

Charakterisierung der Schallabstrahlung von Luft-Wasser-Wärmepumpen mittels simultaner Hitzdrahtanemometrie, Vibrationsmessung und Schalldruckbestimmung

Felix Linhardt^{1,2}, Karoline Alten³, Johann Emhofer¹, Christian Köfinger¹,
Thomas Fleckl¹, Peter Wimberger¹, Martin Gröschl², Christoph Reichl¹

¹ AIT Austrian Institute of Technology, Center for Energy,

² TU Wien, Institut für Angewandte Physik,

³ AIT Austrian Institute of Technology, Center for Mobility,

E-Mail: felix.linhardt.fl@ait.ac.at

Einleitung

Am Beispiel einer Luft-Wasser-Wärmepumpe wurde die gleichzeitige Messung von punktuellen Strömungsgeschwindigkeiten, Vibrationen und orts- und frequenz aufgelöste Schalldruckpegeln zur spektralen Charakterisierung herangezogen. Die Messungen wurden in einer akustisch optimierten Klimakammer durchgeführt, um auch die transienten Vorgänge bei der Vereisung des Verdampfers beobachten zu können. Dabei wurde die Strömung lokal mittels eines Hitzdrahtanemometers bestimmt, das eine Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten sowie der Turbulenzspektren ermöglichte. Die Vibrationen wurden durch piezoelektrische Schwingbeschleunigungssensoren erfasst, die mittels Magnethalterungen an maßgeblich schwingenden Komponenten der Wärmepumpe montiert waren. Aufgrund ihres geringen Gewichts von nur 54g und ihres breiten Frequenzbereiches (0.1 - 4800 Hz) eignen sie sich gut für derartige Schwingungsmessungen ohne eine rückkoppelnde Wirkung auf das Messobjekt auszuüben. Im Postprocessing wurden die Daten integriert, um die Schwingschnelle für die weitere Berechnungsschritte zu erhalten. Die Messung der Schalldruckpegel erfolgte orts aufgelöst mittels 1/2 Zoll Klasse 1 Messmikrofonen. Neben der herkömmlichen Charakterisierung durch Vergleich von Schwingungs-, Strömungsturbulenz- und Schalldruckspektren wurde durch die zeitgleiche Messung der Signale eine zusätzliche zeitliche Korrelation der Signale möglich, die weitere Rückschlüsse auf die Signalzusammenhänge ermöglicht.

Anwendungsziele

Der vorliegende Messaufbau stellt einen wichtigen Schritt in Richtung zweier Zielsetzungen dar. Einerseits sollte ein Werkzeug entwickelt werden, das es Wärmepumpenherstellern erlaubt, im Zuge der Entwicklung und des Prototypenbaues, die Auswirkungen konstruktiver Veränderungen am Gerät auf einfache Weise nachzuvollziehen und bewerten zu können.

Andererseits handelt es sich dabei auch um Voruntersuchungen, ob und wie ein kontinuierliches Machine-Health-Monitoring auf Basis von Schall-, Vibrations-, und Strömungsmessungen realisiert werden kann.

Messkette

Die vier Akustikkanäle, vier Vibrationskanäle, und der Strömungskanal generieren Signale, die über jeweilige Verstärkereinheiten auf einer Messkarte zusammengeführt werden. Diese Messkarte gestattet das Abtasten aller Kanäle mit bis zu 96 kHz. Via USB-Schnittstelle werden die Daten auf den Computer übertragen (Schema in Abbildung 1).

Der Softwarestack besteht aus den Hardwaretreibern des Herstellers und dazu passenden Python-Bindings. Damit ist dann die gesamte Funktionalität direkt aus Python heraus ansteuerbar.

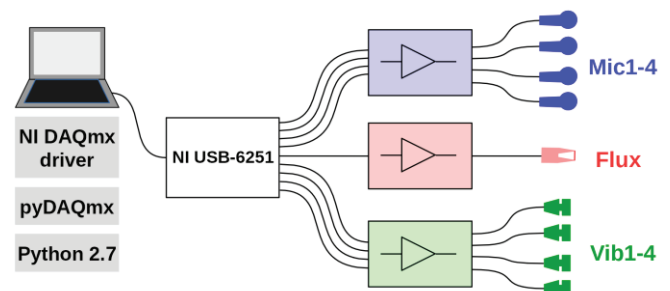


Abbildung 1: Die Signale der neun Sensoren werden über jeweils spezifische Verstärker an eine Datenerfassungskarte geführt. Der Softwarestack besteht aus den Hardwaretreibern des Herstellers, die direkt mit Python angesteuert werden können.

