

# Korrosion in Heiz- und Kühlsystemen

Leuphana Universität Lüneburg und SIZ energie+ erarbeiten Qualitätsstandards und Werkzeuge

*Im Bereich effizienter Energiesysteme wurden in den zurückliegenden Jahrzehnten enorme Fortschritte erzielt. Heiz- und Kühlsysteme änderten sich grundlegend. Neue Materialien, hocheffiziente Pumpen und voreinstellbare Ventile mit Spaltmaßen im Mikrometerbereich verursachen teils aber auch neuartige, vorher nicht gekannte Komplikationen, die sich häufig auf Korrosionsprozesse zurückführen lassen. Derzeitige Normen und technische Regeln bilden diese neuartigen Fälle nicht adäquat ab und werden daher aktuell überarbeitet. Die Leuphana und das SIZ energie+ untersuchen im Rahmen des Forschungsprojekts „EQM:Hydraulik“ Schadensfälle und erproben Maßnahmen gegen Korrosion sowie für die Qualitätssicherung in TGA-Systemen.*



Dr. rer. nat.  
Oliver Opel,  
wissenschaftlicher  
Mitarbeiter,  
Leuphana Universität,  
Lüneburg



Dipl.-Ing.  
Mani Zargari,  
wissenschaftlicher  
Mitarbeiter,  
Projektleiter  
SIZ energie+



Dipl. Umweltwiss.  
Tanja Eggerichs,  
wissenschaftliche  
Mitarbeiterin,  
Leuphana Universität,  
Lüneburg



Dr.-Ing.  
Stefan Plesser,  
stellvertretender  
Leiter  
SIZ energie+



MSc. Tobias Otte,  
wissenschaftlicher  
Mitarbeiter,  
Leuphana Universität,  
Lüneburg



Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Wolfgang K. L. Ruck,  
Projektleiter,  
Leuphana Universität,  
Lüneburg



BSc. Marlies Wiegand,  
wissenschaftliche  
Mitarbeiterin,  
Leuphana Universität,  
Lüneburg



Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
M. Norbert Fisch,  
Leiter  
SIZ energie+

## 1. Das Problem:

### Korrosion in Heiz- und Kühlanlagen

Der Trend im Bau von Heiz- und Kühlsystemen geht hin zu Flächenübergabesystemen und modernen Installationen mit Pressverbindungen und Kunststoffbauteilen. Dies hat einige Vorteile bei der Installation und für die

Wärme- bzw. Kälteübergabe, besonders in Niedrigexergiesystemen. Derartige Systeme lassen im Gegensatz zu klassischen Anlagen jedoch oft einen geringfügigen Eintritt von Sauerstoff zu. Das kann dazu führen, dass dauerhaft Korrosionsprozesse ablaufen – zunächst unbemerkt. Die Folgen können Effi-

zienz- und Leistungseinbußen sein, die von verstopften Ventilen und Teilbereichen (z. B. Kapillarrohrrmatten), Pumpen sowie Belägen auf Wärmetauschern herrühren. Mit entsprechenden Folgen für die Nutzung ist im schlimmsten Fall die Versorgung mit Wärme und Kälte in den betroffenen Bereichen nicht mehr möglich.

Diese Effekte waren von klassischen Heizungsanlagen nicht bekannt. In geschlossenen Anlagen aus Schwarzstahl ist anfänglich enthaltener Sauerstoff nach kurzer Zeit aufgebraucht. Die bei geringen Sauerstoffkonzentrationen ablaufenden Korrosionsreaktionen erhöhen den pH-Wert und werden daher stark verlangsamt.

In modernen Anlagen besteht zunehmend das Risiko, dass diese schützenden und stabilisierenden Effekte nicht eintreten und die Systeme Schaden nehmen.

## 2. Grundlagen und Projektinhalte

Die Chemie der einzelnen Korrosionsreaktionen wird weithin als bekannt angesehen. Beachtet werden muss vor allem, dass die für Korrosionsreaktionen ausschlaggebenden Oberflächenpotenziale nicht mit denen der Reinmetalle identisch sind. Verantwortlich ist hierfür die Bildung von Deckschichten an Edelstählen, Kupfer, Messing und Aluminium. Diese hemmen Korrosionsprozesse durch ihre Eigenschaft als Diffusionsbarriere und durch ein meist erhöhtes Oberflächenpotenzial. Dadurch wirken die Metalle edler als sie eigentlich sind und die Potenzialdifferenzen zwischen den einzelnen Metallen verringern sich.

