Lehrstuhl für
Energiewirtschaft und Anwendungstechnik
Ordinarius Prof. Dr.-Ing. U. Wagner · Prof. Dr. rer. nat. Th. Hamacher (komm.)

Technische Universität München

# Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt

*Abschlussbericht*

# Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt

*Abschlussbericht*

Durchgeführt von:

**Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München**

Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher

Autoren: Dipl.-Ing. Markus Wagner

Dipl.-Ing. Karl Schönsteiner

Dipl.-Ing. Tobias Eder

München, den 13. Juni 2014

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung ..... 7

2 Kurzcharakteristik der Stadt Ingolstadt ..... 9

2.1 Lage und Raumstruktur ..... 9

2.2 Bevölkerung ..... 12

2.3 Beschäftigungsstruktur ..... 12

3 Analyse des Ist-Zustandes ..... 15

3.1 Erzeugungsstruktur ..... 15

3.2 Verteilung ..... 17

3.2.1 Sparte Strom ..... 17

3.2.2 Sparte Gas ..... 19

3.2.3 Sparte Fernwärme ..... 21

3.3 Verbrauchsstruktur ..... 24

3.3.1 Energieverbrauch Kommunale Liegenschaften ..... 24

3.3.2 Energieverbrauch Haushalte ..... 25

3.3.3 Energieverbrauch Industrie ..... 26

3.3.4 Energieverbrauch Gewerbe, Handel und Dienstleistung und Rest ..... 27

3.4 Energie- und $CO_2$-Bilanz ..... 27

3.4.1 Bilanzierungsmethodik ..... 28

3.4.2 Vorgehensweise und Datengrundlage ..... 28

3.4.3 Ergebnisse ..... 30

3.4.3.1 Energie ..... 30

3.4.3.2 Treibhausgas ..... 33

4 Bestimmung des Wärmebedarfs ..... 41

5 Potentialanalyse der erneuerbaren Energien ..... 47

5.1 Wind ..... 47
5.2 Biomasse ..... 52
5.3 Wasser ..... 57
5.4 Geothermie ..... 60
6 Analyse des Solarpotentials ..... 65
6.1 Vorgehensweise und Methodik ..... 65
6.2 Auswertung ..... 67
7 Konzepterstellung ..... 71
7.1 Identifizierung von Sanierungsschwerpunkten ..... 71
7.2 Ausbau der existierenden Fernwärme ..... 73
7.3 Klein-Blockheizkraftwerke ..... 75
7.4 Wärmepumpen ..... 77
7.5 Versorgungsausblick Photovoltaik – BHKW – Elektromobilität ..... 78
7.6 Kurzumtriebsplantagen ..... 82
7.7 Photovoltaik entlang der Autobahn ..... 86
7.8 Abwasserwärmenutzung ..... 87
7.9 Zusammenfassung der Konzepte und Schwerpunktpotentiale ..... 89
8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen ..... 91
9 Zusammenfassung ..... 95
Abbildungsverzeichnis ..... 97
Tabellenverzeichnis ..... 101
Literaturverzeichnis ..... 103
Autoren ..... 109
Anhang A: Abschlusspräsentation ..... 111
Anhang B: Karten ..... 135

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Mit dem 13. Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes wurde am 30. Juni 2011 im Deutschen Bundestag der Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahre 2022 besiegelt. Dieser Beschluss wird von der Bayerischen Landesregierung getragen. Es sind verschiedene Maßnahmen ergriffen worden, um eine rasche Energiewende in Bayern herbeizuführen. Ein wichtiger Baustein der Beschlüsse ist der schnelle und effiziente Ausbau der erneuerbaren Energien in Bayern. Langfristig müssen Maßnahmen der Energieeffizienz und der Ausbau regenerativer Energien miteinander in Einklang gebracht werden. Dazu müssen die Potentiale der erneuerbaren Energien und der möglichen Energieeffizienzmaßnahmen erschlossen werden. Diese Potentiale sollen verortet werden, um sie zu einem integralen Bestandteil der Raumplanung zu machen. Eine Abstimmung bzw. Einbindung in den Entwurf von Flächennutzungsplänen ist zudem sinnvoll und notwendig.

Ziel des Projektes „Erstellung eines Energienutzungsplans für die Stadt Ingolstadt“ ist die Erarbeitung eines Energienutzungsplans (ENP) für das gesamte Stadtgebiet von Ingolstadt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Potentiale der erneuerbaren Energien und den Möglichkeiten, insbesondere Wärmeenergie im Gebäudesektor einzusparen, gelegt. Der Bearbeitungszeitraum des Projektes erstreckte sich von August 2012 bis Mai 2014.

Die Erstellung des Energienutzungsplanes gliedert sich in folgende Schritte: Analyse des Ist-Zustandes und Aufbau einer einfachen Energie- und $CO_2$-Bilanz (Arbeitspaket (AP) 1); Potentialanalyse der erneuerbaren Energien ohne Solarpotential (AP 2); Analyse des Solarpotentials auf Basis von geometrischen Gebäudedaten (AP 3); Aufbau eines Gebäudedatensatzes zur Analyse des Wärmebedarfs (AP 4); Erstellung eines ersten Energiekonzeptes zur Reduktion der Wärmenachfrage sowie des vermehrten Einsatzes erneuerbarer Energien (AP 5).

In AP 1 wird neben der Analyse des Ist-Zustandes eine Energiebilanz mittels der Bilanzierungssoftware ECORegion aufgebaut, aufgelöst nach Energieträgern und Verbrauchssektoren. Darauf aufbauend wird eine $CO_2$-Bilanz erarbeitet. AP 2 behandelt die Analyse der Potentiale für Wind, Biomasse, Wasser und Geothermie. Die Analyse des Solarpotentials auf Basis von geometrischen Gebäudedaten erfolgt in AP 3. Ausgehend von vorhandenen Dachflächen sollen dabei Dachneigungen, Ausrichtungen sowie auch Verschattungen berücksichtigt werden. AP 4 beinhaltet den Aufbau eines Gebäudedatensatzes zur Analyse des Wärmebedarfs. Neben der Geometrie enthält der Datensatz weitere Gebäudeattribute

wie Gebäudealter, Gebäudetyp und Nutzungsart. Abschließend soll in AP 5 ein erstes Konzept zur Reduktion der Wärmenachfrage und des vermehrten Einsatzes erneuerbarer Energien erarbeitet werden. Hier werden die Auswirkungen von angewandten Maßnahmen auf die Energie- und Emissionsbilanz der Stadt bestimmt.

Der Energienutzungsplan für Ingolstadt soll einen übergreifenden Rahmen bilden, der es ermöglicht, entwickelte Maßnahmen zu koordinieren und zu vertiefen. Zunächst stellt der Energienutzungsplan eine Grobplanung dar und soll nicht als Detailplanung von Gesamtkonzepten für eine Stadt verstanden werden. Die in der Studie abgeleiteten und entwickelten Maßnahmen und Konzepte dienen als Basis und sind in einem weiteren Schritt zu vertiefen, zu koordinieren und umzusetzen. Eine exakte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung muss darauf aufbauend im Einzelfall in weiterführenden Energiekonzepten erfolgen.

# 2 Kurzcharakteristik der Stadt Ingolstadt

## 2.1 Lage und Raumstruktur

Die Stadt Ingolstadt ist eine kreisfreie Stadt an der Donau und eines der 23 Oberzentren Bayerns. Sie liegt im Ingolstädter Becken auf etwa 362 m ü. NN und grenzt an die Landkreise Eichstätt, Pfaffenhofen a. d. Ilm und Neuburg-Schrobenhausen. Die Fläche des Stadtgebietes beträgt etwa 133 km$^2$. In ost-westlicher Richtung ergibt sich eine Ausdehnung von etwa 18 km, während sich die Ausmaße des Stadtgebietes in Nord-Süd-Richtung auf gut 15 km belaufen. Mit 128.000 Einwohnern bzw. 190.000 Einwohnern im Großraum ist Ingolstadt die zweitgrößte Stadt Oberbayerns sowie die fünftgrößte Stadt Bayerns. Die Stadt gliedert sich insgesamt in 42 Stadtteile und umliegende Ortschaften.

Ingolstadt nimmt eine zentrale Lage in Bayern ein und ist verkehrstechnisch günstig an der Autobahn 9 gelegen. Zudem verfügt Ingolstadt über einen ICE-Halt.

**Abbildung 1** zeigt das zu untersuchende Stadtgebiet von Ingolstadt.

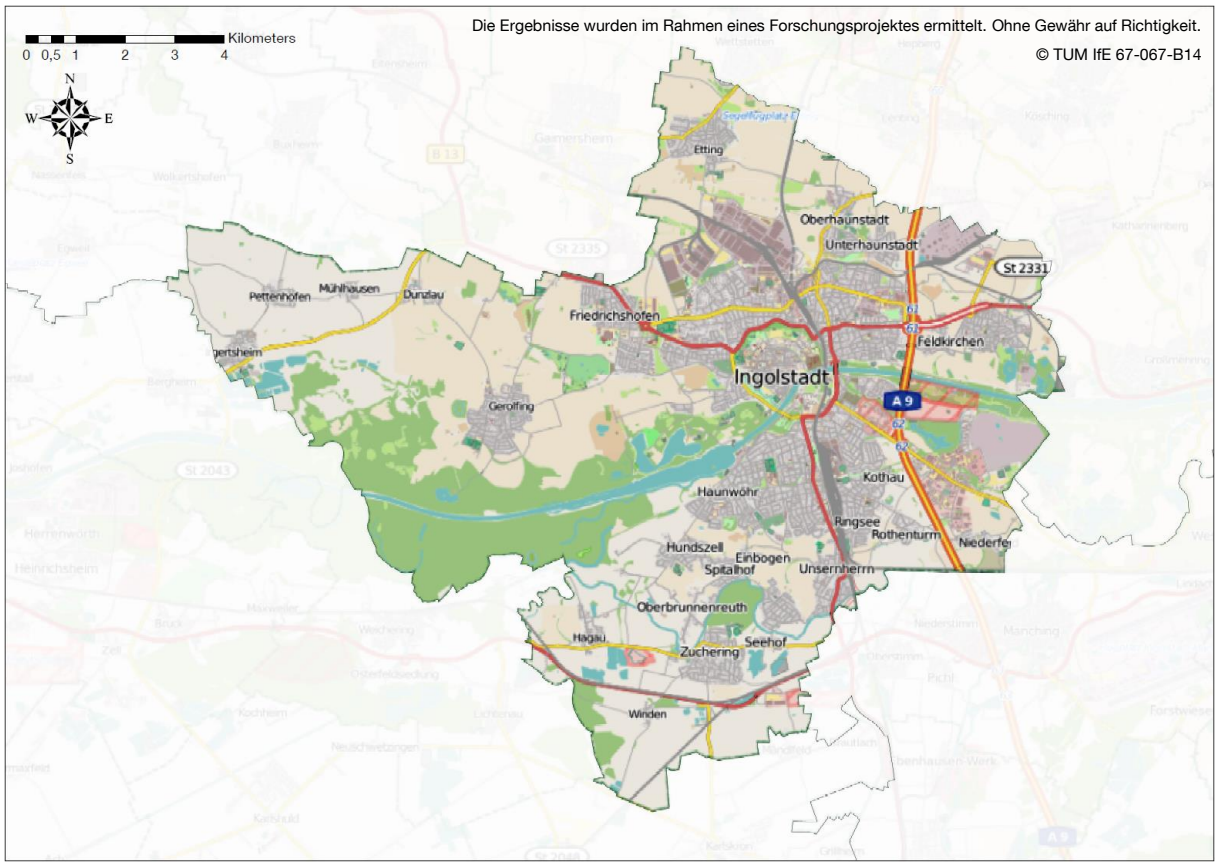



**Abbildung 1:** Untersuchungsregion Ingolstadt [1, 2]

Insgesamt umfasst das gesamte Stadtgebiet Ingolstadts 13.337 ha. Die Flächenverteilung ist **Tabelle 1** zu entnehmen.

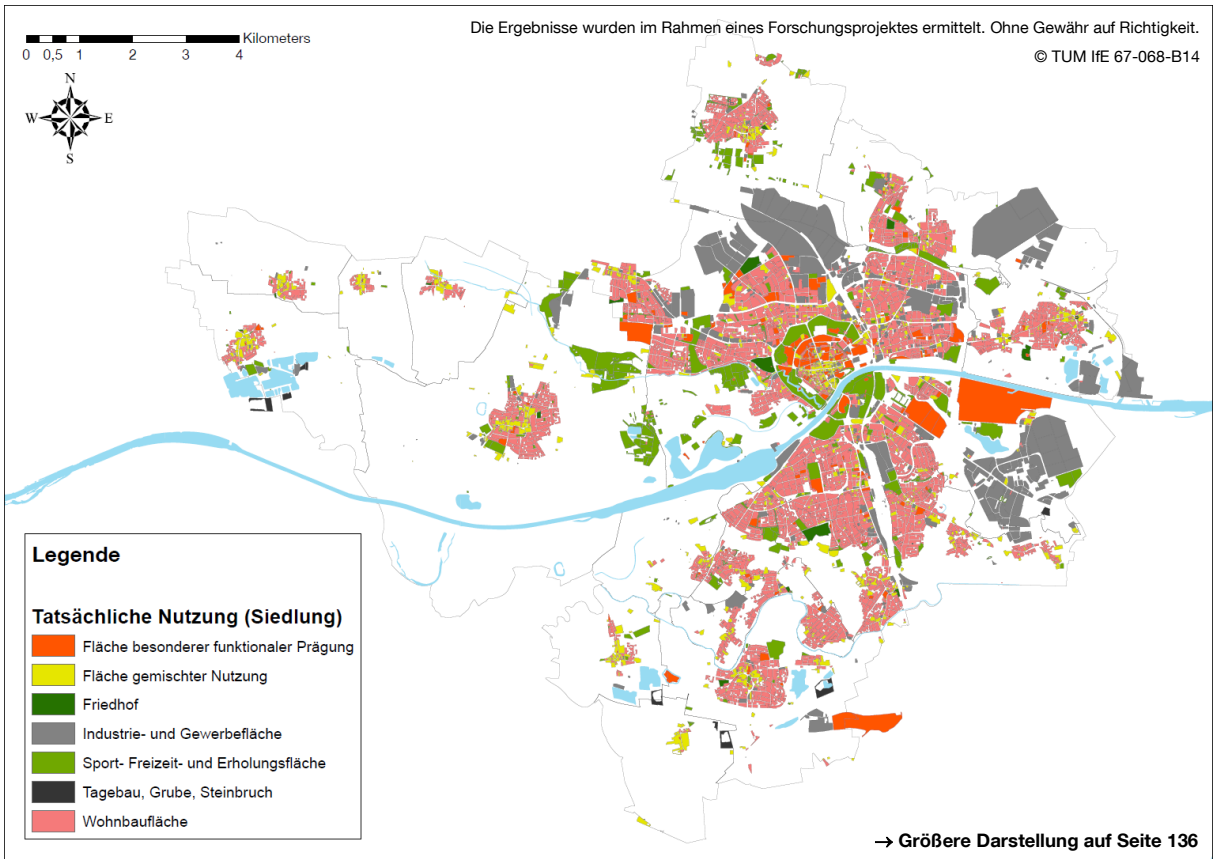
**Tabelle 1:** Flächenverteilung in Ingolstadt [3]

| *Nutzungsart* | *Fläche [ha]* | *Fläche [%]* |
|---|---|---|
| Gebäude- und Freifläche | 3.032 | 22,7 |
| Betriebsfläche | 49 | 0,4 |
| Erholungsfläche | 497 | 3,7 |
| Verkehrsfläche | 1.246 | 9,3 |
| Landwirtschaftsfläche | 5.931 | 44,5 |
| Waldfläche | 1.797 | 13,5 |
| Wasserfläche | 627 | 4,7 |
| Flächen anderer Nutzung | 158 | 1,2 |

Ein Großteil der Fläche wird dabei landwirtschaftlich genutzt (44,5 %). Gebäude- und Freiflächen nehmen gut 3.000 ha der Gesamtfläche ein, gefolgt von Wald- (13,5 %) und Verkehrsflächen (9,3 %). Die verbleibende Fläche teilt sich in Wasser-, Erholungs- und Betriebsflächen sowie Flächen anderer Nutzung auf.

Gerade Gebäude- und Freiflächen, Erholungsflächen und Verkehrsflächen haben gegenüber den vergangenen Jahren einen Anstieg in Ingolstadt erfahren. Im Hinblick auf die energetische Nutzung sind vor allem Waldflächen und landwirtschaftlich genutzte Flächen (Anbau von Energiepflanzen) oder Gebäudeflächen (Nutzung von Photovoltaik (PV)) von Interesse.

Eine zusammenfassende Darstellung der Flächen- bzw. Bodennutzung auf dem Ingolstädter Stadtgebiet zeigt **Abbildung 2**. Dabei wird zwischen der Tatsächlichen Nutzung in Siedlungsgebieten (Wohnbaufläche, Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche, Fläche gemischter Nutzung etc.) und der Tatsächlichen Nutzung in Vegetationsgebieten (Wald, Landwirtschaft, vegetationslose Fläche etc.) unterschieden. Daneben kann die Tatsächliche Nutzung auch in den Bereichen Verkehr und Gewässer angegeben werden.