Wärmepumpe und Messbedingungen

Für die Testmessungen stand eine kommerzielle Luft-Wasser-Wärmepumpe zur Verfügung. Es handelt sich dabei um ein Split-Gerät, mit Ventilator und Verdampfer in der Außeneinheit und, unter anderem, Kompressor, Umwälzpumpe und einem Warmwasserspeicher in der Inneneinheit (siehe auch Abbildung 2). Die Leistung konnte für die Messungen als fixe Größe vorgegeben werden. Angefahren wurden 20% als Minimalwert, der Nennleistungspunkt von 38%, und weiters 69% sowie 100%. Zu jeder Leistungseinstellung wurden für die Außeneinheit auch verschiedene Klimabedingungen zwischen +7°C und -7°C vorgegeben, sowie für die Inneneinheit unterschiedliche Vor- und Rücklauftemperaturen.

Je nach Klima- und Leitungsvorgaben kam es zu Vereisung am Verdampfer, wodurch Abtauvorgänge notwendig sind, die automatisch ausgelöst oder manuell geschaltet werden konnten.

Um eine konstruktive Veränderung am Innengerät zu simulieren, wurde jede Messung je einmal mit geschlossener sowie geöffneter Fronttüre der Wärmepumpe durchgeführt.

Sensorpositionen

Von den neun Sensoren wurden ein Mikrofon und der Strömungssensor in der Klimakammer mit dem Außengerät aufgestellt, die verbleibenden drei Mikrofone und die vier Vibrationssensoren wurden beim Innengerät angebracht (siehe Abbildung 2).

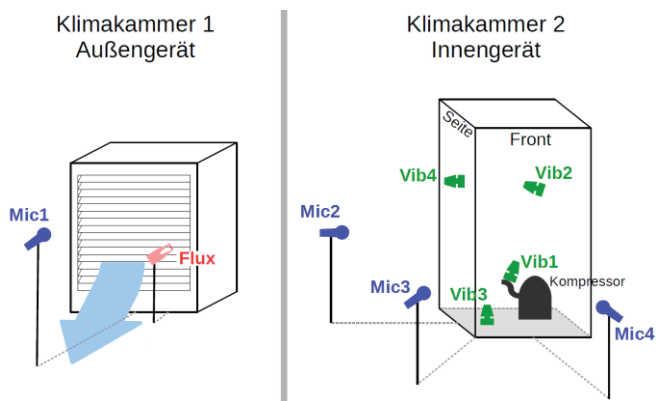


Abbildung 2: Am Außengerät wurde an der Ausblasseite Strömung und Schalldruck (Mic1 außerhalb der Strömung) gemessen. Das Innengerät wurde mit vier Vibrationssensoren und drei Mikrofonen vermessen. Sensor Vib1 sitzt dabei an einer Kältemittelleitung in der Nähe des Kompressors. Vib2 wurde an der Innenseite der Fronttüre platziert.

Untersuchung zeitlicher Mittelwerte

Durch zeitliche Mittelung lassen sich für die einzelnen Sensorkanäle sehr leicht handhabbare Maßzahlen errechnen. Über die freien Parameter der Leistungsvorgabe und der Türstellung können damit Aussagen über die Zusammenhänge einzelner Kanäle getroffen werden.

Für die Akustikkanäle wird der Dauerschallpegel verwendet, die Vibrationskanäle werden durch den Effektivwert (quadratischer Mittelwert) der Schwingschnelle charakterisiert. Der Strömungskanal kann in diesem Kontext sowohl durch den Mittelwert charakterisiert werden, der ein Maß für die Effektivströmung darstellt, als auch durch die Standardabweichung, die als Maß für die Turbulenz der Strömung herangezogen wird.

