

**Ganzheitliche Bewertung eines  
nachhaltigen Wärmeversorgungssystems mit  
saisonaem Wärmespeicher**

Holistic assessment of a  
sustainable heating system with a  
seasonal heat storage system

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden

eingereicht von  
Dipl.-Ing. Anna-Elisabeth Wollstein-Lehmkuhl  
geboren am 11. Januar 1990 in Quedlinburg

Dresden 2018

## Kurzfassung

Im Zuge der Energiewende in Deutschland gewinnt die nachhaltige Wärmeversorgung an Bedeutung. Die Klimaschutzziele können langfristig nicht nur durch die Reduktion des Energiebedarfs der Gebäude erreicht werden. Die starke Volatilität der erneuerbaren Energien – insbesondere auch der solaren Wärmestrahlung im Jahresverlauf – erschwert jedoch eine versorgungssichere Wärmebereitstellung, da Wärmeerzeugung und Wärmeverbrauch zeitlich verschoben sind. Der Einsatz von saisonalen Wärmespeichern kann diese Verschiebung minimieren, indem die Prozesse voneinander entkoppelt werden.

Die saisonale Wärmespeicherung wurde in den vergangenen Jahren verstärkt im wissenschaftlichen Diskurs aufgegriffen. Der Fokus lag jedoch meist auf einzelnen Aspekten, im Wesentlichen zur Betriebsführung, zur thermischen Auslegung oder zur Wirtschaftlichkeit von Wärmespeichern. Investitionsentscheidungen unterliegen aber einer Vielzahl von Anforderungen der unterschiedlichen Stakeholder sowie weiteren Annahmen und Rahmenbedingungen. In einer zukunftsfähigen Beurteilung müssen nach heutigen Standards die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, der Ökologie, der Ökonomie und der sozialen Verträglichkeit berücksichtigt werden. Projekte müssen ganzheitlich, langfristig und global unter diesen Aspekten beurteilt werden.

Ziel der vorgelegten Arbeit ist eine interdisziplinäre Bewertung und Analyse der Markteintrittsbarrieren eines dezentralen, solarthermisch betriebenen saisonalen Wärmespeichers zur Wärmeversorgung von bestehenden Wohngebäuden unter Berücksichtigung der Interessen der beteiligten Stakeholder. Basis der Untersuchung sind ein Berechnungsmodell der technischen Anlagen sowie ein Geschäftsmodell für die Planung und den Betrieb der Anlage. Bei der Bearbeitung wurden drei Schwerpunkte untersucht. Zentral wurden die monetären Einflussparameter innerhalb einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung identifiziert und unter Berücksichtigung der Interessen möglicher Stakeholder analysiert. Eine zusätzliche Akzeptanzuntersuchung mittels einer Expertenbefragung zeigte die Kenntnisse, die Bereitschaft sowie die Hürden von Investoren auf. Darüber hinaus wurden die Grundlagen und Möglichkeiten einer Ökobilanz anhand der CO<sub>2</sub>-Bilanz des Wärmespeichers beurteilt.

Das aufgestellte Modell, das technische System und die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sind im Ergebnis flexibel an unterschiedliche Eingangsparameter und Zielgrößen anpassbar. Somit können in der zukünftigen Anwendung Modelle mit anderen Randbedingungen untersucht werden. Bei den vorgegebenen Randbedingungen für die Wärmeversorgung mit saisonalen Wärmespeichern stellt sich ein positives Ergebnis ein. Bei der Anwendung müssen jedoch spezifische Rahmenbedingungen, wie beispielsweise der Planungsaufwand, die Bestimmung des Energiebedarfs und die Auslegung der Systemkomponenten inklusive der Wärmeverluste, berücksichtigt werden. Aus ökonomischer Sicht ist das untersuchte regenerative Wärmeversorgungssystem durchaus konkurrenzfähig zu konventionellen Anlagen. Die relative wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit ist für alle untersuchten Stakeholder gegeben. Die Akzeptanzuntersuchung hat ergeben, dass die Speichersysteme häufig bekannt sind, jedoch zum Teil grundlegende Hemmnisfaktoren, wie die hinterfragte Wirtschaftlichkeit, die Mieterstrukturen, der Gebäudebestand oder die geografischen und unternehmensinternen Voraussetzungen, bestehen. Für einen erfolgreichen Markteintritt können beispielsweise effektive und effiziente Förderstrukturen, geeignete rechtliche Rahmenbedingungen sowie Marketing- und Kommunikationsansätze zielführend sein. Eine ökologische Bewertung kann mit der vorhandenen Methodik der Ökobilanzierung unter Berücksichtigung der Systemgrenzen und Wirkungsindikatoren durchgeführt werden. Der Einfluss der Ökobilanz auf den Planungsprozess ist jedoch, wie die Wirtschaftlichkeits- und die Akzeptanzuntersuchung zeigten, durch ökonomische und soziale Faktoren begrenzt.

