate-Resilient and Environmentally Sustainable Health Care Facilities*. 1st ed. Geneva: World Health Organization. 1 S. ISBN: 978-92-4-001222-6.

— (2022). *Measuring the Climate Resilience of Health Systems*. 1st ed. Geneva: World Health Organization. ISBN: 978-92-4-004810-2.

— (2024). *Health system resilience indicators: an integrated package for measuring and monitoring health system resilience in countries*. Geneva: World Health Organization. ISBN: 978-92-4-008898-6. URL: https://iris.who.int/handle/10665/376071.

Zhang, Qi, Guangyi Zhang und Linxue Li (2026). "Conditional Effectiveness of Night Ventilation During Heatwaves: Nonlinear Interactions Among Event Morphology, Thermal Mass and Operating Strategies". In: *Buildings* 16.17, S. 3555. ISSN: 2075-5309. DOI: 10.3390/buildings16173555.

Zhong, Shuang et al. (2014). "Validation of a Framework for Measuring Hospital Disaster Resilience Using Factor Analysis". In: *International Journal of Environmental*

Research and Public Health 11.6, S. 6335–6353. ISSN: 1660-4601. DOI: 10.3390/ijerph110606335.

Zink, Maria et al. (2026). “Heat-related challenges and interventions in hospitals: A future-oriened, qualitative approach to improve nurses’ working conditions”. In: *The Journal of Climate Change and Health* 28, S. 100659. ISSN: 26672782. DOI: 10.1016/j.joclim.2026.100659.

Working Paper Series in Production and Energy

recent issues

No. 82 Moritz Raab, Max Kleinebrahm, Jonathan Vogl, Tim Signer, Jannik Braun, and Wolf Fichtner IIP: Who Adopts Where and When? Electric Vehicle Diffusion with Building-Level Localization in Germany

No. 81 Anthony Britto, Leandra Scharnhorst, Max Kleinebrahm, Wolf Fichtner: Decarbonization of European Industry: Modelling and Open Science (DEIMOS)

Nr. 80 Kira Layer, Stephanie Gutmayer, Thorben Sandmeier, Jonas Ringger, Jan Cermak, Wolf Fichtner: Analyzing the influence of large-scale weather patterns on renewable energy systems: A review

Nr. 79 Jonathan Stelzer, Katharina Esser, Thorsten Weiskopf, Armin Ardone, Valentin Bertsch, Wolf Fichtner: Design Limits and Investment Risks of Mid-Term Storage under Uncertain Market Conditions

Nr. 78 Johannes Schuhmacher: Deutsche Strommärkte während und nach einem Blackout - Ein allgemeinverständlicher Überblick der Prozesse und Verantwortlichen

No. 77 Raphael Heck, Paul Hahn, Frank Schultmann: A georeferenced agent-based model for farmer's decision-making to adopt biorefineries

No. 76 Jonathan Vogl, Max Kleinebrahm, Moritz Raab, Russell McKenna, Wolf Fichtner: A Review of Challenges and Opportunities in Occupant Modeling for Future Residential Energy Demand

No. 75 Sandra Huster, Andreas Rudi, Frank Schultmann, Ralph Schneider, Charlotte Schmidt, Valentin Honold: Abschlussbericht E-Akteur –Akteursbeziehungen in der Kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfung von E-Fahrzeugbatterien

No. 74 Katharina Eberhardt, Amelie Schwärzel, Sonja Rosenberg, Frank Schultmann: Vergleichende Analyse der staatlichen Notfallbevorratung von Lebensmitteln: Strategien und Herausforderungen in Deutschland, der Schweiz und Finnland

No. 73 Sandra Huster, Manuel Droll, Frank Schultmann: Refabrizierte Ersatzteile: Die Perspektive von Kfz-Werkstätten

No. 72 Uwe Langenmayr, Manuel Ruppert: Calculation of Synthetic Energy Carrier Production Costs with high Temporal and Geographical Resolution

No. 71 Daniel Fett, Christoph Fraunholz, Malin Lange: Provision of Frequency Containment Reserve from Residential Battery Storage Systems - A German Case Study

No. 70 Erik Jansen, Julia Schuler, Armin Ardone, Viktor Slednev, Wolf Fichtner and Marc E. Pfetsch: Global Logistics of an Iron-based Energy Network: A Case Study of Retrofitting German Coal Power Plants

No. 69 Christian Will, Florian Zimmermann, Axel Ensslen, Christoph Fraunholz, Patrick Jochem, Dogan Keles: Can electric vehicle charging be carbon neutral? Uniting smart charging and renewables

No. 68 Anthony Britto, Emil Kraft, Joris Dehler-Holland: Steelmaking Technology and Energy Prices: The Case of Germany

No. 67 Anthony Britto, Joris Dehler-Holland, Wolf Fichtner: Wealth, Consumption, and Energy-Efficiency Investments

The responsibility for the contents of the working papers rests with the author, not the institute. Since working papers are of preliminary nature, it may be useful to contact the author of a particular working paper about results or caveats before referring to, or quoting, a paper. Any comments on working papers should be sent directly to the author.

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU)

Hertzstr. 16
D-76187 Karlsruhe

KIT – Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Working Paper Series in Production and Energy
No. 83, November 2026

ISSN 2196-7296