Beispiel 1: Mic4 gegen Vib3 (Abbildung 3)

Sensor Vib3 befindet sich auf der inneren Bodenplatte des Innengeräts, Mic4 direkt frontal davor. Mit dem Anheben der Wärmepumpenleistung ist ein deutlicher Anstieg in den Vibrationswerten zu beobachten, der auch stark mit dem Anstieg des Schalldruckpegels korreliert. Das Öffnen der

Fronttüre führt zu einem vibrationsunabhängig weiteren Ansteigen des Schalldruckpegels um bis zu 10dB.

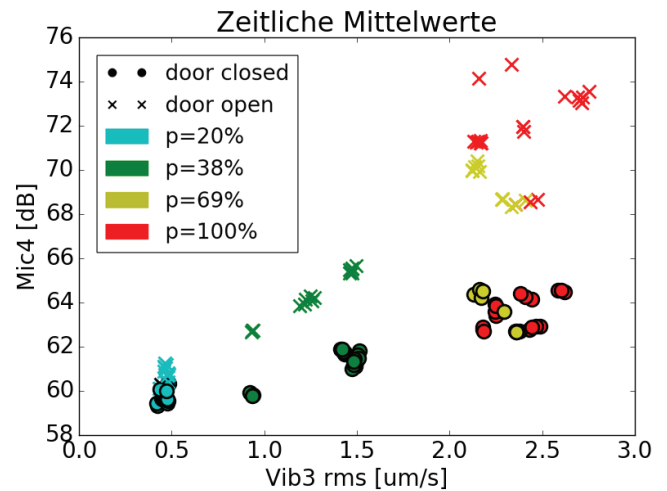


Abbildung 3: Mic4 (Innengerät, frontal) gegen Vib3 (Bodenplatte). Beim Vergleich dieser beiden Sensoren, zeigt sich bei Erhöhung der Kompressorleistung ein stetes Ansteigen der Vibrationen, in starker Korrelation mit dem Schalldruckpegel. Deutlich sichtbar ist auch die Dämpfungswirkung der geschlossenen Wärmepumpentüre.

Beispiel 2: Mic2 gegen Vib4 (Abbildung 4)

Besonders auffällig ist bei Sensor Vib3, dass bei einer Leistung von 38%, jedoch nur bei geschlossener Fronttüre, ein deutliches Maximum in der Vibrationsstärke erreicht wird. Dies deutet auf Resonanzeffekte in der Seitenwand hin, deren Anregungsfrequenzen über die Fronttüre übertragen werden.

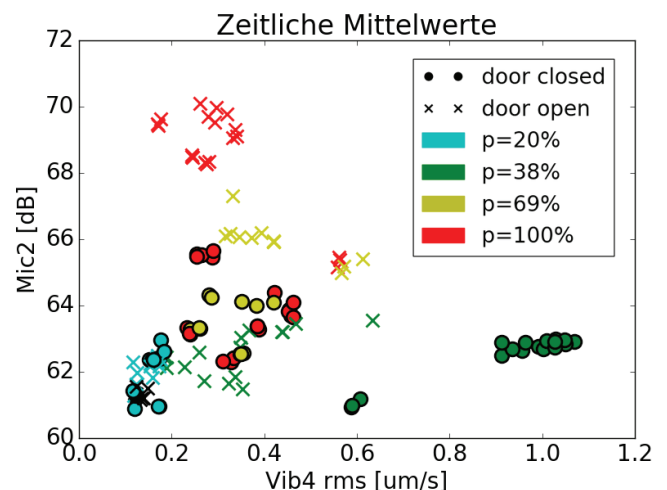


Abbildung 4: Mic2 (Innengerät, Seite) gegen Vib4 (Seitenwand). Sensor Vib4 zeigt hohe Effektivwerte bei Leistung 38%. Diese treten jedoch nur bei geschlossener Fronttüre auf, was auf Einkopplung der entsprechenden Frequenzen über die Türe hinweist.

Bei der Leistungseinstellung 38% liegen auch die Schallpegel an Mikrophon Mic2 bei geöffneter Türe größtenteils unter den Messungen bei geschlossener Türe. Dies zeigt sich jedoch nicht in den Kanälen Mic3 und Mic4 (hier nicht im Bild), sodass gefolgert werden kann, dass die gemessenen Vibrationen auch mit Richtwirkung von der Seitenwand akustisch abgestrahlt werden.