Die Menge eintretenden Sauerstoffs und andere Parameter sind dabei für die Korrosion ausschlaggebend, aber auch für die Deckschichtbildung. Die Bedin-



Abbildung 1: Mobile Messeinheit zur Erfassung von pH-Wert, Redoxpotenzial, Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt und Temperatur als korrosionsrelevante Parameter  
Foto: Leuphana

gungen in den Heiz- und Kühlanlagen verändern sich: durch Prozesse bei der Lagerung und Verarbeitung des Materials, bei Druckprüfung und Inbetriebnahme sowie im weiteren Betrieb, durch Aufheizung, Abkühlung, Stillstand und Nachspeisung. Dabei werden unterschiedliche Deckschichten gebildet oder angegriffen, umgewandelt und in Mischphasen abgeschieden. Auch zu hohe Partikelfrachten können durch Abrasion Deckschichten schädigen.

Das Forschungsprojekt „EQM:Hydraulik“ widmet sich deshalb aktuell der Untersuchung verschiedener Anlagentypen und der auftretenden Korrosionsprozesse sowie den Werkzeugen für ein Qualitätsmanagement in diesem Bereich.

### 3. Methoden

Im Projekt werden eine Umfrage<sup>1</sup> sowie wasserchemische Untersuchungen und Analysen der Anlagentechnik im Rahmen einer Feldstudie durchgeführt. Die für ein Korrosionsmonitoring relevanten Vor-Ort-Parameter werden mit einer hierfür entwickelten mobilen Messeinheit erfasst (siehe Abbildung 1). Weiterhin werden Proben entnommen und im Labor untersucht: auf Eisen, Mangan, Kupfer, Zink und andere Legierungsmetalle als Korrosionsprodukte und auf die Härtebildner Calcium, Magnesium sowie Natrium, Chlorid, Nitrat und Sulfat als weitere, für Korrosion und Belagbildung relevante Parameter. Außerdem werden organische Wasserinhaltsstoffe sowie Art,

Anzahl und Stoffwechselprozesse der Bakterienfauna untersucht. Zur Erfassung der mikrobiellen Abläufe werden DNA-Untersuchungen durchgeführt.

### 4. Bisherige Ergebnisse

Die bisherigen Ergebnisse bestätigen die Vermutung, dass hauptsächlich eindringender Sauerstoff zu Korrosion in Anlagen aus Schwarzstahl führt und die Deckschichtbildung hemmt. Ein weiteres Problem sind

durch Mikroorganismen verursachte Prozesse.

#### 4.1. Materialeigenschaften, Deckschichtbildung und Unverträglichkeiten

Schwarzstahl bildet aufgrund der porösen Struktur der meisten Eisenoxide bei Anwesenheit von Sauerstoff in der Regel keine korrosionshemmende Deckschicht. Nur im sauerstoffarmen und alkalischen Bereich kann eine Deckschicht aus Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) die Korrosion hemmen. Wurde eine Magnetit-schicht gebildet, steht diese bei eintretendem Sauerstoff im Gleichgewicht mit dem ebenfalls eine dichte und damit korrosionsschützende Spinellstruktur aufweisenden Magnetit  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  [Huber 2004]. Zink bildet in sauerstoffreichem Wasser Deckschichten aus Zinkoxid  $\text{ZnO}$ , das jedoch weniger gut gegen Korrosion schützt als Zinkcarbonat  $\text{ZnCO}_3$ . Die Deckschichten aus Zinkoxid wandeln sich im sauerstoffarmen Wasser zu Zinkhydroxid  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  um, das kaum noch gegen Korrosion schützt [Fenster 2009]. Kupferdeckschichten sind im sauerstoffarmen, alkalischen Milieu meist stabil. Unter Sauerstoffeinfluss kann weiter Korrosion auftreten, besonders wenn die Deckschichtbildung lokal gestört ist. Zudem sind diese Deckschichten jedoch wie Edelstähle durch Reduktion angreifbar, beispielsweise durch Chlorid oder mikrobielle Korrosion. Das gilt auch für Messing, das Zink und Kupfer freisetzen kann. Die oft verwendeten Messingfittings (Abbildung 2) haben jedoch im Vergleich zu den restlichen Anlagenkomponenten kleine



Abbildung 2: Messingfitting in einer Anlage aus verzinktem Schwarzstahl

Foto: SIZ energie+

Oberflächen und hohe Wandstärken, sodass die Menge freigesetzter Metallionen und Korrosionsprodukte verhältnismäßig gering bleibt und wenig Schaden entsteht.