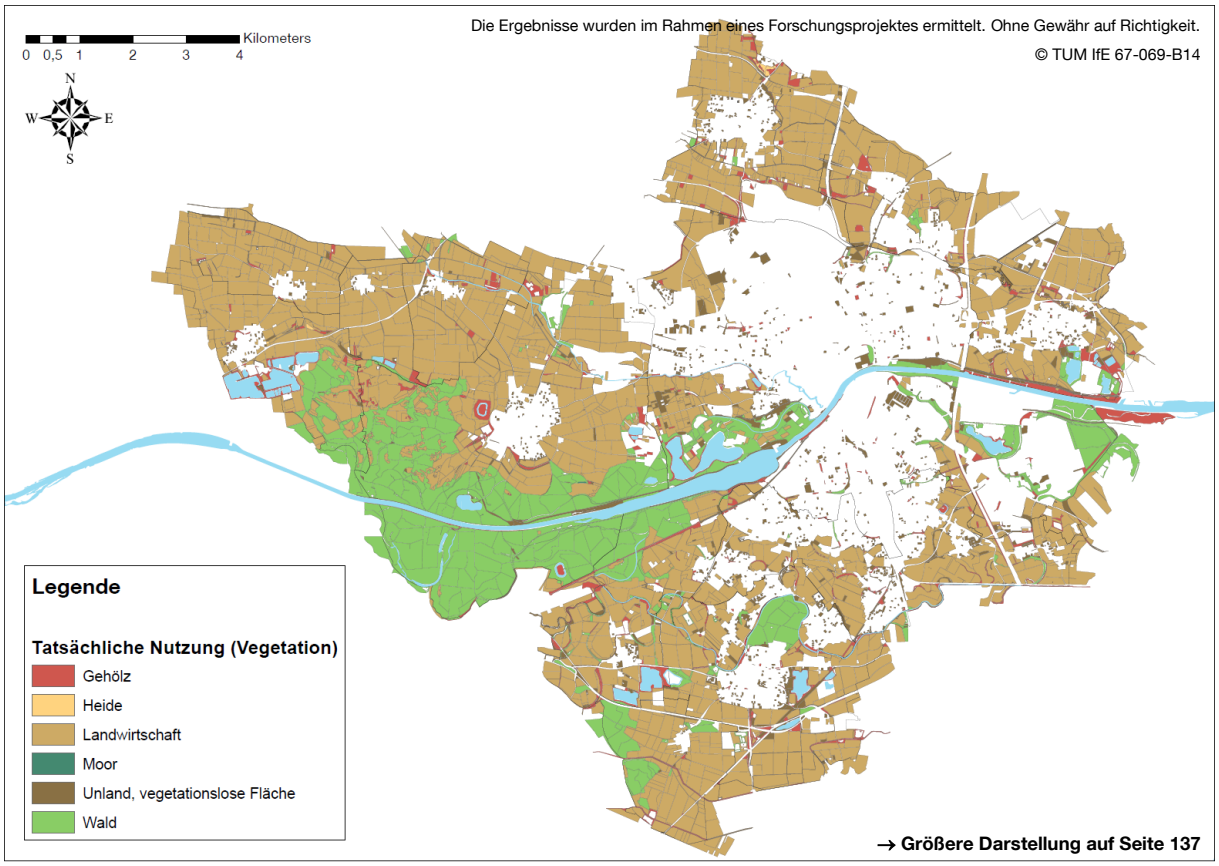




**Abbildung 2:** Tatsächliche Nutzung für Siedlung und Vegetation in Ingolstadt [2]

## 2.2 Bevölkerung

Die Stadt Ingolstadt ist von einem starken Bevölkerungswachstum geprägt. **Abbildung 3** zeigt den Verlauf der Bevölkerungsentwicklung in Ingolstadt vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2012 auf.

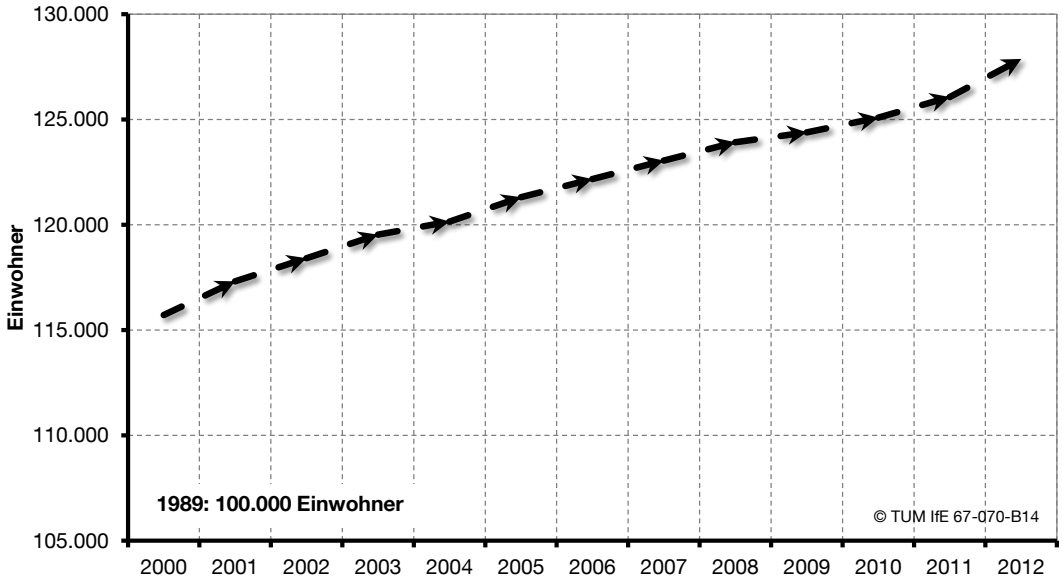



**Abbildung 3:** Bevölkerungsentwicklung in Ingolstadt [4]

Im Jahr 1989 konnte die Einwohnerzahl von 100.000 überschritten und Ingolstadt folglich als Großstadt bezeichnet werden. Allein seit dem Jahr 2000 ist ein kontinuierliches und nahezu lineares Wachstum in der Einwohnerentwicklung festzustellen. Im Jahr 2012 lebten gegenüber dem Jahr 2000 etwa 10 % mehr Menschen in Ingolstadt. Sowohl die natürliche Bevölkerungsbewegung als auch die Wanderungen zeigen für Ingolstadt einen Überschuss [3]. Die Bevölkerungsdichte der Stadt liegt bei etwa 960 Einwohner/km$^2$.

Die demografische Struktur Ingolstadts ist von einem hohen Anteil junger Menschen unter 25 Jahren charakterisiert (ca. 25 %). Der Anteil der über 65-jährigen an der Gesamtbevölkerung beträgt rund 19 % [3].

## 2.3 Beschäftigungsstruktur

Die Anzahl der sozialversicherungspflichtig beschäftigten Arbeitnehmer (Beschäftigte am Arbeitsort) in Ingolstadt ergab im Jahr 2011 rund 84.800. Nach Abzug aller Beschäftigten am Wohnort ergibt sich ein positiver Pendlersaldo in Ingolstadt von 35.353.

Die Aufteilung der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten auf die einzelnen Wirtschaftszweige in Ingolstadt kann **Tabelle 2** entnommen werden.

**Tabelle 2:** Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in Ingolstadt [3]

| *Wirtschaftszweig* | *2010* | *2011* |
|---|---|---|
| Beschäftigte am Arbeitsort | 80.393 | 84.788 |
| Land- und Forstwirtschaft, Fischerei | 76 | 86 |
| Produzierendes Gewerbe | 42.146 | 42.811 |
| Handel, Verkehr, Gastgewerbe | 11.915 | 12.126 |
| Unternehmensdienstleister | 12.602 | 15.899 |
| Öffentliche und private Dienstleister | 13.654 | 13.866 |
| Beschäftigte am Wohnort | 47.414 | 49.435 |
| Pendlersaldo | 32.979 | 35.353 |

Die starke Prägung Ingolstadts vom produzierenden Gewerbe spiegelt sich auch in der hohen Anzahl an Beschäftigten in diesem Wirtschaftszweig wider. Mehr als 50 % aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Ingolstadt sind im produzierenden Gewerbe tätig. Dies lässt sich unter anderem auf die große Bedeutung Ingolstadts als Standort für die Automobil- sowie die Erdölindustrie zurückführen. Die geringste Anzahl an Beschäftigten entfällt auf den land- und forstwirtschaftlichen Zweig, während die Beschäftigungsstruktur in den verbleibenden Wirtschaftszweigen ähnlich gestaltet ist.

# 3 Analyse des Ist-Zustandes

In den folgenden Ausführungen wird eine energetische Bestandsanalyse vorgenommen. Zunächst erfolgt eine Beschreibung der vorhandenen Energieerzeugungsstruktur in Ingolstadt. Anschließend wird auf das Netz sowie die Strukturdaten in den Sparten Strom, Gas und Fernwärme eingegangen, gefolgt von der Charakterisierung der allgemeinen Verbrauchsstruktur auf dem Stadtgebiet. Ferner wird die erarbeitete Energie- und $CO_2$-Bilanz vorgestellt.

## 3.1 Erzeugungsstruktur

Dem Stadtgebiet Ingolstadt können mehrere Kraftwerke zur Strom- und Wärmeerzeugung zugeordnet werden.

Zunächst ist das Laufwasserkraftwerk Ingolstadt zu nennen. Das Kraftwerk besitzt eine elektrische Nennleistung von 19,8 MW und erzeugt im Jahr eine Strommenge von etwa 130.000 MWh. Das Kraftwerk erzeugt Bahnstrom und speist ausschließlich in das Netz der DB Energie GmbH ein. Neben dem Donaukraftwerk existieren weitere kleinere Wasserkraftwerke entlang der Flüsse Schutter und Mailinger Bach. Insgesamt liefern diese vier kleineren Anlagen zusammen rund 10 MWh/a [5, 6].

Auf dem Ingolstädter Stadtgebiet findet keine Windkraftnutzung statt. Die Stadtwerke Ingolstadt (SWI) prüfen aber aktuell die Möglichkeit und die Rentabilität der Errichtung von oder der Beteiligung an Windkraftanlagen in der Ingolstädter Region [7].

Im Bereich der oberflächennahen Geothermie werden etwa 70 Erdwärmesonden sowie rund 180 Grundwasserwärmepumpen betrieben. Anlagen zur Nutzung von Tiefengeothermie sind in Ingolstadt nicht vorhanden. Allerdings wurde eine Thermalwasserbohrung auf dem Stadtgebiet vorgenommen. Das geförderte Wasser wird derzeit im Freizeitbad Wonnemar balneologisch genutzt [7, 8].

Im Jahr 2012 waren in Ingolstadt etwa 2.000 Solarthermieanlagen mit einer Gesamtkollektorfläche von 17.000 $m^2$ in Betrieb. Ferner wurden 1.736 Anlagen zur photovoltaischen Stromerzeugung eingesetzt. Die installierte Leistung im Bereich Photovoltaik betrug etwa 31 MW [7]. Mit der Annahme einer mittleren Modulfläche von etwa 1 $m^2$ pro 100 $W_p$, ergibt sich ein Flächenbedarf aller derzeit installierten Module in Ingolstadt von 310.000 $m^2$. Die Standorte der vorhandenen Anlagen sind in Abschnitt 7.5 grafisch dargestellt. Die EEG-Einspeisung aus Photovoltaik in Ingolstadt betrug im Jahr 2012 etwa 29,8 GWh [9]. In-

golstadt verfügt momentan über keine installierte Leistung im Bereich der Freiflächenphotovoltaik. In der sogenannten Solar-Bundesliga ist die Stadt regelmäßig auf den vorderen Plätzen zu finden (Solarthermiedichte: 0,13 $m^2$/Einwohner, Photovoltaikdichte: 282 W/Einwohner) [10].

In das Fernwärmenetz von Ingolstadt sind neben größeren Heizkraftwerken auch mehrere kleinere BHKW-Anlagen eingebunden. Dazu zählen die Anlagen Buxheimer Weg, Esplanade, Flandernkaserne und Hollerstauden. Das BHKW Hallenbad Mitte speist nicht in das Fernwärmenetz ein. Details zu den entsprechenden Anlagen sind in **Tabelle 3** enthalten.

**Tabelle 3**: BHKWs in Ingolstadt [11]

| *Anlage* | *Leistung [$MW_{brutto}$]* | *Thermische Leistung [$MW_{brutto}$]* |
|---|---|---|
| Buxheimer Weg | 2,72 | 11,24 |
| Esplanade | 1,54 | 9,62 |
| Flandernkaserne | 1,92 | 9,09 |
| Hallenbad Mitte | 0,54 | 1,83 |
| Hollerstauden | 7,69 | 39,14 |

Die Anlage mit der höchsten Leistung ist demnach das BHKW Hollerstauden. Die verbleibenden Anlagen tragen mit einer wesentlich kleineren Leistung zur Einspeisung in das Ingolstädter Netz bei. Gemäß den Stadtwerken Ingolstadt betrug die Abgabemenge an Wärme der Ingolstädter BHKWs im Gasjahr 2011 rund 38 GWh. Die Stromerzeugung lieferte im selben Zeitraum eine Menge von 7 GWh. Die angegeben Werte beziehen sich auf das Gasjahr (Oktober bis September) [12].

Die Müllverwertungsanlage Ingolstadt (MVA) (elektrische Netto-Nennleistung: 21,4 MW) konnte 2011 durch die thermische Behandlung von Restmüll elektrische Energie in Höhe von 74 GWh sowie thermische Energie bzw. Fernwärme in Höhe von etwa 148 GWh produzieren. Die Raffinerie Gunvor speist jährlich etwa 130 GWh in das Fernwärmenetz ein [5, 13, 14].

Auch im Bereich Biomasse sind auf dem Ingolstädter Stadtgebiet einzelne Erzeugungsanlagen vorzufinden. Dazu zählt zum einen eine Biogasanlage mit 250 kW elektrischer Leistung in Niederfeld. Diese Anlage speiste im Jahr 2012 etwa 2 GWh Strom ein. Zum anderen wird

in Gerolfing ein Biomassekraftwerk mit 5 kW elektrischer Leistung betrieben. Dessen Stromproduktion betrug im Jahr 2012 ca. 1.700 kWh [8, 15]. Des Weiteren wird seit 2012 eine Anlage zur Vergärung von Bioabfall auf dem Stadtgebiet betrieben. Durch die Behandlung von Rohschlamm in der Kläranlage des Zweckverbandes werden jährlich weitere etwa 3.100 MWh Strom erzeugt [7].

## 3.2 Verteilung

Im Abschnitt 3.1 wurde die Energieerzeugungsstruktur in Ingolstadt beschrieben. Im Folgenden wird auf das jeweilige Netz sowie die Strukturdaten in den Sparten Strom, Gas und Fernwärme eingegangen.

### 3.2.1 Sparte Strom

Die Stadtwerke Ingolstadt betreiben in Ingolstadt ein Stromnetz zur Versorgung mit elektrischer Energie. Dieses Netz beschränkt sich auf das Stadtgebiet. Der vorgelagerte Übertragungsnetzbetreiber ist die E.ON Netz GmbH, der auch die Audi AG mit elektrischer Energie versorgt [16].

Für das Jahr 2013 beläuft sich die Summe aller Einspeisungen in das Ingolstädter Stromnetz auf etwa 560 GWh (Hochspannung (HS): 446 GWh, Mittelspannung (MS): 88 GWh, Niederspannung (NS): 24 GWh). Dabei fallen ca. 16,5 GWh Netzverluste an [17]. Es folgt eine Stromabnahme von rund 545 GWh pro Jahr. Zusammen mit dem Stromverbrauch der Audi AG von 567 GWh, ergibt sich in Ingolstadt ein kumulierter Strombedarf von etwa 1.100 GWh pro Jahr.

**Abbildung 4** zeigt den Verlauf der Netzganglinie des Stromes aus dem Jahr 2013.

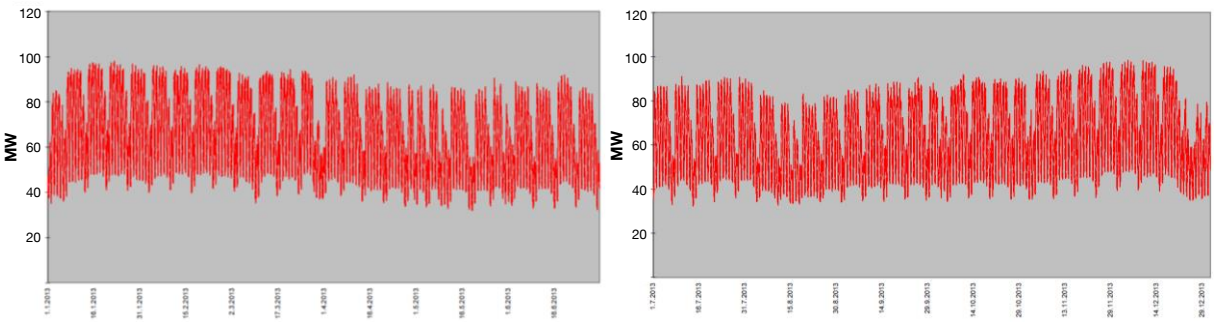



**Abbildung 4:** Netzganglinie Strom für das Jahr 2013 [18]

Die Jahreshöchstlast beträgt dabei knapp 100 MW.