Beispiel 3: Mic1 gegen Flux Standardabweichung (std-dev), entspricht der Turbulenz (Abbildung 5)

Bei diesen Messungen der Außeneinheit zeigt sich, dass eine Minderzahl der Messpunkte deutlich erhöhte Turbulenz- sowie damit verbundene Schalldruckpegelwerte aufweisen. Weitere Recherche in den Metadaten dieser Messungen zeigt, dass diese Aufnahmen jeweils kurz vor einem automatisch ausgelösten Abtauvorgang stattfanden. Dies bedeutet, dass der fortgeschrittene Vereisungsgrad des Verdampfers mit einer deutlichen Turbulenz- und Schalldruckpegelzunahme einher geht.

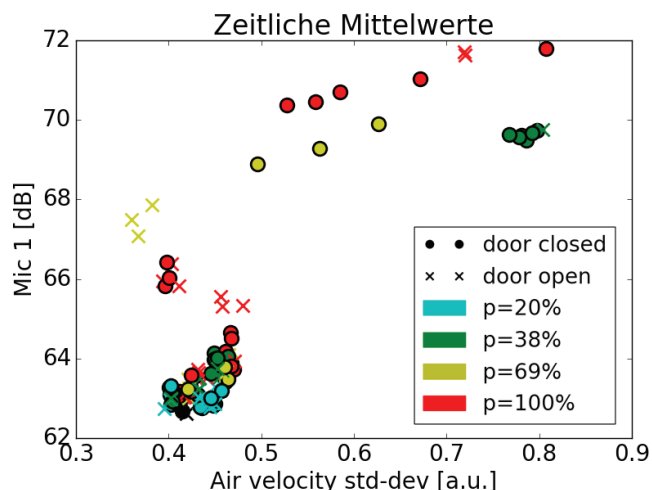


Abbildung 5: Mic1 gegen Flux (std-dev, Turbulenz). Die Messungen mit besonders hohen Turbulenz- und Schalldruckpegelwerten beim Außengerät, fallen mit fortgeschrittener Vereisung am Verdampfer zusammen.

Kreuzkorrelation der Zeitreihen

Durch die gleichzeitige Messung aller neun Kanäle ist es möglich, die Kreuzkorrelationsfunktion zwischen je zwei Kanälen zu bilden. Da es sich um Zeitreihen handelt, bekommt der freie Parameter der Kreuzkorrelationsfunktion die Bedeutung eines Zeitversatzes. Um den verschiedenen möglichen Schallwegen Rechnung zu tragen, wird der untersuchte Parameterbereich für den Zeitversatz derart gewählt, dass die längste im Messaufbau vorkommende Abmessung noch von Luftschall im gegebenen Zeitfenster in die eine oder andere Richtung zurückgelegt werden kann. Aus diesem eingeschränkten Parameterbereich wird das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion als Übereinstimmungsmaß herangezogen. Daraus ergibt sich für jede Messung zwischen allen Kanälen eine symmetrische Kopplungsstärkematrix (siehe Abbildung 6).

In allen solchen Kopplungsstärkematrizen zeigt sich, dass das Strömungssignal nicht an die anderen Signale koppelt –

die Korrelationswerte liegen bei 10^{-3} bis 10^{-5} . Grund dafür ist, dass das Strömungssignal Ähnlichkeit zu einem rosa Rauschen aufweist, und daher über längere Zeitreihen hinweg sich keine Korrelation zu den anderen, tonaleren Signalen zeigen kann.

Bei der Betrachtung der Kopplungsstärke zwischen Vibration und Akustik zeigen sich bei niedrigen Leistungseinstellungen gleichmäßig geringe Korrelationswerte. Bei hoher Wärmepumpenleistung (siehe Abbildung 6) zeigen besonders die kompressornahen Vibrationssignale Vib1 und Vib3 starke Korrelation mit den Mikrofonsignalen, wohingegen die Anteile von Vib2 und Vib4 abnehmen.

