

Temperierte Straße – Machbarkeitsstudie

FA 9.174

Forschungsstelle: Durth Roos Consulting GmbH, Karlsruhe /
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
 Fachgebiet Bauphysik & Technischer
 Ausbau (Prof. Dipl.-Ing. A. Wagner) /
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
 Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen
 (Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. R. Roos) /
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
 Institut für Technische Thermodynamik
 und Kältetechnik (Prof. Dr.-Ing.
 K. Schaber) /

RWTH Aachen, Institut für Straßenwesen
 (Prof. Dr.-Ing. habil. M. Oeser) /

optegra:hkl GmbH & Co. KG, Köln

Bearbeiter: Hess, R. / Kröber, V. / Schulz, T. /
 Abdul-Zahra, A. / Wagner, A. /
 Grafmüller, H. / Karcher, C. /
 Kubanek, K. / Roos, R. / Bücherl,
 M. / Schaber, K. / Steffen, M. /
 Bach, I. / Oeser, M. / Reinold, P.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und
 Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Dezember 2012

1 Aufgabenstellung

Eis- und Schneeglätte in den Wintermonaten wirken sich speziell auf Streckenabschnitten mit mikroklimatischen Besonderheiten (frühe Glättebildung) negativ auf die Verkehrssicherheit aus. Auch die Leistungsfähigkeit einer Straße wird durch klimatische Einwirkungen beeinflusst. Ökonomische und ökologische Einsparungen können durch ein Heizen der Fahrbahn im Winter und Kühlen im Sommer erzielt werden. Hierbei erhöht sich die Lebensdauer der oberen Schichten des Fahrbahnaufbaus und die Anzahl an notwendigen Erhaltungsmaßnahmen im Lebenszyklus einer Befestigung wird verringert.

Vorangegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass die in den Sommermonaten infolge der Kühlung erzielbaren Energiemengen ein Mehrfaches der in den Wintermonaten für die Heizung benötigten Menge betragen. Ausgehend von dieser Erkenntnis wurde für die Temperierung der Straßenkonstruktion eine Einbindung in ein Gesamtsystem angestrebt. Zum einen wird die Straßenbefestigung im Winter geheizt und im Sommer gekühlt, zum anderen wird die überschüssige Energie für die Klimatisierung von angeschlossenen Gebäuden genutzt. Die im Sommer über Sonneneinstrahlung gewonnene Energie wird für die Nutzung im Winter gespeichert. Da die Wärmeübertragung auf niedrigem Temperaturniveau und die Wärmeübertragung bei geringen Temperaturdifferenzen erfolgen können, entsteht ein optimales Verbundsystem aus Straße, Gebäude und Speicher.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie werden die Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz von Geothermie für Straßenbefestigungen untersucht. Ziel ist es ein energieeffizientes Gesamtkonzept Straße-Speicher-Gebäude zu entwickeln und dessen technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit hinsicht-

lich Anlagentechnik, Einbauverfahren und Erhaltung zu bewerten. Dabei wird die Wirtschaftlichkeit über den gesamten zu erwartenden Lebenszyklus abgeschätzt.

Eine Steigerung der Effizienz und damit verbunden die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit wird mit der Einbindung von Gebäuden als zusätzliche Verbraucher in die Anlage zur Temperierung von Straßen sowie der Nutzung von oberflächennaher Geothermie für die Speicherung von Wärme erreicht. Sowohl in wissenschaftlicher als auch technischer Hinsicht werden mit dem vorliegenden Vorhaben Erfahrungen mit der Umsetzung innovativer Ideen zusammengetragen und Abschätzungen für deren Wirkung vorgenommen.

2 Untersuchungsmethodik

Auf der Grundlage labortechnischer Untersuchungen von Baustoffen und Materialien, bestehender Erfahrungen von vorhergegangenen Pilotanlagen und ergänzender Erhebungen von betriebswirtschaftlichen und wärmetechnischen Daten konnte eine Wirksamkeitsanalyse des Gesamtsystems Straße-Gebäude-Speicher durchgeführt werden.

Als Grundlage für die Entscheidung über die Umsetzung einer solchen Anlage wurden Risiken anhand einer Risikoanalyse von Gesamt- und Teilsystemkomponenten der Gesamtanlage identifiziert und für ausgewählte Risiken Vermeidungsstrategien entwickelt.

Zudem wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des ausgewählten Systems hinsichtlich der Nutzen und Kosten durchgeführt.

Durch die Ermittlung geologischer und standortspezifischer Parameter wurden die relevanten Einflussfaktoren für die Standortwahl ausgewertet und für die Analyse möglicher Standorte zusammengestellt.