Im Jahr 2013 entfielen rund 34 % der Stromlieferung der SWI im Versorgungsgebiet auf den Energieträger Kohle. An zweiter Stelle folgten mit 10 % Anteil Kernenergie. Sonstige fossile Energieträger erreichten einen Anteil von 9 % an der Gesamtstromlieferung. Der Anteil der erneuerbaren Energien, die nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gefördert werden, beläuft sich in Ingolstadt auf 29 %. Der verbleibende Stromanteil verteilt sich auf sonstige erneuerbare Energien (11 %) und den Energieträger Erdgas (7 %).

**Abbildung 5** zeigt die Stromzusammensetzung im Versorgungsgebiet der Stadtwerke Ingolstadt.

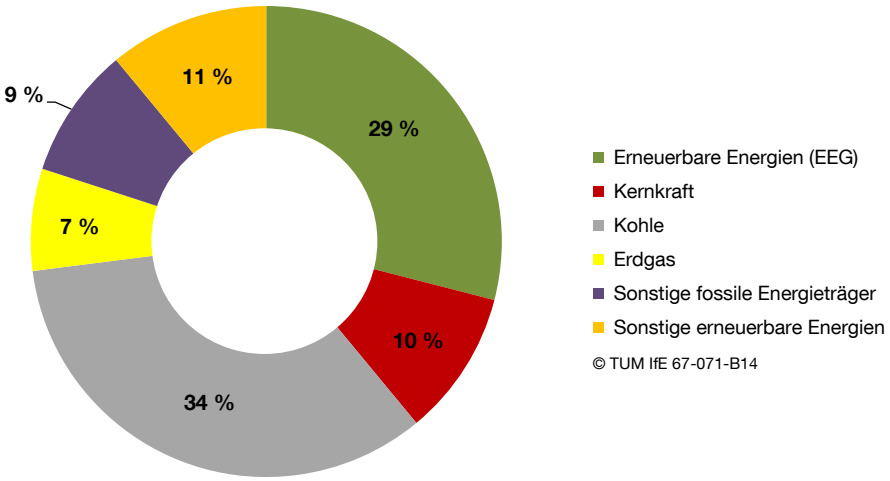



**Abbildung 5**: Strommix im Versorgungsgebiet der Stadtwerke Ingolstadt [19]

Der $CO_2$-Emissionsfaktor in Ingolstadt liegt derzeit bei 387 g/kWh (Vergleich Deutschland: ca. 520 g/kWh) [19].

Das Verteilungsnetz versorgt 28.020 Hausanschlüsse. Es besteht aus 505 Netz- und Übergabestationen sowie aus 1.798 km Kabel- und 103 km Freileitungen. Insgesamt werden 94 % aller Ingolstädter Haushalte beliefert [20, 21].

Dass bereits heute eine Versorgung nahezu aller Ingolstädter Haushalte mit im Stadtgebiet erzeugter erneuerbarer Energie rechnerisch möglich wäre, zeigt **Abbildung 6**.

Angenommen wird ein durchschnittlicher Jahresstromverbrauch von 3.500 kWh bis 4.000 kWh pro Haushalt. Ca. 60 % der Haushalte könnten somit durch die von der E.ON Wasserkraft zur Verfügung gestellte Strommenge von 130.000 MWh pro Jahr versorgt werden (Laufwasserkraftwerk Ingolstadt). Dieser Anteil dient derzeit jedoch zur Einspeisung in das Bahnstromnetz der DB Energie GmbH.

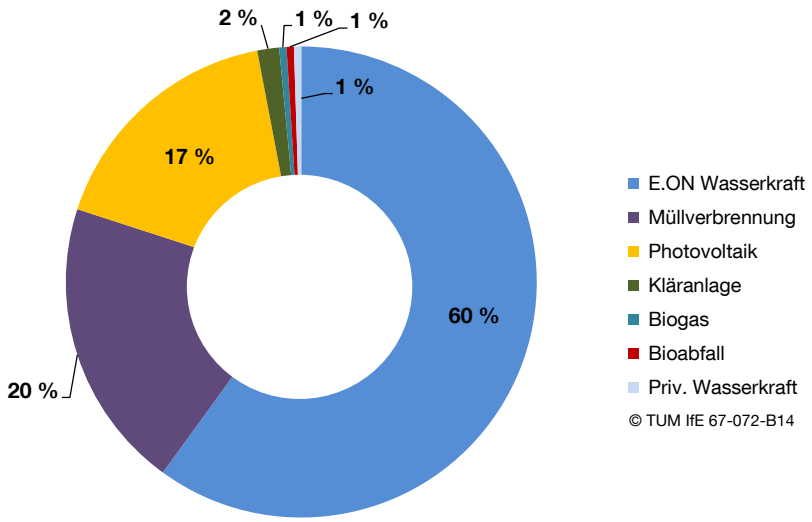



**Abbildung 6**: Regenerative Versorgung von Ingolstädter Haushalten [6]

Weitere 20 % werden durch die Müllverwertungsanlage Ingolstadt gedeckt. Die von Photovoltaik erzeugte Strommenge reicht rechnerisch aus, um 17 % der Ingolstädter Haushalte mit Strom zu beliefern. Gesamt betrachtet könnten etwa 200 GWh/a nur durch regenerative Energien zur Verfügung gestellt werden [6].

### 3.2.2 Sparte Gas

Die Gasversorgung in Ingolstadt erstreckt sich über das gesamte Stadtgebiet sowie weitere 16 Umlandgemeinden. Dazu zählen die Städte Vohburg und Geisenfeld sowie die umliegenden Gemeinden Baar-Ebenhausen, Buxheim, Eitensheim, Gaimersheim, Großmehring, Hepberg, Karlskron, Kösching, Lenting, Manching, Pförring, Reichertshofen, Stammham und Wettstetten. Das Versorgungsgebiet ist in **Abbildung 7** visualisiert.

Im Konzessionsgebiet sind etwa 243.000 Einwohner mit Haupt und Nebenwohnsitz gemeldet. Die versorgte Fläche beläuft sich auf ca. 98 $km^2$, während das gesamte Konzessionsgebiet etwa 670 $km^2$ groß ist [22, 23].

Der vorgelagerte Gasnetzbetreiber ist die bayernets GmbH. Über die sechs Übergabestationen bzw. Einspeisepunkte Denkendorf, Steinheilstraße, Zuchering, Karlskroner Straße, Geisenfeld und Vohburg erfolgt die Kopplung beider Verteilnetze. Im Gasnetz der Stadtwerke Ingolstadt sind Hochdruckleitungen, Mitteldruckleitungen und Niederdruckleitungen vorhanden. Die Hochdruckleitungen weisen eine Länge von 275 km auf, die Mitteldruckleitungen 120 km und die Niederdruckleitungen 445 km [22, 23].

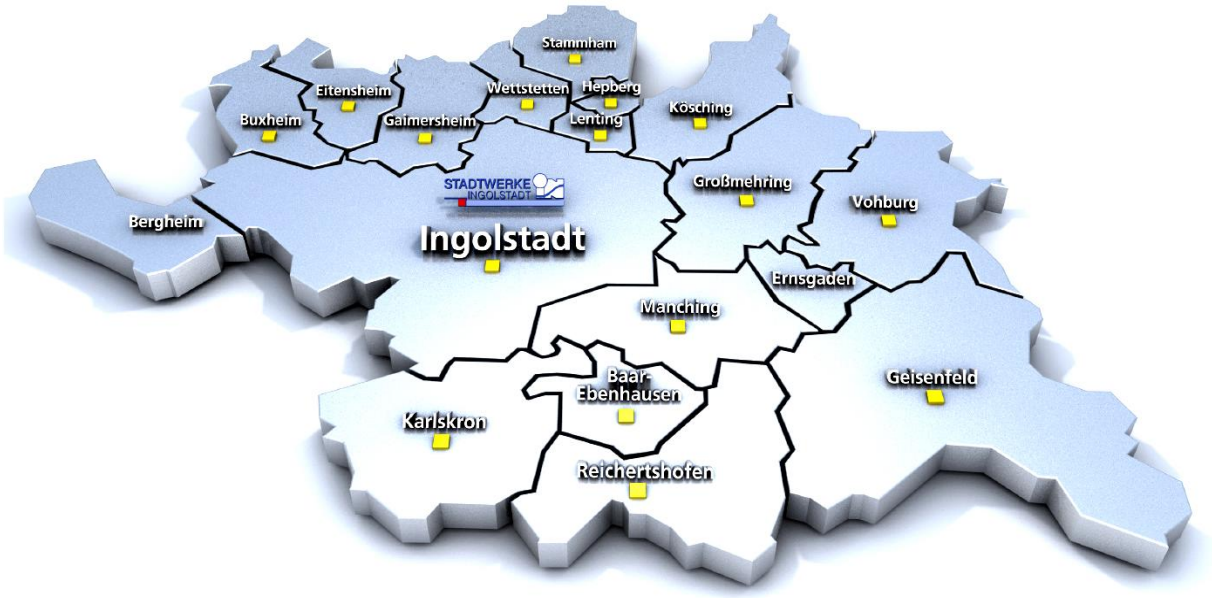



**Abbildung 7**: Versorgungsgebiet Gas [24]

Insgesamt ergeben sich für das gesamte Konzessionsgebiet 25.140 Ausspeisepunkte (Hochdruck: 3.700, Mitteldruck: 1.800, Niederdruck: 19.700) [23].

Im Jahr 2013 wurde eine Gasmenge von etwa 2.090 GWh abgesetzt [23]. Dabei entfallen rund 1.200 GWh auf das Stadtgebiet Ingolstadt [12], die verbleibende Gasmenge geht an die umliegenden Gemeinden.

Die Netzganglinie der Erdgaseinspeisung wird in **Abbildung 8** verdeutlicht. Die zeitgleiche Jahreshöchstlast aller Einspeisungen beträgt 638 MW.

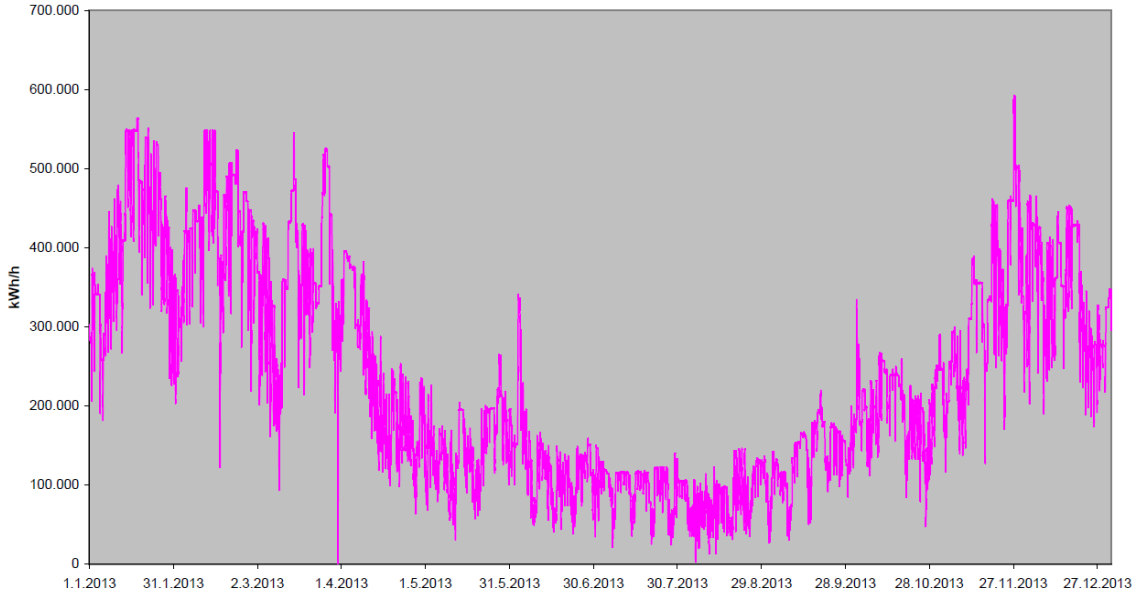



**Abbildung 8:** Erdgaseinspeisung im Versorgungsgebiet [25]

Mit Ausnahme kleinerer Ortsteile wie Mühlhausen, Pettenhofen oder Irgertsheim im Westen des Landkreises, sind annähernd alle Stadtteile an das Gasnetz angeschlossen.

**Abbildung 9** zeigt die bestehenden Gasleitungen im Versorgungsgebiet Ingolstadt.

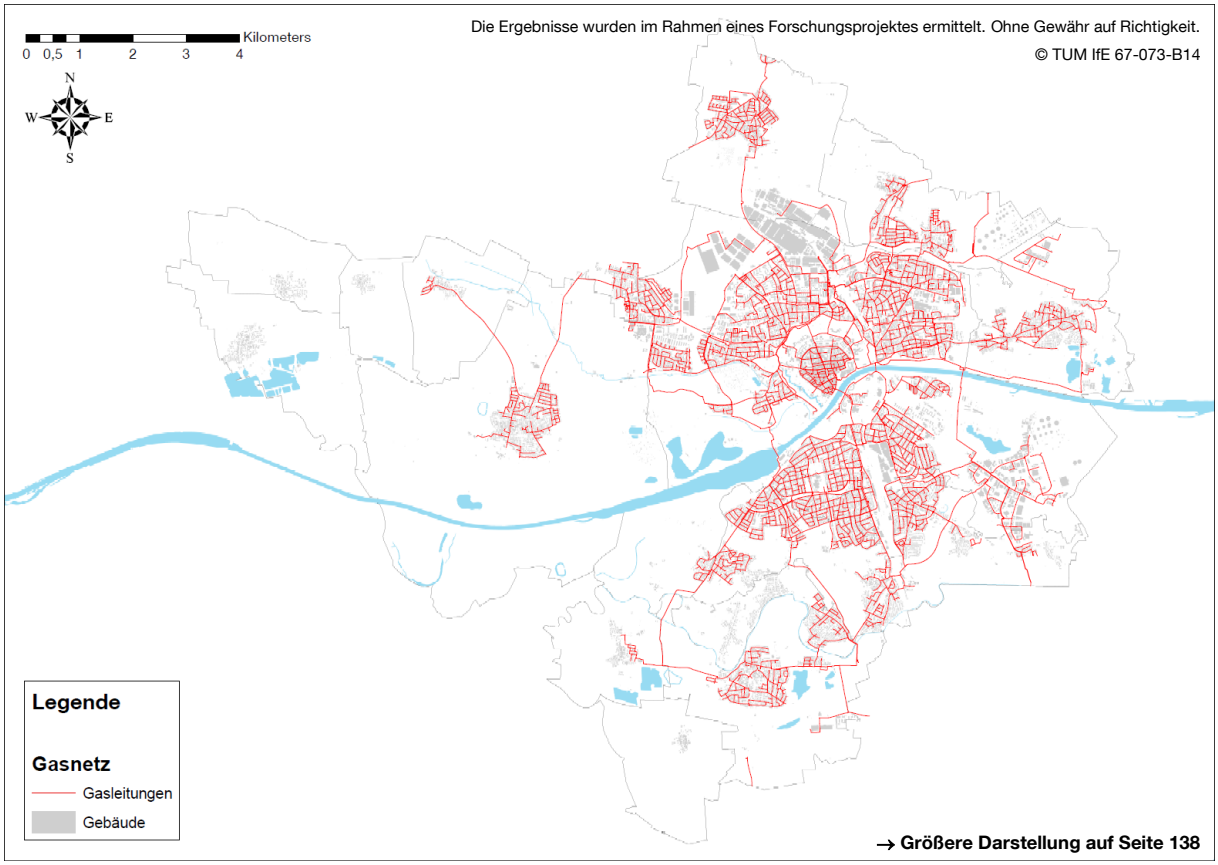



**Abbildung 9**: Gasleitungen im Versorgungsgebiet Ingolstadt [12, 2]

Das bereits gut ausgebaute Gasnetz könnte dazu beitragen – auch im Hinblick auf die Ingolstädter Fernwärme-Infrastruktur – Klein-Blockheizkraftwerke (Klein-BHKWs) zur Wärmeversorgung dezentral einzusetzen.

### 3.2.3 Sparte Fernwärme

Die Fernwärme ist in Ingolstadt weniger flächendeckend ausgebaut im Vergleich zum Gasnetz. Das Versorgungsnetz für Fernwärme wird von den Stadtwerken Ingolstadt betrieben. Im gesamten Stadtgebiet existieren etwa 605 Hausanschlüsse, die über ein Transportnetz von 66 km Länge versorgt werden (9 Anschlüsse pro km) [21]. Dabei wird hauptsächlich die industrielle Abwärme der Raffinerie Gunvor und der Ingolstädter Müllverwertungsanlage zur Wärmeversorgung genutzt.

**Abbildung 10** zeigt das Fernwärme-Versorgungsgebiet der Stadtwerke Ingolstadt sowie die vorhandenen Wärmeerzeugungsanlagen.