Darüber hinaus sollten Kupfer und Eisenmetalle möglichst nicht kombiniert werden, da Eisen(III)-Partikel Kupfer oxidieren können und Kupferoxide wiederum Eisen.

Auch hinsichtlich der Wasserqualitäten unterscheiden sich die Metallreaktionen: Mit Carbonat bildet neben Zink auch Kupfer (Malachit  $\text{Cu}_2[\text{CO}_3](\text{OH})_2$ ) korrosionsschützende Deckschichten, in die auch Fremdionen wie Sulfat eingelagert werden können. Auch Eisen bildet als Vorstufe des korrosionsschützenden Magnetits Mischphasen aus  $\text{Fe}^{2+}$ - und  $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen mit Hydroxidionen, sogenannten „green rust“, in die Carbonat-, aber auch Chlorid- und Sulfationen eingelagert werden können [Guilbaud 2013].

Während sauerstoffarmes und alkalisches Milieu (pH 8,5 - 9,5) für alle Eisenmetalle und Kupfer korrosionshemmend wirkt, eignen sich Wässer mit einem pH-Wert von über 8,5 nicht für Aluminiumbauteile.

## 4.2. Einfluss des Füllwassers

Beim Füllwasser ist zu unterscheiden zwischen:

- nicht aufbereitetem, dem Städtetz entnommenem Leitungswasser,
- enthärtetem Wasser,
- vollentsalztem Wasser oder
- mit Korrosionsschutzmitteln und härtebindenden oder sauerstoffbindenden Zusätzen behandeltem Wasser.

Bei einer Entscheidung zugunsten einer Wasserbehandlung mit Korrosionsschutzmitteln sollte darauf geachtet werden, dass diese nur auf sauberen Oberflächen wirksam vor Korrosion schützen. Vor dem Einsatz ist daher eine chemische Reinigung zu empfehlen. Eine falsche Wasserbehandlung kann dabei mehr Schaden anrichten als nützen und mikrobiologisches Wachstum fördern.

Für Heizungsanlagen muss in jedem Fall auf den Härtegrad geachtet werden, um Kalkausfällungen zu vermeiden. Auch hartes Nachspeisewasser kann zu Ausfällungen führen.

Zu hartes Wasser sollte daher aufbereitet oder zum Teil mit aufbereitetem Wasser versetzt werden. Enthärtetes und vollentsalztes Wasser enthält direkt nach der Aufbereitung einen erhöhten Anteil an freier Kohlensäure und weist daher einen geringeren pH-Wert auf. Dieser wirkt zunächst potenziell korrosionsfördernd. Jedoch besitzt vollentsalztes Wasser gegenüber enthärtetem Wasser eine geringere Leitfähigkeit, was sich wiederum hemmend auf Korrosionsprozesse auswirkt. Auch bestimmte durch Mikroorganismen verursachte Prozesse werden durch das Fehlen wichtiger Nährsalze gehemmt.

## 4.3. Mikrobiologische Prozesse

Mikrobiologische Prozesse können ebenfalls zu Korrosion führen – zu so genannter mikrobiell induzierter Korrosion. Hierbei greifen verschiedene Stoffwechselprozesse ineinander. Besonders korrosiv wirkt elementarer Schwefel, der durch sulfatredu-

zierende Bakterien gebildet werden kann [Opel 2014]. Allgemein können Biofilme durch höhere Salzkonzentrationen und geringere pH-Werte lokal Korrosion auslösen und durch ein reduzierendes Milieu Oxiddeckschichten aller verwendeten Metalle angreifen.

Ausschlaggebend ist die Nährstoffverfügbarkeit. Vor allem organischer Kohlenstoff fördert das Bakterienwachstum. Dieser kann aus Verunreinigungen, aus Leaching aus bestimmten Komponenten und gegebenenfalls aus Inhibitoren stammen.