In der Arbeit wurde für alle drei Aspekte der Nachhaltigkeitsdefinition eine positive Bilanz für den Einsatz von saisonalen Wärmespeichern festgestellt. Die quantifizierten und flexiblen Lösungsansätze ermöglichen zukünftig weitere Markteintrittsbarrieren abzubauen. Entscheidend ist dabei, dass gesellschaftlich und politisch, neben der Effizienz von Gebäuden, ein Fokus auf die regenerative Versorgung im Wärmesektor gelegt wird.

## Abstract

In the context of the energy revolution in Germany, the sustainable heat supply is increasingly important. In long term, climate protection goals cannot only be achieved by reducing the energy demand of buildings. The high volatility of renewable energies, especially the solar heat radiation throughout a year, makes it difficult to provide heat supply, as heat generation and heat consumption are not synchronised. The application of seasonal heat storages can minimise this offset by decoupling the processes from each other.

In the last years this approach was increasingly analysed in the scientific discourse. The focus was mostly on individual aspects, like on operational management, thermal design or economic efficiency of heat storage systems. Investment decisions depend on many requirements of the different stakeholders as well as assumptions and framework conditions. According to latest standards, the three dimensions of sustainability - ecology, economy and social compatibility - must be considered in a sustainable assessment. Under these aspects, projects have to be evaluated on a holistic, long-term and global basis.

The aim of this thesis is an interdisciplinary evaluation and analysis of the market entry barriers of a decentralized solar thermal operated seasonal heat storage for the heat supply of existing residential buildings considering the interests of the involved stakeholders. The investigation is based on a calculation model of the technical systems and a business model for the planning and operation of the system. Three key topics were examined during the research. The monetary influencing parameters were identified within an economic feasibility study and analysed considering the interests of possible stakeholders. An additional acceptance study with an expert survey revealed the knowledge, willingness and hurdles of investors. In addition, the principles and possibilities of a life cycle assessment were assessed based on the CO<sub>2</sub> balance of the heat storage.

The arranged model, in particular the technical system and the economic feasibility study, can be flexibly adapted to different input parameters and target values. Thus, models with different boundary conditions can be analysed in the future application.

Within the prescribed boundary conditions for the heat supply with a seasonal heat storage a positive result could be achieved. However, specific framework conditions, such as the planning effort, the determination of the energy requirement and the design of the system components including heat losses, must be considered during the application. From an economic point of view, the investigated regenerative heat supply system is competitive with conventional systems. The relative economic advantage is given to all investigated stakeholders. The acceptance study has shown that the storage systems are often known, but some fundamental obstacles exist, such as the questioned economic efficiency, the tenant structures, the building stock or the geographical and internal conditions. For a successful market entry, effective and efficient funding structures, suitable legal frameworks as well as marketing and communication approaches can be a solution. An ecological evaluation can be carried out with the existing methodology of life cycle assessment considering the system boundaries and impact indicators. However, the influence of the life cycle assessment on the planning process is limited by economic and social factors, as the economic efficiency and acceptance studies have shown.

The study shows positive results for the application of seasonal heat storages for all three aspects of the sustainability definition. The quantified and flexible solution approaches make it possible to reduce further barriers for the market entry in the future. It is crucial that, in addition to the efficiency of buildings, a focus on social and political aspects is placed on the regenerative supply in the heating sector.