**Abbildung 10**: Fernwärme-Versorgungsgebiet der Stadtwerke Ingolstadt [26]

Die Versorgung konzentriert sich dabei auf das Stadtzentrum (Innenstadt), auf das Gebiet Nahe dem Westpark nordwestlich des Stadtzentrums sowie auf die Region um die frühere Pionierkaserne. Auch große Verbraucher wie die Audi AG, das Güterverkehrszentrum oder das Klinikum Ingolstadt sind an das Fernwärmenetz der Stadtwerke Ingolstadt angeschlossen.

Die Raffinerie Gunvor sowie die Müllverwertungsanlage im Osten der Stadt sind die wichtigsten Fernwärmequellen in Ingolstadt. Die MVA produziert jährlich Fernwärme in Höhe von 148 GWh. Weitere 130 GWh werden seit dem Jahr 2011 von der Raffinerie Gunvor bereitgestellt. Diese beiden Anlagen speisen etwa 280 GWh Wärme in das Ingolstädter Fernwärmenetz ein. Daneben existieren mit den BHKWs Hollerstauden, Buxheimer Weg, Flandernkaserne sowie Esplanade vier weitere Wärmeerzeugungsanlagen im Stadtgebiet von Ingolstadt, die in das Fernwärmenetz einspeisen. Diese tragen rund 38 GWh zur jährlichen Einspeisemenge bei. Darüber hinaus werden zusätzlich zur Spitzenabdeckung drei Heizkraftwerke eingesetzt (Ickstatt Realschule, Christoph-von-Schmid-Straße, Reserve-/Spitzenheizkraftwerk MVA). Da es sich hierbei um Anlagen zur Spitzenlastdeckung handelt, ist die jährliche Einspeisemenge stark abhängig von Witterungsverhältnissen, dem Bezugsverhalten der Kunden und der Einspeisestabilität von Gunvor und MVA. So ergeben sich aus

den letzten beiden Jahren Einspeisemengen von 28 GWh bis 38 GWh. Das BHKW Hallenbad Mitte wird ausschließlich zur Eigenversorgung genutzt und bedient sowohl das Hallenbad Mitte als auch das Freibad. Es erfolgt keine Einspeisung in das Ingolstädter Fernwärmenetz.

124 GWh Fernwärme werden derzeit allein von der Audi AG abgenommen [27]. Die restliche Wärmemenge ist dem GHD-Sektor, den Haushalten sowie den öffentlichen Gebäuden zuzuschreiben.

**Abbildung 11** macht noch einmal grafisch den heutigen Ausbaugrad der Fernwärme in Ingolstadt deutlich.

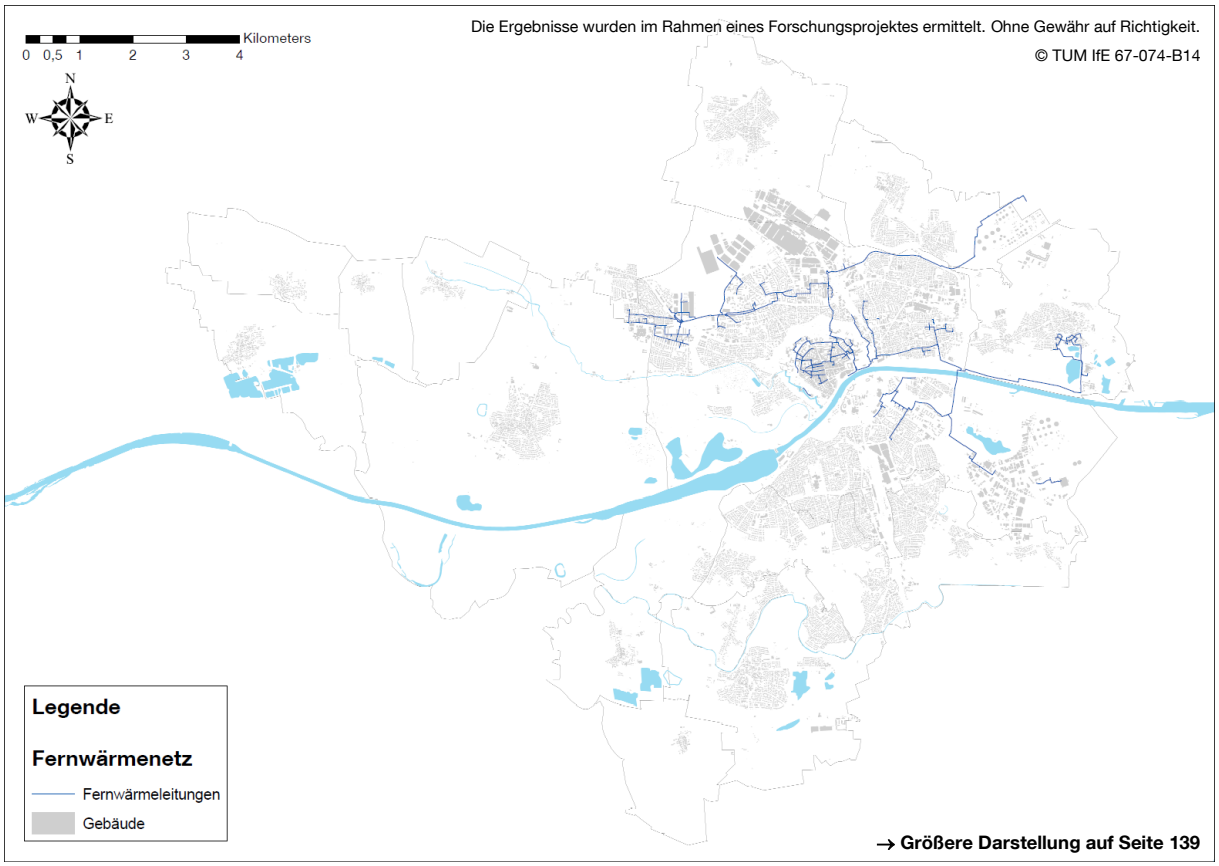



**Abbildung 11**: Fernwärmeleitungen im Versorgungsgebiet Ingolstadt [12, 2]

Hauptsächlich werden nördlich der Donau Verbraucher mit Fernwärme versorgt. Südlich der Donau liegen nur noch kleinere Ausläufer des Fernwärmenetzes. Das existierende Gasnetz wiederum (vgl. Abbildung 9) kann somit einen Anreiz zum dezentralen Einsatz von Klein-BHKW-Anlagen liefern.

## 3.3 Verbrauchsstruktur

In den folgenden Ausführungen wird der Energieverbrauch für die Bereiche Kommunale Liegenschaften, Haushalte, Industrie sowie für Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) abgeschätzt und beschrieben.

### 3.3.1 Energieverbrauch Kommunale Liegenschaften

Der Energieverbrauch für die städtischen und energiedienstlich betreuten Gebäude wird in Ingolstadt erfasst. Insgesamt ergibt sich für die kommunalen Liegenschaften ein Energieverbrauch von annähernd 43 GWh pro Jahr. Zur Deckung des Wärmebedarfs werden jährlich etwa 34,4 GWh aufgebracht, der Stromverbrauch beläuft sich auf 8,5 GWh.

Die Zusammensetzung der Wärmebedarfsdeckung in den kommunalen Gebäuden ist in **Abbildung 12** dargestellt.

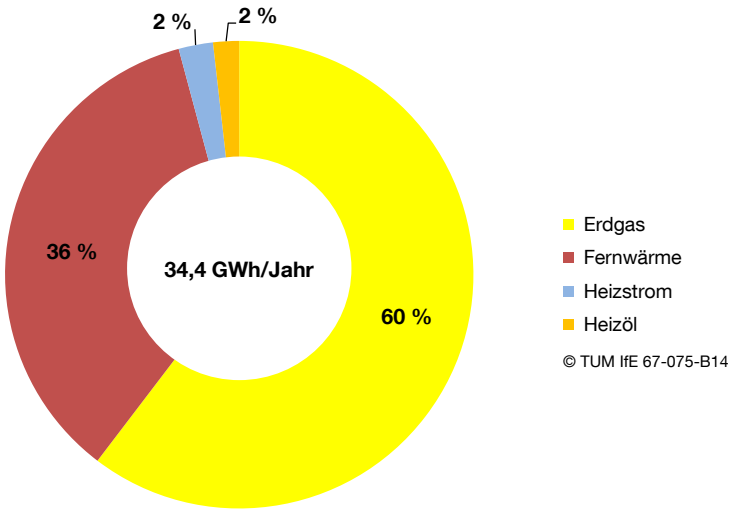



**Abbildung 12:** Wärmebedarfsdeckung der kommunalen Liegenschaften [28]

Der größte Teil des Wärmebedarfs (62 %) wird über die fossilen Energieträger Erdgas und Erdöl gedeckt. 36 % des kommunalen Wärmebedarfs werden über Fernwärme abgedeckt, während der verbleibende Teil von 2 % in die Kategorie Heizstrom fällt.

**Tabelle 4** benennt die absoluten Werte der zur Wärmebedarfsdeckung für die kommunalen Gebäude herangezogenen Energieträger.

**Tabelle 4:** Wärmebedarfsdeckung der kommunalen Liegenschaften [28]

| *Wärmebedarf* | *Erdgas [MWh]* | *Fernwärme [MWh]* | *Heizstrom [MWh]* | *Heizöl [MWh]* |
|---|---|---|---|---|
| Gesamt | 2.080 | 12.200 | 820 | 620 |

Insgesamt ergibt sich für den Wärmebedarf der energiedienstlich betreuten Gebäude in Ingolstadt ein spezifischer Kennwert von etwa 98 kWh/($m^2$ a) [28].

Der Strombedarf aller städtischen Gebäude macht etwa 20 % des Gesamtenergiebedarfs der kommunalen Liegenschaften aus. Dabei ergibt sich ein spezifischer Kennwert von ca. 24 kWh/($m^2$ a) [28].

### 3.3.2 Energieverbrauch Haushalte

Im Jahr 2012 bestanden in Ingolstadt 25.815 Wohngebäude mit insgesamt 63.397 Wohnungen. Zwei Drittel der Wohngebäude verfügen dabei über lediglich eine Wohnung. Insgesamt kann von einer Gesamtwohnfläche in Ingolstadt von 5.472.200 $m^2$ ausgegangen werden, was einer durchschnittlichen Haushaltsgröße von etwa 86 $m^2$ entspricht [29].

Der Wärmebedarf eines durchschnittlichen Haushaltes wird entscheidend vom Bedarf an Raumheizwärme geprägt. Hier kann von einem hohen Einsparpotential ausgegangen werden.

Der Wärmebedarf aller Gebäude in Ingolstadt wird in Kapitel 4 gebäudebezogen basierend auf Baualter und Nutzungsart ermittelt (Methodik siehe Abschnitt 4). Dabei lässt sich insgesamt ein Energiebedarf für Raumheizwärme und Brauchwarmwasser aller auf Wohnbauflächen stehender Gebäude von etwa 1,1 TWh ermitteln.

Daten zur Zusammensetzung der Wärmebedarfsdeckung im Ingolstädter Haushaltssektor liegen nicht vor. Der Anteil des Beitrags einzelner Energieträger zur Wärmebedarfsdeckung lässt sich jedoch abschätzen [30]. Der Anteil der Fernwärme kann aus den Informationen zur Fernwärmestruktur angenähert werden, während die Verteilung der Haushalte, die über eine gas- oder heizölgefeuerte Heizeinrichtung verfügen, an die Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland angelehnt ist [31].

Die abgeschätzte Zusammensetzung der Wärmebedarfsdeckung in Ingolstadt demonstriert **Abbildung 13**.

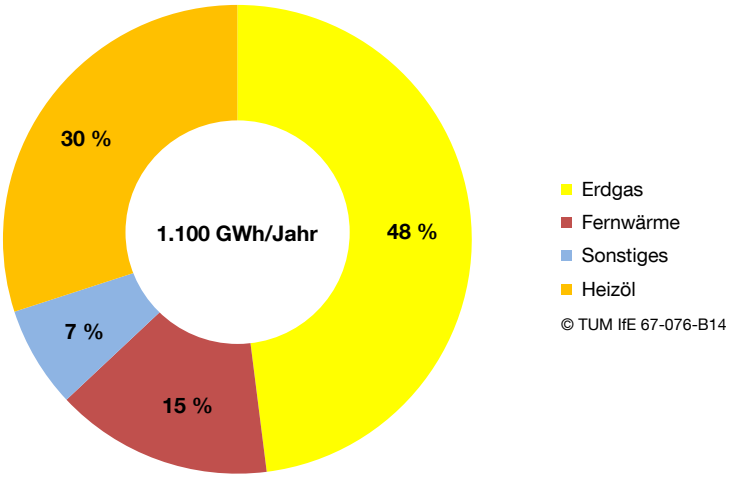



**Abbildung 13:** Abgeschätzte Wärmebedarfsdeckung im Haushaltssektor [31, 30]

Etwa 78 % des Wärmebedarfs werden über erdgas- und heizölgefeuerte Einrichtungen bereitgestellt. Auf die Fernwärme entfallen etwa 15 %. Unter Sonstiges fallen Technologien wie Stromheizungen oder die Bedarfsdeckung über Wärmepumpen.

Die absoluten Werte sind **Tabelle 5** zu entnehmen.

**Tabelle 5:** Abgeschätzte Wärmebedarfsdeckung im Haushaltssektor [31, 30]

| *Wärmebedarf* | *Erdgas [GWh]* | *Fernwärme [GWh]* | *Heizöl [GWh]* | *Sonstiges [GWh]* |
|---|---|---|---|---|
| Gesamt | 530 | 165 | 330 | 77 |

Der Stromverbrauch der Ingolstädter Haushalte kann unter Verwendung statistischer Werte überschlägig ermittelt werden. Bei Zugrundelegung von haushaltsbezogenen (3.165 kWh/a) oder flächenbezogenen (36,4 kWh/(m$^2$ a)) Strombedarfen [32] ergibt sich für Ingolstadt ein jährlicher Gesamtstrombedarf der Haushalte von rund 210 GWh.

### 3.3.3 Energieverbrauch Industrie

Daten zur Bestimmung des Energieverbrauchs im Industriesektor liegen nicht vor. Die Abschätzung kann jedoch teilweise über die sozialversicherungspflichtig Beschäftigten im produzierenden Gewerbe und insbesondere über die bei der Audi AG beschäftigten Personen erfolgen [30]. Insgesamt sind in Ingolstadt 42.811 Personen im produzierenden Gewerbe tätig, wovon allein etwa 35.000 (80 %) der Audi AG zugehörig sind [27].

Im Jahr 2012 wurden von Audi insgesamt 1.266 GWh an Energie bezogen. Im Bereich der Heizenergie belaufen sich die Anteile für Erdgas auf 573 GWh, für Fernwärme auf 124 GWh sowie für Heizöl auf 3 GWh. Der Anteil von Heizöl am Gesamtbezug ist vernachlässigbar gering. Zur Sicherstellung der Stromversorgung wurden 567 GWh bezogen [27].

Ausgehend vom Pro-Kopf-Bezug der bei Audi beschäftigten Mitarbeiter kann für die verbleibenden Industrieunternehmen in Ingolstadt ein Erdgasbezug von etwa 180 GWh abgeschätzt werden. Über den Bezug von Fernwärme der verbleibenden Industriekunden können keine Aussagen getroffen werden.

Der Bezug von elektrischer Energie beläuft sich für die verbleibenden Industrieunternehmen auf etwa 160 GWh.

### 3.3.4 Energieverbrauch Gewerbe, Handel und Dienstleistung und Rest

Die verbleibenden Energiemengen (nach Abzug des Energieverbrauchs für kommunale Liegenschaften, Haushalte und Industrie) können dem GHD-Sektor zugeschrieben werden.

Da die zur Bestimmung des Energieverbrauchs im Wärmesektor notwendigen Daten nicht vorliegen, können für den Bereich GHD keine Abschätzungen für die Anteile unterschiedlicher Energieträger an der Wärmebedarfsdeckung gemacht werden.

Die benötigte elektrische Energie im GHD-Sektor beläuft sich auf rund 170 GWh, nach Abzug des Anteils für Haushalte, Industrie und kommunale Liegenschaften.

## 3.4 Energie- und $CO_2$-Bilanz

Im Folgenden wird die Energie- und $CO_2$-Bilanz für Ingolstadt vorgestellt. Diese wird basierend auf der vom Klimabündnis empfohlenen und bereits in Ingolstadt verwendeten Software ECORegion entwickelt. Dadurch ist die Vergleichbarkeit mit anderen Gemeinden aus dem Klimabündnis gegeben.

Grundsätzlich berücksichtigt die Bilanzierung der $CO_2$-Emissionen den Anteil der gesamten Stadt am Treibhausgasausstoß (Haushalte, Gewerbe, Industrie, Verkehr). Zudem werden neben den direkten Emissionen auch die indirekten vorgelagerten Emissionen (z. B. Kraftwerke) mitbilanziert. Somit erfolgen eine Bilanzierung des Endenergieverbrauchs sowie eine Bilanzierung auf LCA-Ebene (Life Cycle Assessment), in die auch die Emissionen der Vorketten miteinfließen.

Die Bilanz wird für den Zeitraum 2008 bis 2012 erstellt und berücksichtigt tatsächliche Verbräuche/Bedarfe sowie statistisch ermittelte Daten. Das Softwaretool erlaubt es, eine mög-

lichst genaue Abschätzung des Energieverbrauchs in Ingolstadt zu erreichen und somit die daraus resultierenden $CO_2$-Emissionen zu ermitteln.