Abbildung 3 zeigt die Analyse der Stoffwechseltätigkeit einer Bakteriengemeinschaft in einem Gebäude-Kühlsystem. Es zeigt sich eine Vielzahl an Stoffwechselprozessen, unter anderem mögliche Eisenoxidation und Sulfatreduktion.

## 4.4. Korrosionsmessung

Die Leuphana hat ein neuartiges Verfahren entwickelt, mit dem sich Korrosionsprozesse in technischen Anlagen quantitativ überwachen lassen. Das Verfahren verwendet das Redoxpotenzial, den pH-Wert, den Sauerstoffgehalt, die Leitfähigkeit und die Temperatur, um die Aktivität der aus Korrosionsprozessen stammenden  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen (siehe Abbildung 4) und die Geschwindigkeit der Bildung von Korrosionsprodukten zu bestimmen. Bislang war dies nicht möglich, da hierzu grundlegende thermodynamische Daten des Eisen(III)-Löslichkeitsprodukts und des Autoprotolyseprodukts des Wassers fehlten [Opel 2014]. Das bereits in anderen Umgebungen erfolgreich getestete Verfahren wird im Projekt „EQM:Hydraulik“ erstmals im Gebäudewesen angewendet und auf seine Praxistauglichkeit getestet. Besonderer Vorteil des Verfahrens ist die große Informationsdichte, die aus den Einzelparametern gewonnen werden kann. Bestimmt werden können der wasserchemische Zustand und die Korrosionsrate des Systems. Weiterhin kann auf Ursachen geschlossen werden, beispielsweise zu geringer pH-Wert, Sauerstoff im System, zu hohe Salzkonzentrationen oder mikrobielle Korrosion. Dabei wird als weitere Neuheit nicht die Korrosionsspannung an einem einzelnen Bauteil oder Coupon gemessen, sondern alle Vorgänge im System werden über eine wasserchemische Auswertung erfasst. Das Verfahren ist auch in Prozesswässern und mit Inhibitoren anwendbar.

## 4.5. Gegenmaßnahmen

Filter sind neben der Wasserbehandlung die häufigsten anlagentechnischen Maßnahmen, um Feststofffrachten zu reduzieren. Sie

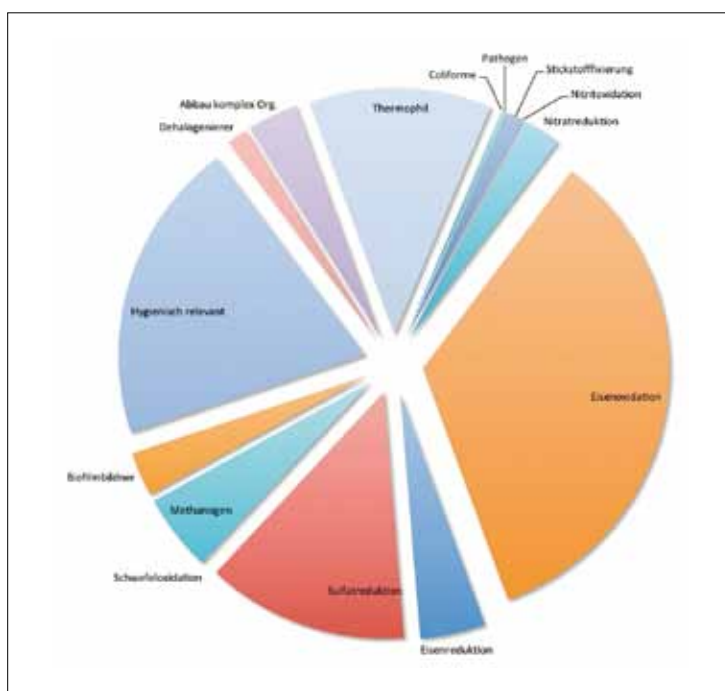


Abbildung 3:  
Auswertung  
der Stoffwechsel-  
prozesse  
der Bakteriengemeinschaft  
in einem Gebäude-  
Kühlsystem  
Grafik: BlueBiolabs