2.1 Bautechnik

2.1.1 Asphaltkonzept

Um die unterschiedlichen Eigenschaften und Auswirkungen in der Materialauswahl bewerten zu können, wurden labortechnische Untersuchungen durchgeführt.

Bei der Entwicklung des Asphaltkonzepts sind die Wärmeabsorption und die Wärmeleitfähigkeit mit dem Ziel einer besseren Energiegewinnung anzupassen. Dabei ist eine Absorption der Wärmeenergie an der Oberfläche zu optimieren und die Reflexion so gering wie möglich zu halten. Somit muss also ein hoher Absorptionsgrad des verwendeten Materials vorliegen.

Mittels einer Sonnenlichtsimulationsanlage wurden Probekörper aus natürlichen Gesteinsarten untersucht, die sich laut Literatur aufgrund ihrer wärmetechnischen Eigenschaften wie Leitfähigkeiten und Wärmespeicherkapazität am besten zur Energiegewinnung eignen (EOS, Basalt, Gabbro, Granit, Quarzit, Moräne). Des Weiteren wurden mit einem neuen Verfahren zweischichtige Probekörper hergestellt, um die wärmetechnischen

Wechselwirkungen von Deck- zu Binderschicht erfassen zu können.

Materialkenngrößen wie Hohlraumgehalt, Menge an Bindemittel oder Gesteinskörnung wurden ebenfalls untersucht und variiert, um einen Wirkungszusammenhang zu den geforderten Eigenschaften identifizieren zu können.

Die Auswertung der Temperaturverläufe erfolgte mithilfe des einfachen expliziten Differenzenverfahrens für instationäre Wärmeleitprobleme. Die Auswertung ergab unterschiedliche Wärme- und Temperaturleitfähigkeiten.

2.1.2 Rohrregister

Um eine schnelle und gleichmäßige Temperierung der Straßenoberfläche mit möglichst geringen Vorlaufzeiten zu erreichen, müssen Rohrposition und Rohrlage optimal abgestimmt sein. Dies erfolgte anhand einer Auswertung von Informationen zu bestehenden Anlagen (u. a. die Brücke in Berkenthin), Materialuntersuchungen und Eignungsuntersuchungen von Befestigungssystemen in Hinblick auf die Verlegung.

In Bezug auf eine zukünftige großflächige Verlegung und Anwendung der Straßentemperierung sind bei der Einbautechnik vor allem die Gesichtspunkte Praxistauglichkeit und Wirtschaftlichkeit von Bedeutung. Hierzu wurden bestehende Anlagen und Einbausysteme untersucht und bewertet.

2.1.3 Gebäude

Bei der ganzheitlichen Betrachtung der Gebäude wurde entschieden, eine dynamische Simulation auf Stundenschrittbasis für das Gesamtsystem durchzuführen. Dafür wurden im Vorfeld Lastprofile auf Basis von stündlichen Werten für den Heiz- und Kühlenergiebedarf der Gebäude bereitgestellt.

Es wurde eine Auswahl bzgl. der Gebäudetypen getroffen und unter Berücksichtigung einer möglichen zukünftigen Pilotanwendung ein Stadtrand-Szenario (mit Anbindung an eine größere Zubringerstraße o. ä.) anvisiert. Vor dem Hintergrund der nutzungstypischen Lastprofile erschienen als Gebäudetypen ein eingeschossiges Wohngebäude sowie ein dreigeschossiges kleines Bürogebäude als am besten geeignet.

Zur Berücksichtigung einer möglichst großen Bandbreite beim Nutzerverhalten und der damit zusammenhängenden internen Wärmelasten wurden insgesamt acht verschiedene Nutzerprofile erstellt und bei den Simulationen berücksichtigt.

2.1.4 Speichersystem

Zentrales Element des Gesamtsystems ist der Energiespeicher, der allgemein anhand standortspezifischer Faktoren ausgewählt wird. Hierbei gilt es eine maximale Speicherkapazität bei minimalem Volumen zu gewährleisten. Für die hier vorliegende Machbarkeitsstudie wurde ein weitestgehend standortunabhängiger Kies-Wasser-Wärme-Speicher angenommen.

Um die Be- und Entladungsvorgänge im Speicher bewerten zu können, erfolgte ebenfalls eine Simulation. Hierbei wurde der Speicher eindimensional betrachtet, in gleich große quaderför-

mige Segmente unterteilt und für jedes eine Energiebilanz aufgestellt. In der Energiebilanz sind zwei Mechanismen des Energietransports enthalten. Diese sind Wärmeleitung und Konvektion. Als Lösungsverfahren für das Gleichungssystem wurde ein Vorwärtsdifferenzen-Verfahren angewendet.