### 3.4.1 Bilanzierungsmethodik

Basis der Bilanzierungsmethodik in ECORegion bildet die international angewandte Bilanzierungsmethodik nach IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Die IPCC-Methodik gilt als Standardvorgehen für die Erstellung von Treibhausgasinventaren für Länder, die das Kyoto-Protokoll ratifiziert haben [33].

In der Version ECORegion$^{smart}$, die für die Erstellung der $CO_2$-Bilanz verwendet wird, stützt sich die Bilanzierung des Endenergiebedarfs in den Bereichen Haushalte, Wirtschaft und Verkehr auf die exakte Methodik und die Daten der IPCC-Systematik bzw. des nationalen Treibhausgasinventars. Anstatt der Berücksichtigung aller relevanten Treibhausgase, erfolgt lizenzbedingt lediglich eine Ermittlung der $CO_2$-Emissionen [33].

Während die IPCC-Methodik die $CO_2$-Emissionen des Energiesektors auf dem Bilanzgebiet berücksichtigt, ermittelt ECORegion$^{smart}$ bei der LCA-Methodik zusätzlich die $CO_2$-Emissionen der Vorkette der Energieproduktion (Energiebereitstellung, Verteilung etc.) über einheitliche LCA-Faktoren sowie $CO_2$-Emissionsfaktoren. Bei der Methode nach IPCC werden der Energiebedarf des Energiesektors und die darin entstehenden $CO_2$-Emissionen analog der übrigen Bereiche bilanziert [33].

Die von ECORegion ermittelten $CO_2$-Emissionen weisen daher eine leichte Abweichung gegenüber den Emissionen des nationalen Treibhausgasinventars auf (LCA-Ansatz: geringfügig höher; Endenergieansatz: geringfügig kleiner).

Für weitergehende Ausführungen zur Bilanzierungsmethodik von ECORegion sei auf die entsprechenden Veröffentlichungen von ECOSpeed verwiesen.

### 3.4.2 Vorgehensweise und Datengrundlage

Die Bilanzierungssoftware ECORegion wurde bereits in den zurückliegenden Jahren von der Stadt Ingolstadt zur Ermittlung einer $CO_2$-Bilanz eingesetzt. So wurde bei der Fortschreibung und Verbesserung der Bilanz im Rahmen der Erstellung des Energienutzungsplans zum Teil auf die bereits vorhandenen Daten zurückgegriffen. Darüber hinaus wurden neue Daten erhoben und der Software zur Verbesserung der Bilanz zugeführt.

Die folgenden Ausführungen geben einen Einblick in die verwendeten Daten und beschreiben die Vorgehensweise bei der Bilanzierung. Die Software ECORegion gliedert sich insgesamt in drei wesentliche Kategorien, die eine Dateneingabe erfordern:

**Mengengerüst**

Die im Mengengerüst enthaltenen Datentabellen für Einwohner, für Erwerbstätige nach Wirtschaftszweigen, für dem Emissionshandel unterliegende Anlagen, für zugelassene Fahrzeuge sowie Fahrleistungen können im ersten Schritt dazu genutzt werden, eine erste Grobbilanz (Startbilanz) zu erstellen.

Die Bilanz stützt sich auf die Einwohner mit Hauptwohnsitz in Ingolstadt. Die Erwerbstätigen umfassen alle Personen, die als Arbeitnehmer oder als Selbständige und mithelfende Familienangehörige tätig sind. Zu den Arbeitnehmern zählen alle Arbeiter, Angestellte, Beamte, geringfügig Beschäftigte und Soldaten. Der Verkehr gliedert sich in Personenverkehr, Personenfernverkehr, Straßengüterverkehr und sonstigen Güterverkehr.

Als Datengrundlage dienen hierzu hauptsächlich Werte aus den Statistischen Jahrbüchern der Stadt Ingolstadt und weiteren Stellen der Stadt Ingolstadt. Soweit möglich, wurden auch Daten des Bayerischen Landesamtes für Statistik und Datenverarbeitung und des Kraftfahrtbundesamtes herangezogen. Zudem wurden Informationen der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) zu $CO_2$-Emissionen von Anlagen, die dem europäischen Emissionshandel unterliegen, berücksichtigt.

**Energieverbrauch**

Die Datentabellen im Bereich Energieverbrauch beinhalten Werte für den Endenergieverbrauch der Haushalte, der Wirtschaftssektoren sowie der kommunalen Verwaltung für Gebäude und Infrastruktur. Darüber hinaus sind Daten für die prozentuale Aufteilung der Energieträger, aus welchen der verbrauchte Strom/die verbrauchte Fernwärme erzeugt wird, einzutragen.

Mithilfe der von den Stadtwerken Ingolstadt bereitgestellten Daten zum Strom- und Fernwärmeverbrauch war eine Berücksichtigung leitungsgebundener Energieträger für den Bilanzierungszeitraum von 2008 bis 2012 möglich. Zudem konnte durch Daten von weiteren Stellen der Stadt Ingolstadt (Amt für Gebäudemanagement) für Verbräuche der kommunalen Liegenschaften eine weitere Verbesserung der Bilanz erreicht werden.

Fehlende Daten (z. B. Verbrauch von Erdgas) entstammen der Startbilanz und wurden entsprechend für die Folgejahre von ECORegion fortgeschrieben oder abgeschätzt.

**Energieproduktion**

Der Bereich Energieproduktion in ECORegion befasst sich mit der regional produzierten Strom- und Fernwärmemenge sowie mit der durch Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten Energiemenge. Dieser Bereich konnte vollständig mit Daten der Stadtwerke Ingolstadt abgedeckt werden.

### 3.4.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse aus der Energie- und $CO_2$-Bilanzierung werden getrennt nach Endenergie und $CO_2$-Emissionen ausgewiesen. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus ECORegion dargestellt und beschrieben. Handlungsempfehlungen bezüglich der ermittelten $CO_2$-Bilanz werden in Abschnitt 8 gegeben.

#### 3.4.3.1 Energie

Der Endenergieverbrauch aufgelöst nach Sektoren für die Jahre 2008 bis 2012 ist in **Abbildung 14** dargestellt.

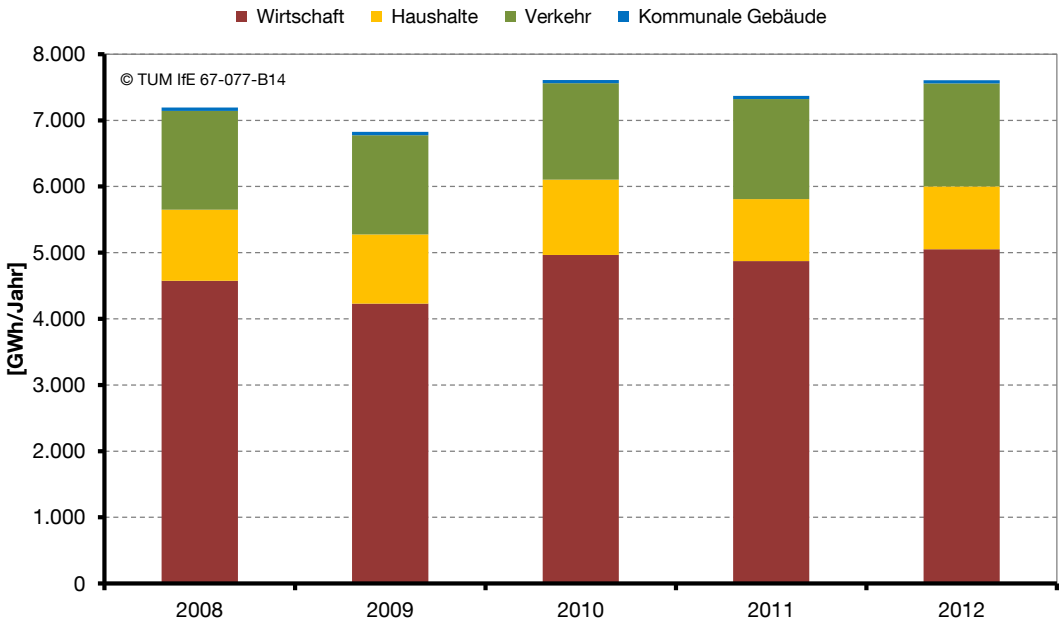



**Abbildung 14:** Endenergieverbrauch nach Sektoren von 2008 bis 2012 [34]

Betrachtet werden die Sektoren Wirtschaft/Industrie, Haushalte, Verkehr und Kommunale Gebäude.

Der größte Anteil am Endenergieverbrauch in Ingolstadt ergibt sich für den Wirtschaftssektor, während die kommunalen Gebäude einen vernachlässigbar kleinen Endenergieverbrauch aufweisen. Für die Haushalte beträgt der Verbrauch etwa 13,5 % im Jahr 2012, gefolgt vom Verkehrssektor.

Den Endenergieverbrauch in Ingolstadt aufgelöst nach Energieträgern zeigt unten folgende **Abbildung 15**[1].

Den größten Anteil am Endenergieverbrauch in der Stadt Ingolstadt hat Erdgas mit rund 25 %, gefolgt von Strom, Heizöl, Diesel, Fernwärme und Holz. Ein sehr geringer Anteil am Ingolstädter Endenergieverbrauch kann beispielsweise für Biogase und Abfall festgestellt werden.

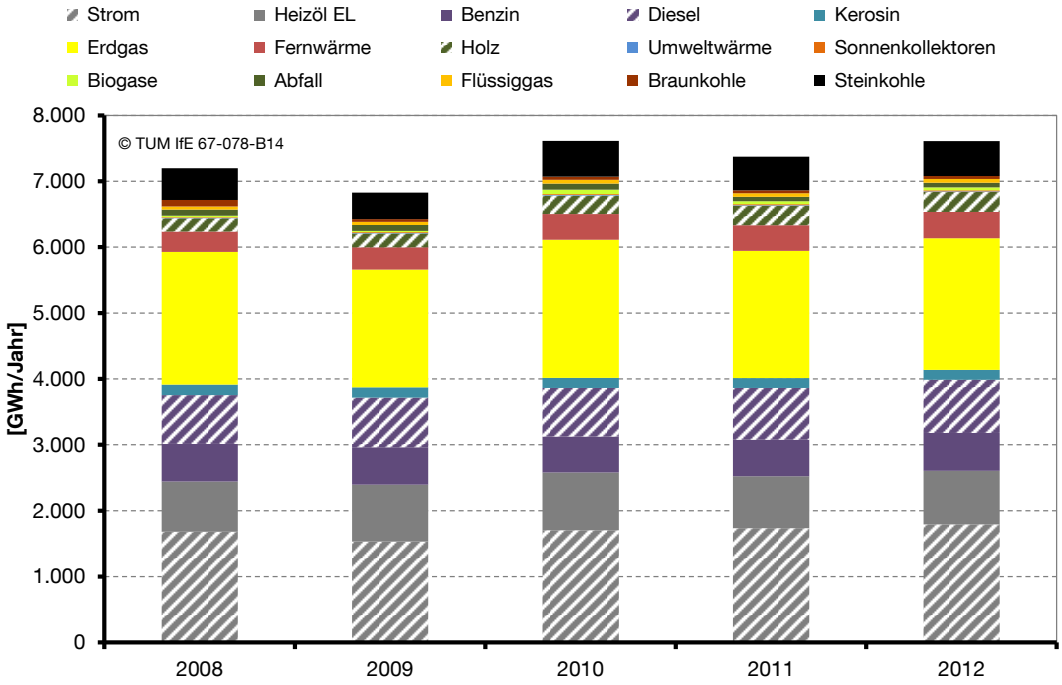



**Abbildung 15:** Endenergieverbrauch nach Energieträgern von 2008 bis 2012 [34]

**Abbildung 16** zeigt die prozentuale Verteilung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor aufgelöst nach Energieträgern im Jahr 2012.

Mehr als die Hälfte des Endenergieverbrauchs des Ingolstädter Verkehrssektors wird von ECORegion als Dieselverbrauch bilanziert. Benzin nimmt 37 % ein, gefolgt von Kerosin. Die

[1] Die Ergebnisse basieren auf bundesdeutschen Durchschnittswerten. Somit ergeben sich für Ingolstadt aufgrund der großen Bedeutung des produzierenden Gewerbes Anteile für Braun- und Steinkohle am Endenergieverbrauch (Verwendung in der Industrie z. B. zur Erzeugung von Prozesswärme). Eine zukünftige Erhebung von Daten zu Energieverbrauch und Emissionen der lokalen Industrie in Ingolstadt ist empfehlenswert.

Energieträger Strom und Erdgas fallen in der Bilanz für Ingolstadt vernachlässigbar gering aus.

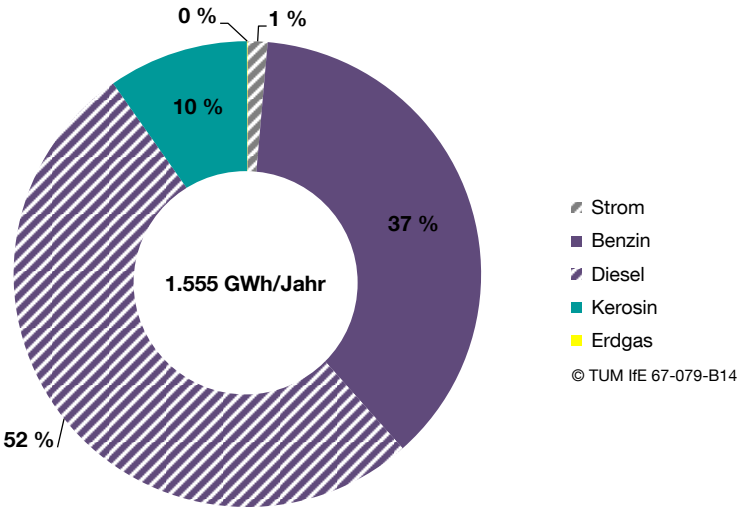



**Abbildung 16:** Endenergieverbrauch im Sektor Verkehr nach Energieträgern im Jahr 2012 [34]

Eine Aufschlüsselung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor nach Fahrzeugkategorien erfolgt in **Abbildung 17**.

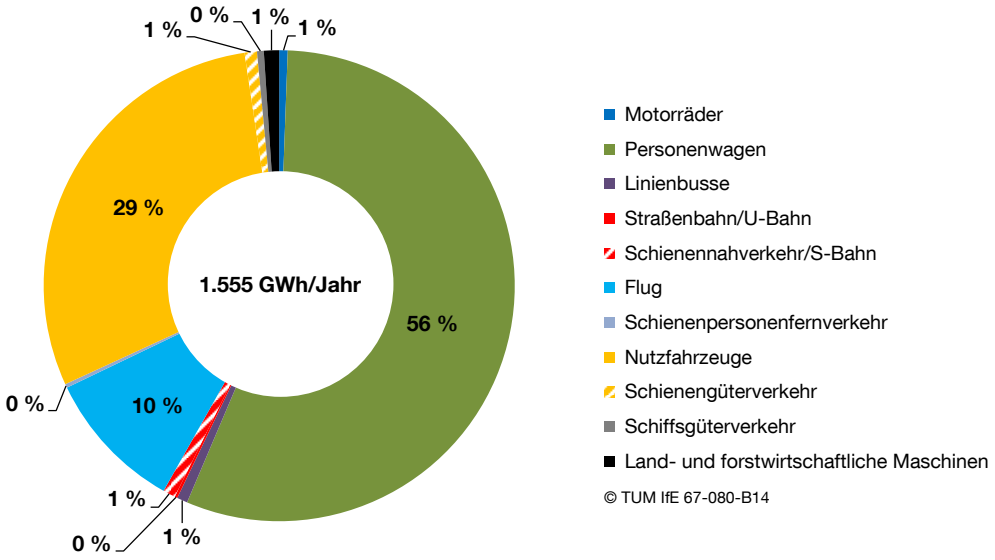



**Abbildung 17:** Endenergieverbrauch im Sektor Verkehr nach Verkehrsträgern im Jahr 2012 [34]

Gemäß der Ingolstädter Zulassungsstatistik fallen 56 % des Endenergieverbrauchs auf Personenkraftwagen (Individualverkehr), gefolgt von Nutzfahrzeugen und Flugverkehr. Die verbleibenden Verkehrsträger sind im kleinen einstelligen Prozentbereich zu sehen.

### 3.4.3.2 Treibhausgas

In ECORegion werden die Treibhausgasemissionen (lizenzbedingt hier nur $CO_2$-Emissionen) sowohl nach der IPCC-Systematik als auch nach der LCA-Methodik bestimmt.

Zunächst werden die Ergebnisse aus ECORegion gemäß der IPCC-Methodik vorgestellt.

**Basis Endenergie – IPCC**

Die in Ingolstadt verursachten $CO_2$-Emissionen aufgelöst nach Sektoren sind **Abbildung 18** zu entnehmen.

Die Zuordnung der Emissionen auf die Verursacher zeigt einen deutlich überwiegenden Anteil für die Industrie/Wirtschaft (58 %). Der Verkehr trägt mit 32 % zu den Gesamtemissionen bei, gefolgt von den Haushalten. Die erzeugten $CO_2$-Emissionen durch die kommunalen Gebäude sind als sehr gering einzustufen.