werden entweder in-Line oder im Bypass verbaut und sind mit verschiedenen Maschenweiten ausgeführt. Magnetfilter nutzen die ferromagnetische Eigenschaft des Minerals, um Partikel ohne Druckverlust auszufiltern. Bauteile wie Ventile und Pumpen können dadurch geschützt werden. Derartige Maßnahmen wirken aber im Regelfall nicht den Ursachen der Korrosion entgegen. Dies gilt auch für Entgasungsautomaten. Sie werden eingesetzt, um Gasansammlungen zu vermeiden, die sich durch eindiffundierende Luft bilden können. Durch Korrosionsprozesse kann der Sauerstoff aufgezehrt werden und Inertgase (hauptsächlich Stickstoff) können zurückbleiben. Sie führen aber zu einem kontinuierlichen Gasaustausch mit der Atmosphäre. Weitere Maßnahmen sollen im Projekt erprobt werden, beispielsweise Spülung und Korrosionsschutz sowie Filter mit integrierter Wasseraufbereitung bzw. -behandlung.

## 5. EQM: Energie- und Qualitätsmanagement

Auf Grund der zunehmenden Komplexität der Gebäudekonzepte und der eingesetzten Technologien kommt der Qualität in der Planung, der Ausführung und der Betriebsführung eine immer größere Bedeutung zu. Dies gilt sowohl für die Energieeffizienz, für die Funktionssicherheit als auch für die Wirtschaftlichkeit eines Gebäudes. Moderne Methoden und Werkzeuge des Energie- und Qualitätsmanagements helfen dabei, die Performanceziele zu sichern und Gebäude energieeffizient, komfortgerecht und wirtschaftlich zu betreiben [Plesser 2015a/b].

Auch für den Betrieb hydraulischer Anlagen ist das Energie- und Qualitätsmanagement eine wichtige Komponente. Bereits in der Ausführungsplanung und der Werk- und Montageplanung sollte ein Systemcheck in Bezug auf Korrosionsrisiken durchgeführt werden. Auch die Inbetriebnahme und Abläufe auf der Baustelle können den späteren Betrieb beeinflussen und sollten daher lückenlos dokumentiert werden – ebenso alle eingeleiteten Korrosionsschutz-Maßnahmen. Beim Auftreten von Korrosion wird oftmals eine Vielzahl von Problemlösungsansätzen versucht. Die Rückverfolgbarkeit von Maßnahmen und damit eine präzise Ursachenforschung werden dadurch allerdings erschwert.

Noch mehr Sicherheit im Fall des Betriebs hydraulischer Anlagen kann ein Korrosionsmonitoring bieten, ähnlich dem Energiemonitoring im Rahmen der Gebäudewirtschaftung. Dazu werden im Projekt „EQM:Hydraulik“ eine Überwachung was-

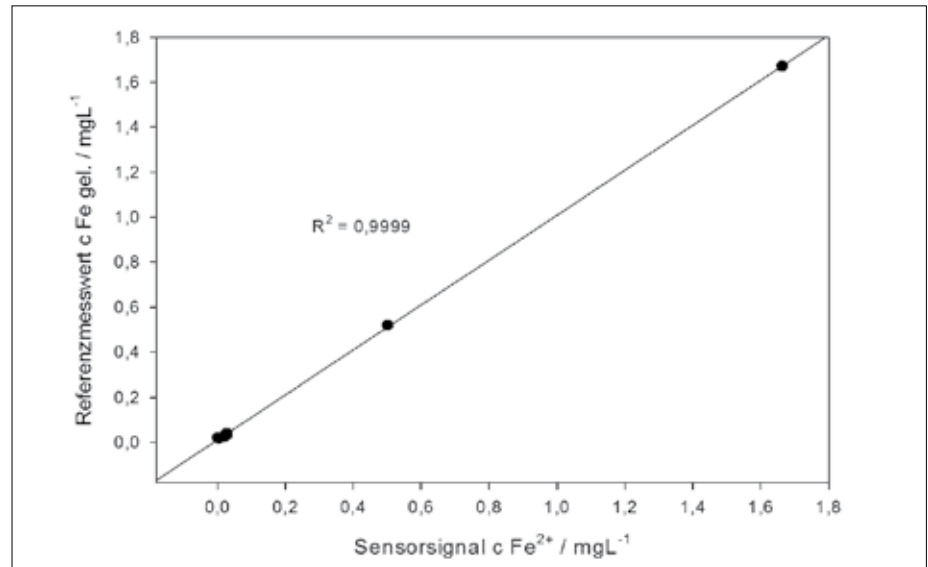


Abbildung 4: Vergleich zwischen analytisch und mit dem neuen Sensorverfahren bestimmten  $\text{Fe}^{2+}$ -Aktivitäten in einer Testanlage aus Schwarzstahl  
Grafik: Leuphana