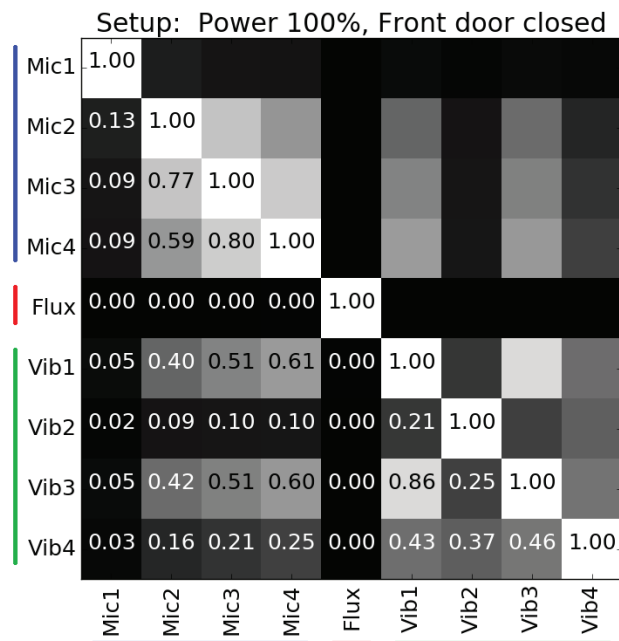


Abbildung 6: Die Einträge der Kopplungsstärkematrizen werden über die Kreuzkorrelationsfunktion gebildet. Für die Leistungseinstellung 100% mit geschlossener Fronttür zeigt sich, dass die Vibrationssignale von Sensor Vib1 (Kompressorzuleitung) und Vib3 (innere Bodenplatte) sich deutlich in den Mikrofonsignalen Mic2-4 abzeichnen. Das Strömungssignal ist weitestgehend ein Rauschsignal und korreliert daher kaum mit den anderen, tonaleren Signalen.

Untersuchung transienter Ereignisse

Die gleichzeitige und hochfrequente Erfassung aller Kanäle erlaubt, auch transiente Ereignisse mit mehreren Sensoren zu untersuchen. Eine Erfassung solcher Ereignisse kann insbesondere bei Prototypen hilfreich sein, um Schallwege nachzuvollziehen, oder um dann im Regelbetrieb die erfolgreiche Ausführung eines Steuerbefehls zu überwachen.

Beispiel 4: Öffnen des Expansionsventils (Abbildung 7) Im Außengerät befindet sich ein Expansionsventil, dessen kurzes Öffnungsgeräusch mit Mikrofonen beider Klimakammern nachgewiesen werden kann. Es zeigt sich auch ein Zeitversatz, der bestätigt, dass sich die Quelle des Signals in der Außenkammer befinden muss. Wichtigster Schallübertragungsweg dürften die kupfernen Kältemittel-

leitungen gewesen sein, die Innen- und Außengerät verbinden.

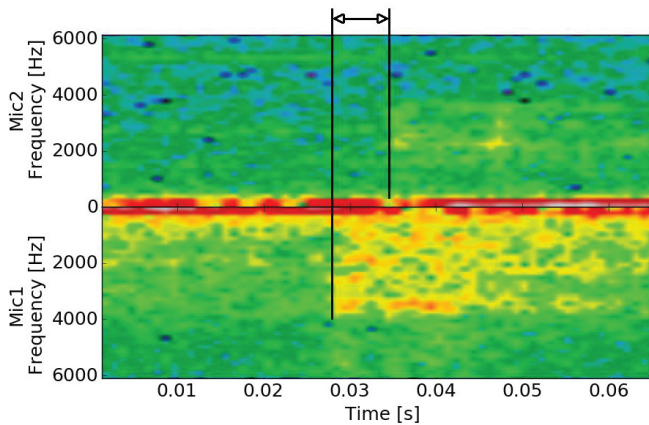


Abbildung 7: Öffnungsgeräusch des Expansionsventils am Außengerät. Sowohl Mic1 (Außen-Klimakammer) als auch Mic2 (Klimakammer des Innengeräts) haben das Ereignis detektiert. Der Zeitversatz zeigt, dass sich die Signalquelle in der Außenkammer befinden muss.

Beispiel 5: Umschalten des 4-Wege-Ventils (Abbildung 8)
Beim Einsetzen einer Abtauphase wird, nachdem der Kompressor heruntergefahren wurde, der Kältemittelkreislauf umgekehrt. Dies geschieht über ein 4-Wege-Ventil. Dessen gesamter Schaltvorgang – zu Beginn ein Klicken, ein Expansionsgeräusch, und ein Klick am Ende – kann sowohl mit den Vibrationssensoren als auch den Mikrofonen mitverfolgt werden.