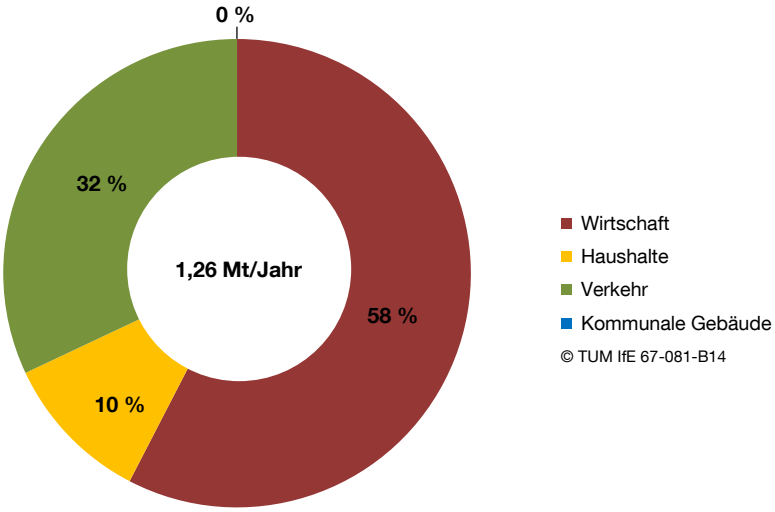



**Abbildung 18:** $CO_2$-Emissionen nach Sektoren im Jahr 2012 [34]

Welchen Anteil an den Ingolstädter $CO_2$-Emissionen die unterschiedlichen Energieträger halten, ist in **Abbildung 19**[2] demonstriert.

Auch hier kann analog zum Endenergieverbrauch der Schwerpunkt der $CO_2$-Erzeugung bei Erdgas festgestellt werden (ca. 32 %). Der Verbrauch von Diesel und Heizöl setzt etwa die

[2] Die Ergebnisse basieren auf bundesdeutschen Durchschnittswerten. Somit ergeben sich für Ingolstadt aufgrund der großen Bedeutung des produzierenden Gewerbes Anteile für Braun- und Steinkohle an den $CO_2$-Emissionen (Verwendung in der Industrie z. B. zur Erzeugung von Prozesswärme). Eine zukünftige Erhebung von Daten zu Energieverbrauch und Emissionen der lokalen Industrie in Ingolstadt ist empfehlenswert.

gleiche Menge an $CO_2$ frei, gefolgt von Steinkohle. Die verbleibenden bilanzierten Energieträger tragen nur in geringem Maße zur Verursachung von Treibhausgasemissionen in Ingolstadt bei.

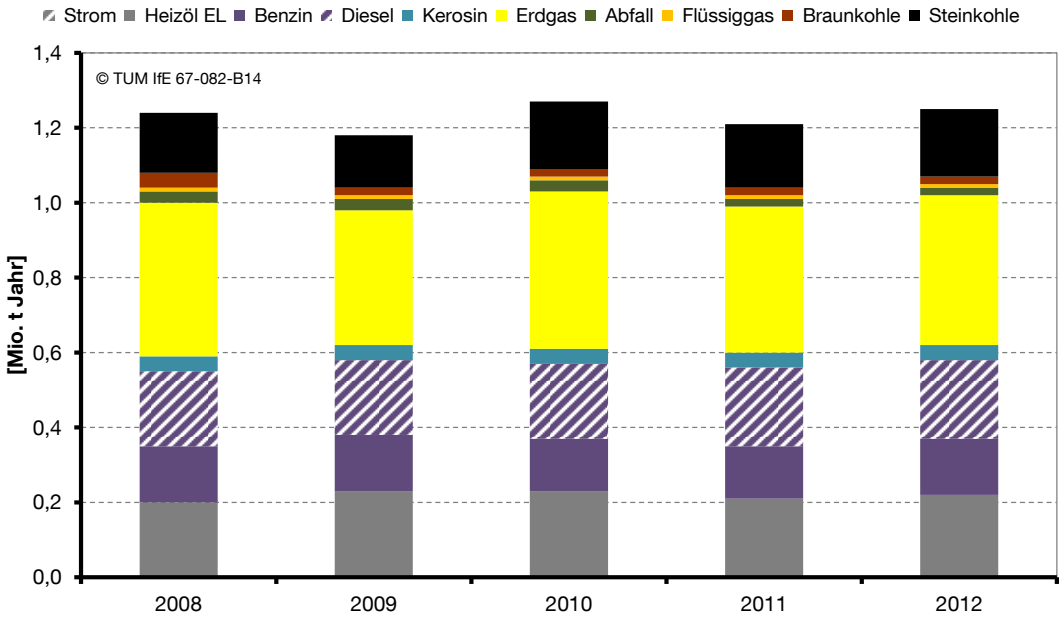



**Abbildung 19:** $CO_2$-Emissionen nach Energieträgern von 2008 bis 2012 [34]

Die $CO_2$-Emissionen nach Energieträgern für die Jahre 2008 bis 2012 sind gesondert für den Haushaltssektor in **Abbildung 20** aufbereitet.

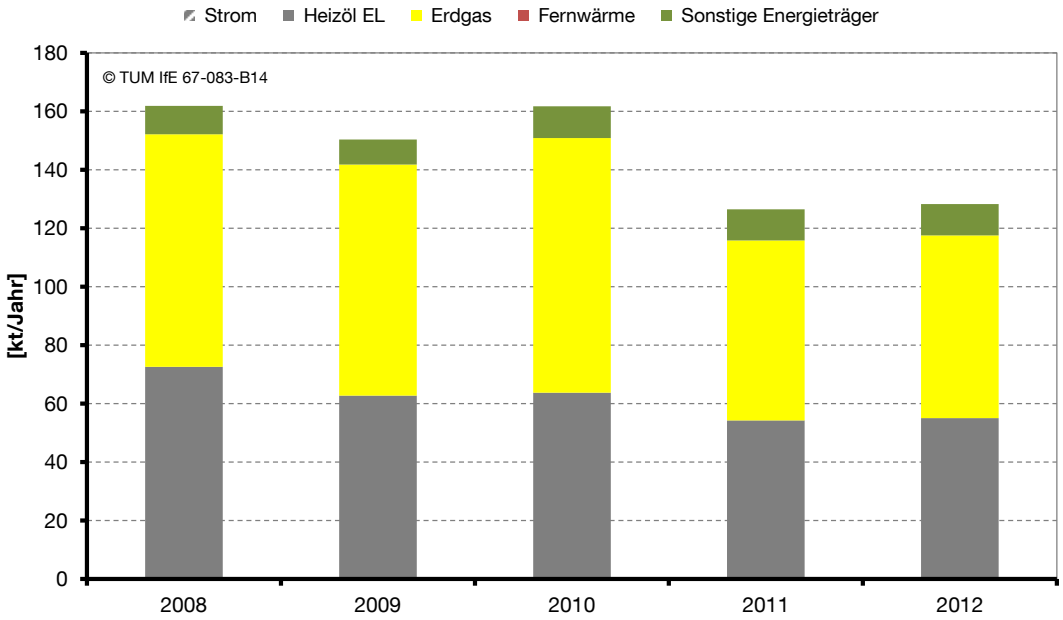



**Abbildung 20:** $CO_2$-Emissionen im Sektor Haushalte nach Energieträgern von 2008 bis 2012 [34]

Deutlich zu erkennen ist der hohe Anteil von Erdgas an den Gesamtemissionen (50 %). Heizöl macht ebenfalls einen großen Teil der Emissionen aus, während Fernwärme (Primärenergiefaktor von Null) aufgrund der Bilanzierungsmethodik keine Emissionen verursacht.

Die Bilanzierung der $CO_2$-Emissionen für den Verkehrssektor aufgelöst nach Energieträgern im Jahr 2012 erfolgt in **Abbildung 21**.

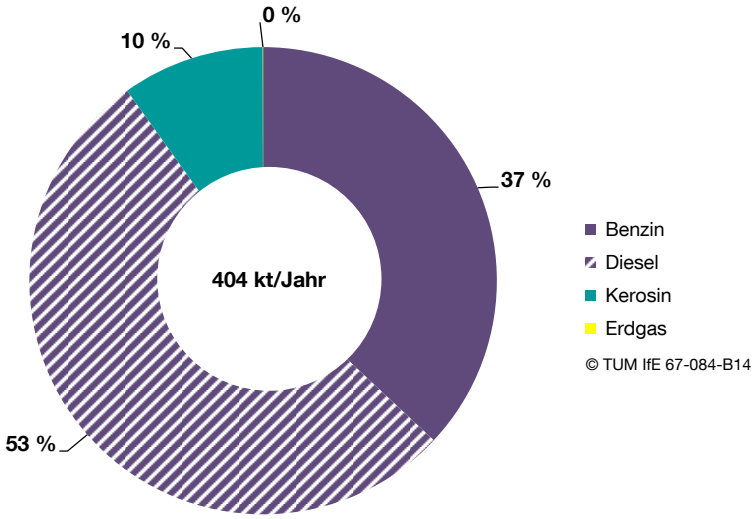



**Abbildung 21:** $CO_2$-Emissionen im Sektor Verkehr nach Energieträgern im Jahr 2012 [34]

53 % der Emissionen sind der Verbrennung von Diesel zuzuschreiben, gefolgt von Benzin und Kerosin. Die durch Erdgas verursachten Emissionen sind vernachlässigbar gering.

Nach Verursachern geordnet, ergibt sich eine Zuordnung der $CO_2$-Emissionen, wie sie in **Abbildung 22** dargestellt ist.

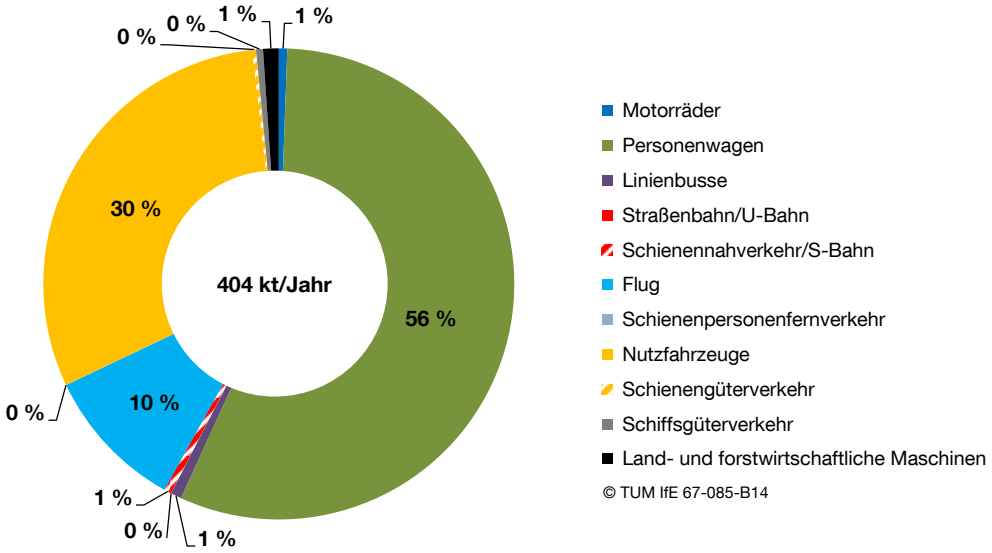



**Abbildung 22:** $CO_2$-Emissionen im Sektor Verkehr nach Verkehrsträgern im Jahr 2012 [34]

Personenkraftwagen tragen auch hier (analog zum Endenergieverbrauch) mit 56 % zu den Gesamtemissionen bei. Danach folgen Nutzfahrzeuge sowie der Flugverkehr.

Abschließend zeigt **Abbildung 23**[3] die bilanzierten $CO_2$-Emissionen pro Kopf in Ingolstadt.

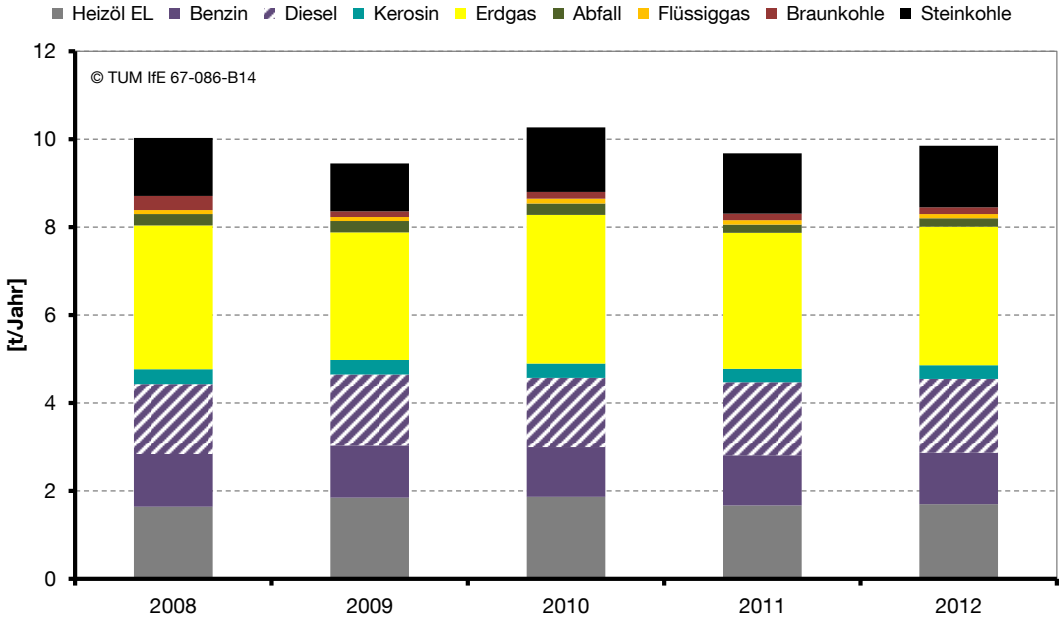



**Abbildung 23:** $CO_2$-Emissionen pro Einwohner nach Energieträgern [34]

Insgesamt gesehen liegen die Pro-Kopf-Emissionen in Ingolstadt von 2008 bis 2012 auf demselben Niveau und zeigen nur geringfügige Abweichungen zueinander. Sie belaufen sich nach IPCC-Methodik auf etwa 10 t/a für jeden Einwohner Ingolstadts.

### Basis Life Cycle Assessment – LCA

In den folgenden Abbildungen erfolgt die Untersuchung der $CO_2$-Emissionen auf Basis der oben beschriebenen LCA-Systematik. Insgesamt können durch die Ermittlung nach LCA-Methodik höhere Emissionen festgestellt werden, da nun auch die Emissionen der Vorketten (Energieproduktion) mitbilanziert werden.

Die dabei bilanzierten $CO_2$-Emissionen aufgelöst nach Sektoren in Ingolstadt werden in **Abbildung 24** beschrieben. Der Anteil der Wirtschaft/Industrie an den Gesamtemissionen steigt dabei durch die veränderte Bilanzierungsmethodik von 58 % auf 69 % an.

[3] Die Ergebnisse basieren auf bundesdeutschen Durchschnittswerten. Somit ergeben sich für Ingolstadt aufgrund der großen Bedeutung des produzierenden Gewerbes Anteile für Braun- und Steinkohle an den $CO_2$-Emissionen (Verwendung in der Industrie z. B. zur Erzeugung von Prozesswärme). Eine zukünftige Erhebung von Daten zu Energieverbrauch und Emissionen der lokalen Industrie in Ingolstadt ist empfehlenswert.

Der Verkehr trägt jährlich mit 18 % zu den 2,51 Mt Gesamtemissionen bei. Auch die Haushalte erfahren einen Anstieg gegenüber den Ergebnissen aus der IPCC-Analyse.

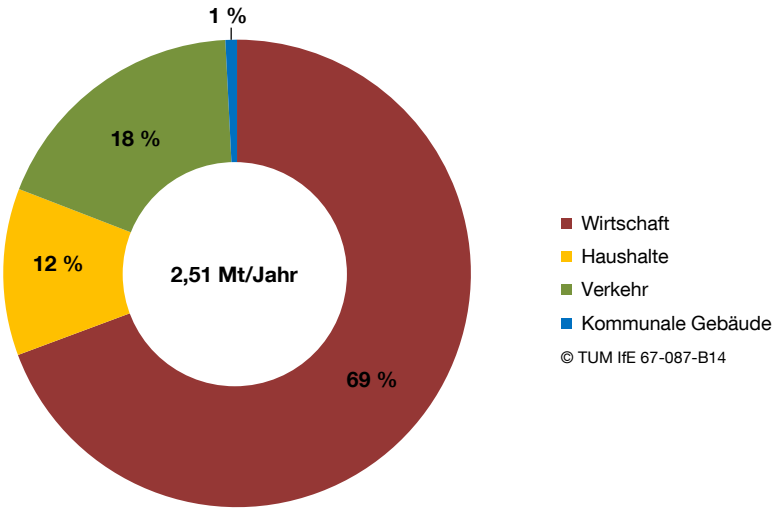



**Abbildung 24:** $CO_2$-Emissionen nach Sektoren im Jahr 2012 [34]

Die Zuordnung der $CO_2$-Emissionen zu Energieträgern erfolgt in **Abbildung 25**[4].