serchemischer Parameter und die Auswertung nach einem neu entwickelten Verfahren erstmals in verschiedenen Gebäuden erprobt. Die Prüfsoftware wird in Zusammenarbeit mit der synavision GmbH, Bielefeld, entwickelt.

## 6. Weiteres Vorgehen

Im weiteren Projektverlauf werden, neben der Einbeziehung der Anlagenkonstellationen und Betriebsbedingungen, in acht Gebäuden ein energetisches Monitoring und ein Korrosionsmonitoring aufgebaut. Dies dient zum Test des Sensorverfahrens und zur Vorbereitung der Untersuchung von Abhilfemaßnahmen, die in drei mit einem Monitoring ausgestatteten Gebäuden erprobt werden sollen. Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse werden in einem Weißbuch TGA zusammengeführt.

Das Projekt liefert darüber hinaus Beiträge für die Erarbeitung von technischen Regeln für den Betrieb, die Überwachung und die Wartung von Heiz- und Kühlanlagen. In diesem Zusammenhang werden aktuell Grenzwerte für bestimmte Wasserparameter im Füll- und Zusatzwasser sowie im Betriebswasser in Kühlanlagen im entsprechenden BTGA-Ausschuss diskutiert.

## 7. Fazit

Korrosion in Heiz- und Kühlanlagen ist ein ernstzunehmendes Betriebsrisiko und sollte als Teil des Energie- und Qualitätsmanagements in Planung und Betrieb berücksichtigt werden. Dabei ist besonders auf die Verträglichkeit der Anlagenkomponenten und auf das richtige Füllwasser zu achten. Alle Prozesse bei der Errichtung und der Inbe-

triebnahme sowie alle Maßnahmen während des Gebäudebetriebs, die das Systemwasser betreffen, können Auswirkungen auf Korrosionsprozesse haben und müssen sorgfältig dokumentiert werden. Eine kontinuierliche Anlagenüberwachung erlaubt es, rechtzeitig Maßnahmen gegen korrosionsbedingte Schäden zu ergreifen. ◀

## Literatur:

- Fenster, J. C. (2013) Zinkkorrosion in alkalisch wässrigen Lösungen. Dissertation. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.
- Guilbaud, R., White, M. L., Poulton, S. W. (2013) Surface charge and growth of sulphate and carbonate green rust in aqueous media. *Geochim. Cosmochim. Acta* 108 (2013) 141-153.
- Huber, J. (2004) About the Nature of  $-\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Opel, O.; Eggerichs, T.; Otte, T.; Ruck, W. K. L. (2012) Corrosion, scaling and biofouling processes in thermal systems and monitoring using redox potential measurements. *Eurocorr* 2012, 09.-13. September 2012, Istanbul.
- Opel, O.; Eggerichs, T.; Otte, T.; Ruck, W. K. L. (2014) Monitoring of microbially mediated corrosion and scaling processes using redox potential measurements. *Bioelectrochemistry* 97, 137-144.
- Plesser, S., Pinkernell, C., Altendorf, L., Koch, M., Büchner E. (2015) EQM – Energie- und Qualitätsmanagement für nachhaltige Gebäude. Innovative Prozesssteuerung im Feldtest. synavision GmbH, Aachen; energydesign braunschweig GmbH, Braunschweig.
- Plesser, S.; Görtgens, A.; Ahrens-Hein, O.-N. (2015) 8 Passivhaus-Kitas in Hannover – Optimierung von Qualitätssicherungsprozessen für Nachhaltige Gebäude, Abschlussbericht Forschungsprojekt, Energydesign Braunschweig.

<sup>1</sup> Um Teilnahme wird gebeten: <https://de.surveymonkey.com/s/H52FBW3>, zuletzt geprüft am 7.11.2015.