2.2 Steuerungstechnik

Infolge der unterschiedlichen Anforderungen, die aus den klimatischen Einwirkungen im Winter und Sommer resultieren, ergibt sich ein Systemaufbau, der in einen Winter- und Sommerbetrieb gegliedert ist.

Für den Winterbetrieb muss eine genügend große Wärmemenge bei ausreichend hoher Temperatur durch den Wärmespeicher bereitgestellt werden. Durch eine geeignete Regelung der Straßenheizung wurde so die Betriebszuverlässigkeit sichergestellt.

Die Regelung im Sommerbetrieb wird so eingestellt, dass die Straßentemperierung immer dann in Betrieb ist, wenn Wärme abgeführt werden kann. Dies gilt dann, wenn die Temperatur des untersten Inkrements der Asphaltüberdeckung höher ist als die aktuelle Speichertemperatur.

Im Rahmen der Simulation des Gesamtsystems können wichtige Einflussgrößen für den Betrieb der Straßentemperierung und die Größe des saisonalen Wärmespeichers identifiziert werden. Des Weiteren kann ein Gesamtsystem aus Straße, Gebäude und Niedertemperaturwärmespeicher simuliert werden.

2.3 Energiehaushalt

Der Energiehaushalt des Gesamtsystems, bestehend aus den Anteilen Straße, saisonaler Wärmespeicher und Gebäude, teilt sich in dieser Machbarkeitsstudie in zwei Anteile auf: primäre und sekundäre Energien.

Als primäre Energie wird die vor Ort gewonnene thermische Energie bezeichnet, die zwischen Speicher und der Straße, sowie zwischen den Gebäuden und dem Speicher übertragen wird. Sekundäre Energie hingegen umfasst weitgehend die elektrische Hilfsenergie, welche beispielsweise zum Betrieb der Pumpen und der Messtechnik verwendet wird.

2.4 Finanzierungsmodelle

Aufgrund der Rahmenbedingungen einer Finanzierung wurde die Anlage in zwei Investitionsobjekte unterteilt, die getrennt voneinander zu betrachten sind.

Das Investitionsobjekt 1 besteht aus der Straße mit dem integrierten Asphaltkollektor und dem thermischen Niedertemperaturspeicher. Das Investitionsobjekt 2 besteht aus Komponenten, die sich unmittelbar in der Nähe des Verbrauchers befinden müssen. Dies sind die Wärmepumpe, die Absorptionskältemaschine und der Kollektor.

Für die unterschiedlichen Investitionsobjekte wurden variierte Finanzierungsmodelle aufgestellt und ein mögliches Vertragsmodell vorgeschlagen.

2.5 Risikoanalyse

Je nach Planung und Entscheidung gehen mit der Realisierung entsprechende Risiken einher, die das Projekt beeinträchtigen können. Zur Analyse der Risiken wurde ein Scoring-Verfahren angewendet. Dies bietet bei vielen verschiedene Risiken und Kennzahlen eine hohe Flexibilität und ermöglicht gleichermaßen eine Risikoidentifikation und Risikobewertung.

Das Augenmerk in der vorliegenden Studie lag auf dem Objekt bzw. den einzelnen Anlagenteilen und den Risiken, die eine Minderung der Betriebssicherheit der Anlage oder der Verkehrssicherheit für die Verkehrsteilnehmer nach sich ziehen können.

Bei der Betriebssicherheit der Anlage wurden die einzelnen Komponenten auf ihre Ausfallsicherheit untersucht und zudem alle Risiken, die einen Ausfall der Anlage zur Folge haben können.

Die identifizierten Risiken wurden in Hinblick auf die Auswirkungsintensität bei deren Eintritt bewertet. Zudem konnten für die meisten Risiken Vermeidungs- oder Kompensationsstrategien erarbeitet und für die Planung einer Pilotanlage vorgeschlagen werden.

2.6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden die Kosten der einzelnen Anlagenteile getrennt ermittelt, da sich aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsdauer der Einzelelemente Kostenpunkte zu unterschiedlichen Zeitpunkten ergeben (Erneuerung von Systemkomponenten).

Der Betrachtungszeitraum wurde mit 30 Jahren angenommen und schließt so die maßgeblichen Nutzungsdauern der Fahrbahn und des Speichersystems ein.

Um eine Berechnung der Nutzen und Kosten vornehmen zu können, wurde das Berechnungsmodell in mehrere Einzel- und ein Gesamtmodell gegliedert. Die Einzelmodelle wurden jeweils für die einzelnen Systemkomponenten angelegt und sind erst einmal unabhängig voneinander. Die Ergebnisse aus den Einzelmodellen wurden abschließend in einem übergeordneten Gesamtmodell zusammengeführt.