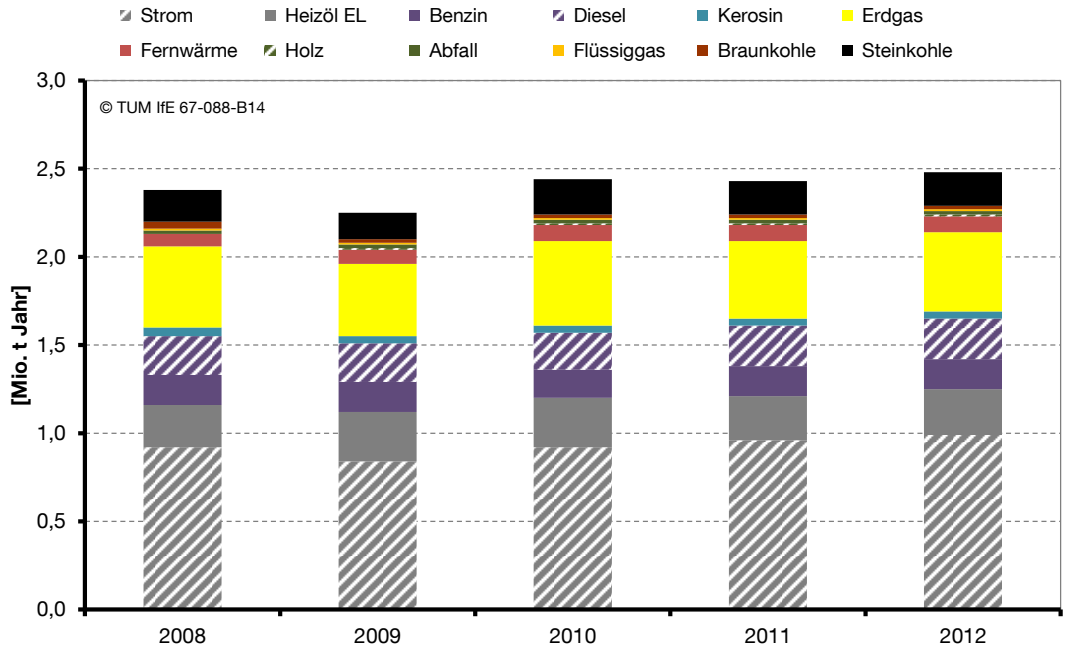



**Abbildung 25:** $CO_2$-Emissionen nach Energieträgern von 2008 bis 2012 [34]

[4] Die Ergebnisse basieren auf bundesdeutschen Durchschnittswerten. Somit ergeben sich für Ingolstadt aufgrund der großen Bedeutung des produzierenden Gewerbes Anteile für Braun- und Steinkohle an den $CO_2$-Emissionen (Verwendung in der Industrie z. B. zur Erzeugung von Prozesswärme). Eine zukünftige Erhebung von Daten zu Energieverbrauch und Emissionen der lokalen Industrie in Ingolstadt ist empfehlenswert.

Durch die Mitbilanzierung der Emissionen, die bei der Energieerzeugung und- verteilung entstehen, erfahren die Gesamtemissionen einen Anstieg um knapp 100 %. Der Anteil des Stromes beträgt dabei etwa 40 %, gefolgt von den Energieträgern Erdgas, Heizöl, Diesel und Benzin.

Eine Verdoppelung der verursachten $CO_2$-Emissionen ist auch im Sektor Haushalte festzustellen (**Abbildung 26**).

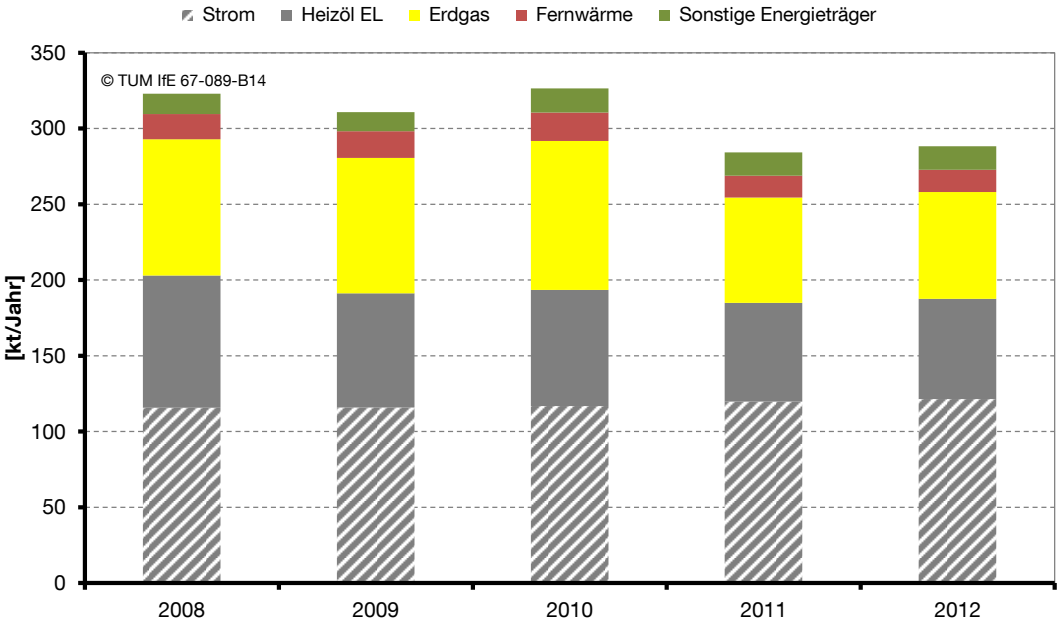



**Abbildung 26:** $CO_2$-Emissionen im Sektor Haushalte nach Energieträgern von 2008 bis 2012 [34]

Der Anteil des Stromes an den den Haushalten zugeordneten $CO_2$-Emissionen fällt auch hier aufgrund der gewählten Bilanzierungsmethodik am größten aus (ca. 40 %). Erdgas und Heizöl liegen auf gleichem Niveau, während nun auch Fernwärme aufgrund der gewählten Methodik Emissionen im Haushaltssektor verursacht.

Wird die Untersuchungsmethodik der Lebenszyklusanalyse (LCA) zugrunde gelegt, verursacht die Verbrennung von Diesel im Verkehrssektor auch hier die meisten $CO_2$-Emissionen (**Abbildung 27**).

Gegenüber der IPCC-Systematik fällt der Anteil für Benzin gleich aus. Strom erfährt einen Anstieg auf 3 %. Insgesamt steigen die Emissionen im Verkehrssektor von 404 kt/a auf nun 464 kt/a.

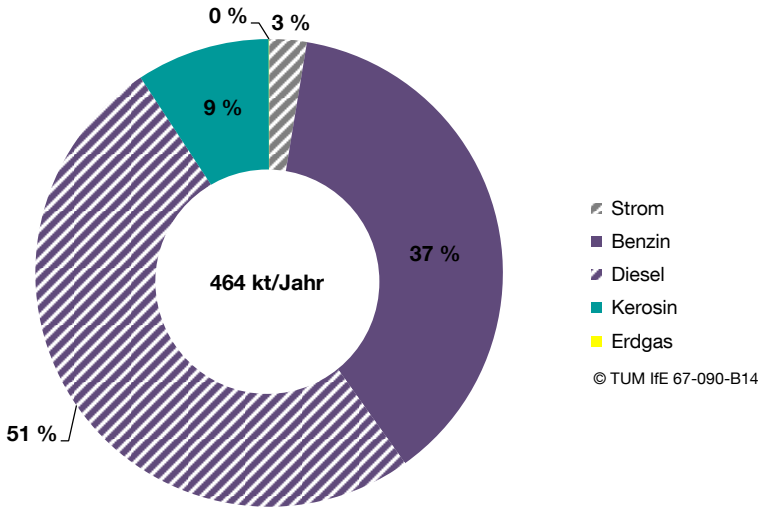



**Abbildung 27:** $CO_2$-Emissionen im Sektor Verkehr nach Energieträgern im Jahr 2012 [34]

Nach Verkehrsträgern aufgeschlüsselt gibt ECORegion folgende Werte an (**Abbildung 28)**.

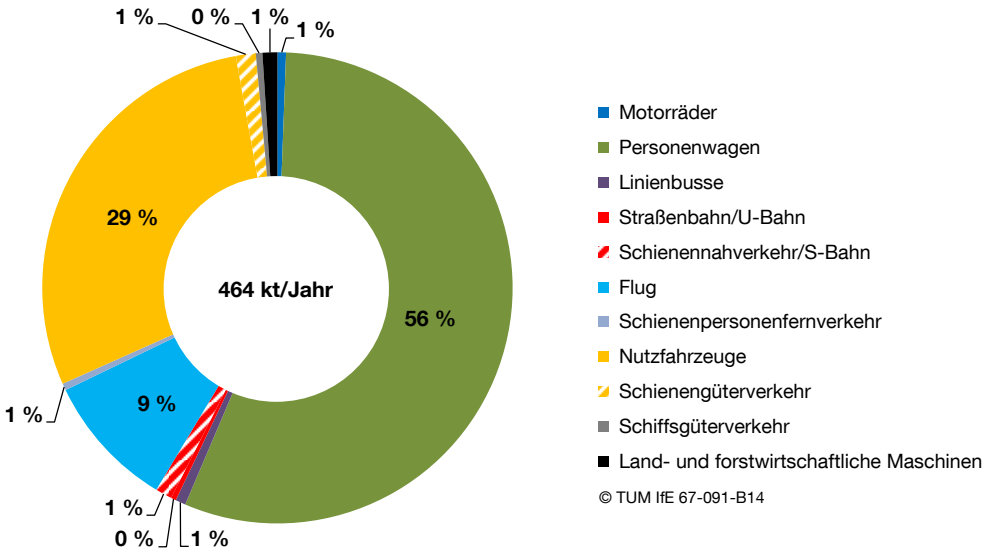



**Abbildung 28:** $CO_2$-Emissionen im Sektor Verkehr nach Verkehrsträgern im Jahr 2012 [34]

Die Zuordnungsstruktur gegenüber den Ergebnissen aus der IPCC-Analyse bleibt weitestgehend unverändert. Personenkraftwagen verursachen die größte $CO_2$-Menge, gefolgt von Nutzfahrzeugen und Flugverkehr. Aufgrund der Mitbilanzierung der Energieproduktion erfahren die Bereiche Schienennahverkehr/S-Bahn und Schienengüterverkehr (Strom) einen leichten Anstieg.

Abschließend können erneut die bilanzierten $CO_2$-Emissionen pro Einwohner in Ingolstadt in **Abbildung 29**[5] angegeben werden.

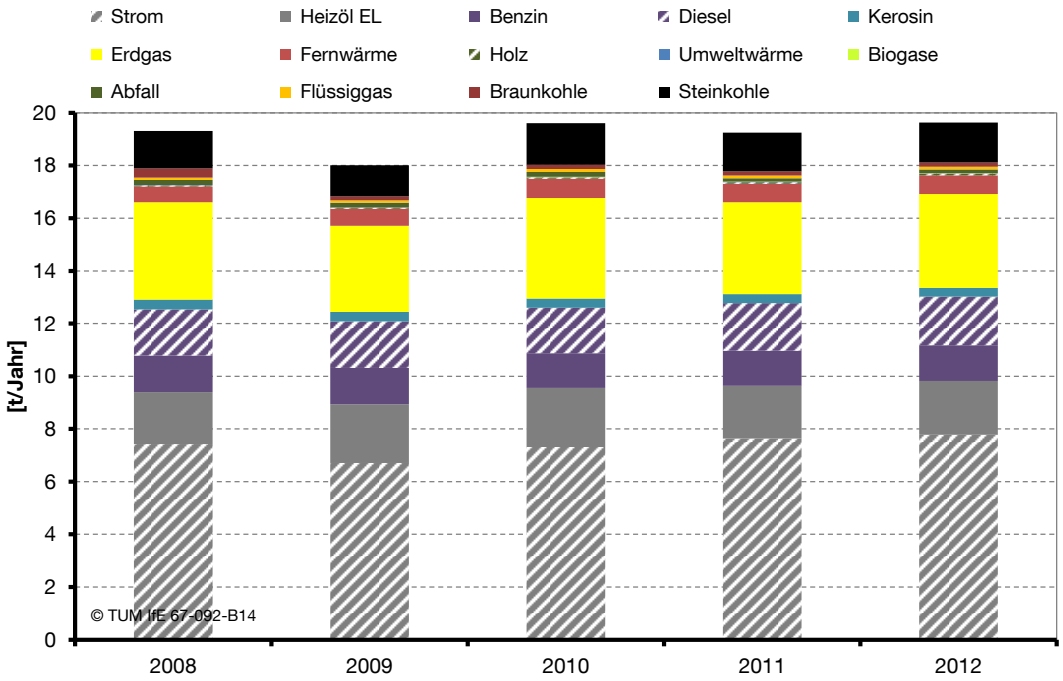



**Abbildung 29:** $CO_2$-Emissionen pro Einwohner nach Energieträgern [34]

Gegenüber den Pro-Kopf-Emissionen aus der Bilanzierung gemäß IPCC-Systematik ist für die Ergebnisse aus der LCA-Analyse ein Anstieg um 100 % festzustellen. Pro Kopf können nun etwa 20 t/a an $CO_2$-Emissionen ausgewiesen werden. Dies ist dem Anteil der Stromerzeugung (Mitbilanzierung der Vorketten) an den Gesamtemissionen geschuldet.

[5] Die Ergebnisse basieren auf bundesdeutschen Durchschnittswerten. Somit ergeben sich für Ingolstadt aufgrund der großen Bedeutung des produzierenden Gewerbes Anteile für Braun- und Steinkohle an den $CO_2$-Emissionen (Verwendung in der Industrie z. B. zur Erzeugung von Prozesswärme). Eine zukünftige Erhebung von Daten zu Energieverbrauch und Emissionen der lokalen Industrie in Ingolstadt ist empfehlenswert.

# 4 Bestimmung des Wärmebedarfs

Ausgangspunkt für die Ermittlung des Wärmebedarfs der Ingolstädter Gebäude, aufbauender Analysen sowie für die spätere Konzepterstellung ist eine Gebäudedatenbank bzw. ein Gebäudedatensatz aller Ingolstädter Gebäude.

Ein Gebäudedatensatz enthält im Allgemeinen wesentliche Kenngrößen zu Potentialen, Geometrie, Baualter, Nutzung und Heiztechnologie. **Abbildung 30** zeigt verschiedene Möglichkeiten auf, wie ein derartiger Datensatz genutzt werden könnte.

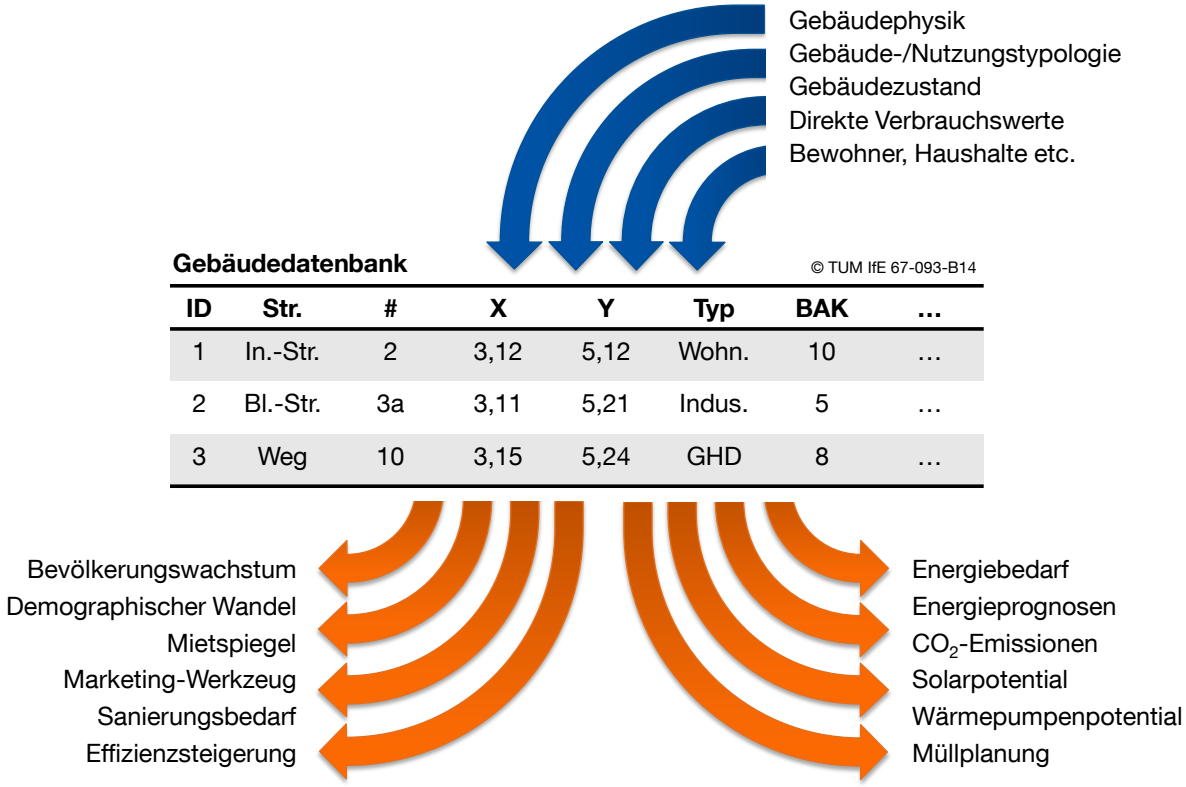



**Abbildung 30**: Möglichkeiten der Nutzung eines Gebäudedatensatzes

Die Inputdaten sind dabei entscheidend und beeinflussen die Qualität der daraus abgeleiteten Analysen und deren Ergebnisse wesentlich. So kann eine Gebäudedatenbank dazu eingesetzt werden, Aussagen über die Entwicklung des Energiebedarfs oder der $CO_2$-Emissionen einer Stadt zu treffen. Aber auch zur Untersuchung des demographischen Wandels einer Stadt oder zur Optimierung der Müllentsorgung kann eine Gebäudedatenbank als effektives Werkzeug eingesetzt werden.