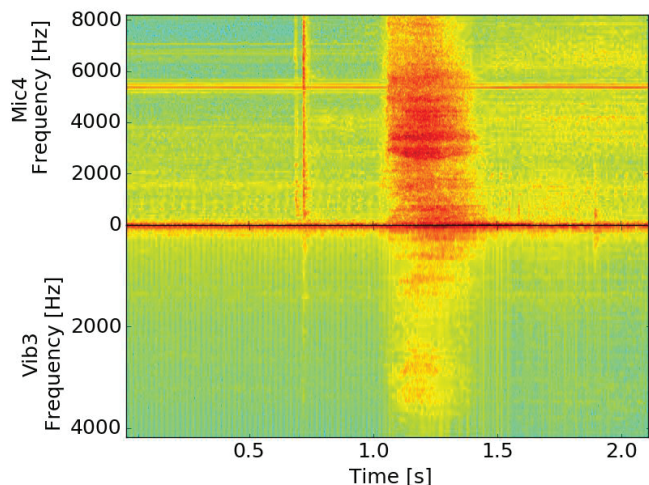


Abbildung 8: Schaltvorgang des 4-Wege-Ventils am Beginn einer Abtauphase. Sowohl akustisch (Mic4) als auch vibrationssensorisch (Vib3) lässt sich dieses Ereignis detektieren und mitverfolgen. Deutlich zeichnen sich Beginn (0.7s) und Ende (1.9s) der Ventilbewegung ab. Dazwischen findet sich das Expansionsgeräusch des Kältemittels.

Fingerprinting von Betriebszuständen

Einzelne Leistungszustände der Wärmepumpe gehen mit einer bestimmten Kompressordrehzahl einher, und besitzen dadurch sehr charakteristische spektrale Fingerabdrücke. Solche Fingerabdrücke können bei bekannten Betriebszuständen genommen werden, um unbekannte Zustände zu identifizieren.

Beispiel 6: Herunterfahren des Kompressors (Abbildung 9)
Zu Beginn einer Abtauphase muss zunächst der Kompressor heruntergefahren werden. Dabei durchläuft er innerhalb von zwei Minuten alle Drehzahlzustände unterhalb des Startzustandes. Daher findet sich auch der spektrale Fingerabdruck des 69%-Leistungs-Zustandes in dieser Drehzahlrampe.

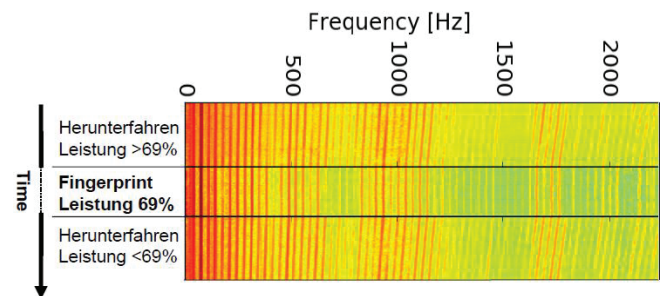


Abbildung 9: Der obere und untere Bereich sind aufeinanderfolgende Ausschnitte aus dem Herunterfahren des Kompressors. Mittig zu passendem Zeitpunkt eingefügt, ist der spektrale Fingerabdruck des 69%-Leistungs-Zustandes dargestellt.

Zusammenfassung

Es wurde ein Messsystem entwickelt, das es erlaubt, auf einfache Weise eine konstruktive Änderung im Hinblick auf Schall- und Vibrationsverhalten zu bewerten. Die gleichzeitig hohe Abtastrate aller Kanäle erlaubt auch Untersuchungen der Kopplungsstärke zwischen den einzelnen Kanälen.

Als Testfall eines konstruktiven Eingriffs wurde der Öffnungszustand der Fronttüre herangezogen, womit schon deutliche Änderungen im Vibrations- und Schallverhalten induziert wurden.

Für ein Continuous Machine Health Monitoring wurde gezeigt, dass Betriebszustände anhand ihrer spektralen Fingerabdrücke identifiziert werden können, und dass sowohl Mikrofone als auch Vibrationssensoren transiente Ereignisse überwachen können.

Danksagung

Das Projekt SilentAirHP wird im Rahmen des Energieforschungsprogramms des Klimaenergiefonds (5148527) in einer Initiative des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie gefördert.