Tabelle 1: Nutzen

Nutzen	Beschreibung
Volkswirtschaftlich	Zeitverlustkosten
	Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge
	CO ₂ -Ausstoß der Fahrzeuge
	Ausgebrachte Streustoffmenge

Tabelle 2: Kosten

Kosten	Beschreibung
Betriebswirtschaftlich	Investitionskosten
	Wartungskosten
	Betriebskosten
	Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen (Straße)
	Erneuerungskosten

2.7 Standortanalyse

Um die Auswahl von Standortalternativen für das Pilotprojekt vorzubereiten, wurden diejenigen Standortfaktoren betrachtet, welche für die (wirtschaftliche) Realisierung und weitere Prüfung wesentlich sind.

Grundsätzlich wurde zwischen drei Arten von Kriterien unterschieden:

- Ausschlusskriterien (Projekt kann nicht realisiert werden)
- Zu prüfende Kriterien (limitierende Standortfaktoren; können zum Ausschluss führen)
- Planungsrelevante Kriterien (planungsrelevante Standortfaktoren; nur für die Planung der Anlage von Bedeutung)

Für jeden Standort ist nach dessen Bestimmung eine konkrete Feinplanung mit spezifischen Randbedingungen vor Ort erforderlich, dennoch kann die erstellte Checkliste einen Anhaltspunkt zur Vorauswahl eines Standorts bieten.

3 Untersuchungsergebnisse

Die Anforderung bestand darin, eine optimale Kombination aus Wärmeleitfähigkeit sowie Absorptionsfähigkeit des Asphalt herzustellen. Ein Splittmastixasphalt mit einer dunklen Abstreuerung an der Oberfläche stellte sich als bestes Asphaltkonzept heraus. Die Auswertung der Differenzverfahren bestätigte, dass prinzipiell eher Gesteinsmaterialien mit geringer Rohdichte zu verwenden sind, da diese meist eine höhere Leitfähigkeit besitzen.

Die in der Binderschicht eingebetteten Rohrregister wurden aufgrund einer Materialanalyse von auf dem Markt befindlichen Materialien ausgewählt. Hier erwies sich ein Aluminium-Kunststoffverbundrohr infolge der guten Wärmeleitfähigkeit und Flexibilität für den Einbau als geeignet.

Im Hinblick auf die Zielsetzung, die im Sommer gewonnene Wärme im Winter über die Straßenheizung hinaus bestmöglich nutzen zu können, wurden Lastprofile verschiedener Gebäudearten/-typen erstellt. Anhand dieser Profile ergab sich der optimale Nutzen bei einer Kombination aus Wohn- und Bürogebäuden.

bundmaterial zur geeigneten Kombination der erforderlichen Eigenschaften. In Hinblick auf die möglichst weitgehende Automatisierung des Einbaus der Temperierungsregister sind weitere Anpassungen der Temperierungsregister und der Einbautechnik erforderlich. Statt in Form von starren Platten sollten aufrollbare "Temperierungsmatten" entwickelt werden. Um die Gitterstruktur ausreichend flexibel zu gestalten und ein Auf- und Abrollen zu ermöglichen, kann die Verwendung eines modifizierten Geogitters als Trägerstruktur in Betracht gezogen werden.

Da in diesem Forschungsvorhaben der Einbau eines Rohrsystems in den Asphalt nur theoretisch betrachtet wurde, sind weitere praktische Untersuchungen auf diesem Gebiet sinnvoll.

Die in dieser Machbarkeitsstudie weitestgehend ortsunabhängige Lösung mit dem betrachteten Kies-Wasser-Wärmespeicher ist aufgrund der hohen Investitionskosten bislang nicht wirtschaftlich. Somit ist das entscheidende Potenzial zur wirtschaftlichen Nutzung über die Minimierung der Speicherkosten zu sehen. Eine Realisierung sollte nur erfolgen, wenn eine wirtschaftliche Nutzung eines natürlichen Speichers in Kombination mit der Standortauswahl möglich ist. Um die Umsetzung einer Pilotanlage wirtschaftlich gestalten zu können, ist es notwendig, durch eine detaillierte Standortanalyse ein optimales Speicherkonzept zu erstellen.

Eine Temperierte Straße ist technisch möglich und bei einer Lebenszyklusbetrachtung wirtschaftlich umsetzbar. Hohe Investitionskosten für den Speicher und geringe Einnahmen durch die Vermarktung der Energie führen jedoch dazu, dass eine starke Beteiligung der öffentlichen Hand als Besitzer und Betreiber der Verkehrsfläche erforderlich bleibt. Die vorliegende Machbarkeitsstudie zeigt die Möglichkeiten und Grenzen der geothermischen Energiespeicherung auf und stellt zugleich die Rahmenbedingungen für die Realisierung einer Temperierten Straße dar.