Um den Wärmebedarf in Ingolstadt zu bestimmen, werden in einem ersten Schritt die zur Verfügung stehenden Daten in einer Datenbank zusammengefasst. Die Grundlage bilden

dabei Daten des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation (LVG) sowie der Stadt Ingolstadt. Diese Daten umfassen Lage, Geometrie, Nutzungsart sowie das Gebäudealter.

Das Alter steht blockscharf für jeden der 2.020 Baublöcke in Ingolstadt zur Verfügung. Die Darstellung des Gebäudealters muss somit auf Basis der Blöcke erfolgen. Die ebenfalls blockscharf bereitgestellten Daten zum Gasverbrauch werden nicht in die Gebäudedatenbank integriert, da eine Zuordnung der Verbräuche auf einzelne Gebäude/Polygone nicht möglich ist. Für die Bestimmung des Wärmebedarfs werden keine gemessenen Energieverbrauchswerte für Heizung und Warmwasser verwendet. Über den derzeitigen Sanierungsstand sind momentan keine Daten vorhanden.

**Abbildung 31** zeigt die Einteilung der Ingolstädter Gebäude nach Baualtersklassen. Diese Darstellung basiert auf den bereitgestellten baublockscharfen Altersinformationen.

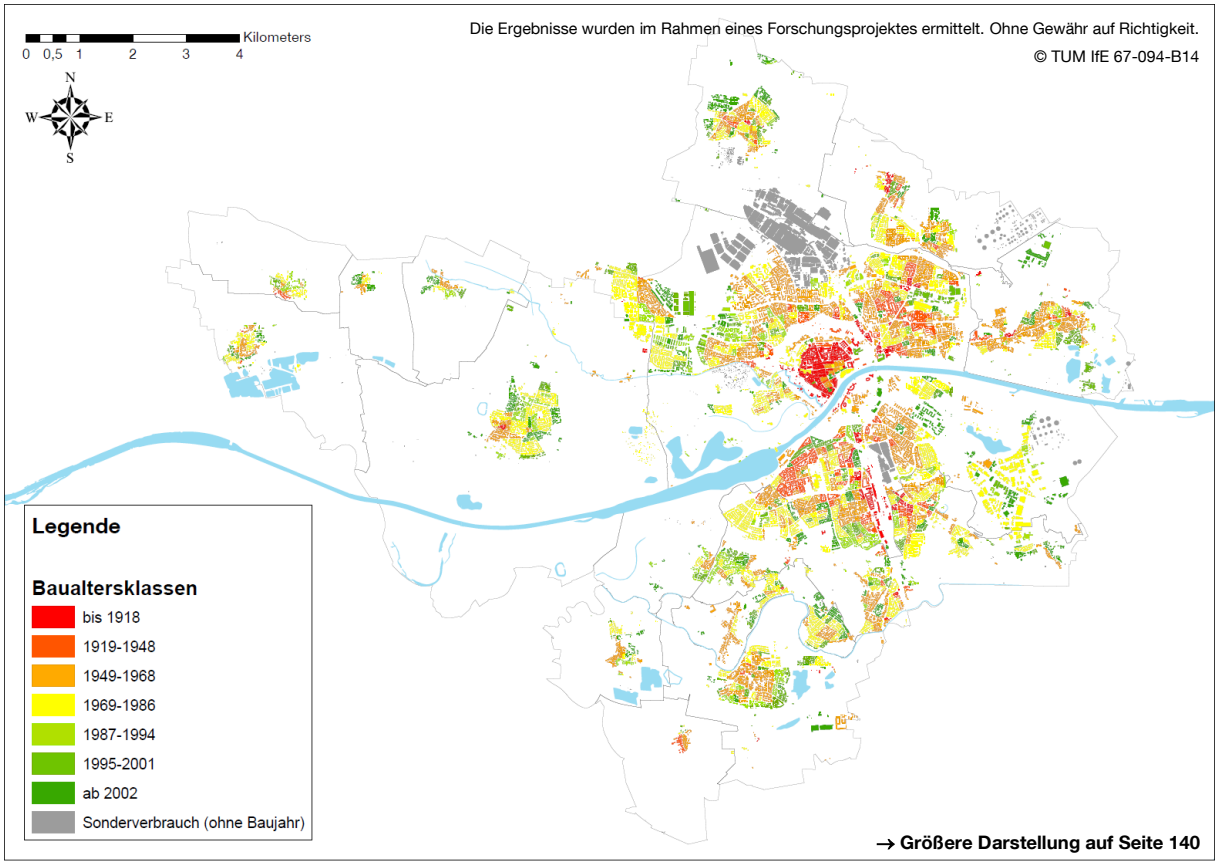



**Abbildung 31:** Klassifizierung der Ingolstädter Gebäude nach Baualtersklassen [35, 2]

Sämtliche einem Baublock zugehörigen Gebäude weisen dasselbe Baualter und somit dieselbe Baualtersklasse auf. Die Struktur der Blockeinteilung ist in obiger Grafik gut zu erkennen.

Auf Basis der bereitgestellten und in der Datenbank zusammengefassten Gebäudedaten kann im zweiten Schritt der Wärmebedarf berechnet werden. Dazu werden spezifische Be-

darfswerte in kWh/(m² a) für den Heizwärme- und Brauchwarmwasserbedarf herangezogen. Die verwendeten Werte orientieren sich an den veröffentlichten Bedarfswerten des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) [36] sowie Werten aus dem Leitfaden zur Erstellung eines Energienutzungsplans [32].

**Abbildung 32** gibt Aufschluss über die verwendeten spezifischen Bedarfswerte in Abhängigkeit von Baualter und Nutzungsart des Gebäudes (Baualtersklasse). Unterschieden wird hier zwischen Ist-Zustand und Zustand nach einer Vollsanierung des Gebäudes.

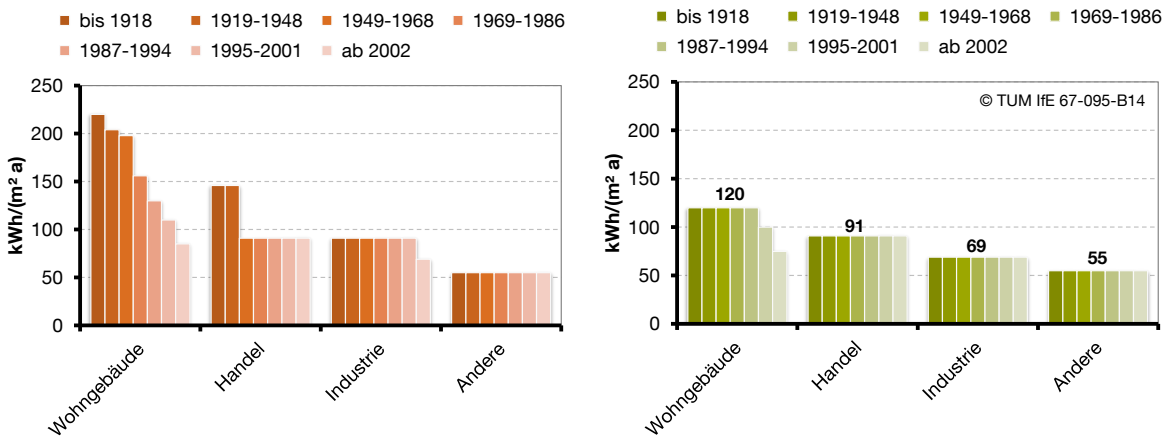



**Abbildung 32:** Spezifischer Wärmebedarf zur Berechnung des Wärmebedarfs vor und nach Sanierung

Die Bedarfswerte werden entsprechend dem Baualter des Gebäudes und der Nutzungsart für jedes Gebäude zugeordnet. Entsprechend den Baualtersklassen und den vorhandenen Nutzungsarten in Ingolstadt werden die Bedarfswerte an die gegebenen Verhältnisse angepasst. Objekte auf Wohnbauflächen sind der Kategorie Wohngebäude zugeordnet, während Gebäude auf Flächen gemischter Nutzung dem Sektor Handel zugeschrieben werden. Die Kategorie Industrie berücksichtigt alle Objekte auf Industrie- und Gewerbeflächen. Festzustellen ist ein erhöhter Wärmebedarf für Wohngebäude gegenüber anderen Nutzungsarten, der hin zu neueren Gebäuden deutlich abnimmt.

Die spezifischen Wärmebedarfe, die vollsanierten Gebäuden zugeschrieben werden können, sind rechterhand in Abbildung 32 dargestellt. Auch diese Werte sind angelehnt an die Prognosen bzw. Sanierungsszenarien des IWU und wurden auf die Verhältnisse in Ingolstadt angepasst. In der Literatur sind zum Teil noch geringere spezifische Bedarfswerte beschrieben. In der Regel können diese aber bei einer Vollsanierung insbesondere älterer Gebäude auf z. B. Niedrigenergiehausstandard nicht erreicht werden (nicht realistisch und unwirtschaftlich).

Die rechnerische Ermittlung des Wärmebedarfs für jedes Gebäude erfolgt durch Multiplikation des spezifischen Energiebedarfs unter Berücksichtigung von Gebäudealter und Nutzungsart mit der aus der Gebäudegeometrie berechneten Energienutzfläche. Analog erfolgt die Berechnung des Wärmebedarfs bei vollständiger Sanierung.

**Abbildung 33** visualisiert die Wärmebedarfsdichte der Ingolstädter Gebäude auf Basis der oben beschriebenen Ermittlungsmethodik bezogen auf Rasterzellen von 200 m x 200 m Größe. Der Wärmebedarf mehrerer Gebäude ist in einer Rasterzelle zusammengefasst. Eine gebäudescharfe Darstellung ist aufgrund der zugrundeliegenden Daten nicht sinnvoll und für die Ableitung von Konzepten im Rahmen des Energienutzungsplanes nicht notwendig.

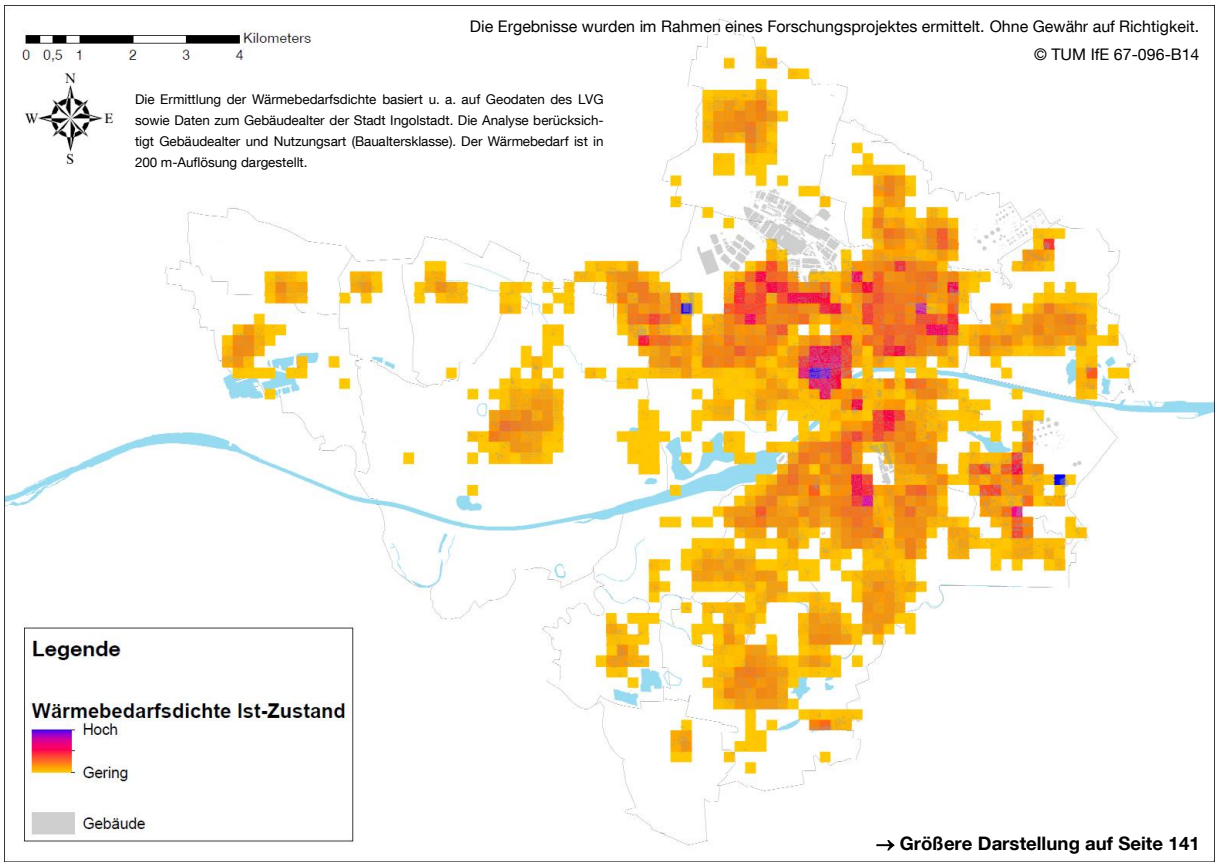



**Abbildung 33:** Ermittelte Wärmebedarfsdichte im Ist-Zustand in Ingolstadt [2]

Für die Gebäude des Güterverkehrszentrums Ingolstadt, der Audi AG, aller Raffinerie- und Kraftwerksstandorte sowie für das Gewerbegebiet Staudinger wird aufgrund der speziellen Nutzung kein Wärmebedarf ermittelt. Diese Gebäude fallen unter die Kategorie Sonderverbrauch.

Die unterschiedlichen Wärmbedarfsdichten kommen durch den spezifischen Wärmebedarf der Gebäude innerhalb der Rasterzellen, durch die Nutzungsart der Gebäude und durch die Bebauungsdichte zustande.

Im Vergleich mit den Informationen aus Abbildung 31 ist deutlich zu erkennen, dass in Gebieten mit höherem Baualter (z. B. in der Ingolstädter Innenstadt oder in den Ortskernen der umliegenden Ortschaften) auch ein höherer Wärmebedarf vorliegt. Baublöcke mit einem relativ geringen Durchschnittsalter (z. B. Neubaugebiete) sind dagegen mit einem niedrigeren jährlichen Wärmebedarf gekennzeichnet.

In Abschnitt 7.1 werden auf Basis der zugrundeliegenden Wärmebedarfskarte und des maximal erreichbaren Sanierungsstands Sanierungspotentiale aufgezeigt und diskutiert.

# 5 Potentialanalyse der erneuerbaren Energien

## 5.1 Wind

Das Windenergiepotential weist regional sehr große Unterschiede auf. Um eine Potentialabschätzung der Windkraftnutzung durchführen zu können, muss eine Vielzahl von Faktoren berücksichtigt werden. Neben den technischen Parametern einer Windkraftanlage (WKA) spielen die meteorologischen Aspekte eine entscheidende Rolle. Des Weiteren müssen die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Errichtung von Windenergieanlagen (Naturschutz, Einflugschneisen, Mindestabstände zu Gebäuden etc.) eingehalten werden.

Der Windgeschwindigkeit kommt eine große Bedeutung bei der Abschätzung des Windenergiepotentials zu. Im Allgemeinen sind die mittleren Windgeschwindigkeiten in Regionen mit geringer Luftreibung (z. B. Meere) relativ hoch, nehmen aber landeinwärts aufgrund der steigenden Oberflächenrauigkeit ab. Die zur Verfügung stehende Leistung erfährt dabei eine Zunahme mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. So kann bei einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s eine um den Faktor 1.000 größere Leistung erzielt werden verglichen mit Wind der Geschwindigkeit 1 m/s. Daneben spielen weitere Aspekte wie die Art und Form der Verteilung der relativen Häufigkeit und der Summenhäufigkeit der Windgeschwindigkeit eine Rolle. Zu berücksichtigen sind außerdem die Windgeschwindigkeit mit der größten Häufigkeit sowie der Anteil an windstillen Zeiten. Aus technischer Sicht sind Windkraftanlagen nur bis zu einer bestimmten Maximalgeschwindigkeit in der Lage, Energie zu generieren [37].

Der Bayerische Windatlas sowie die Gebietskulisse Windkraft geben Informationen zu mittleren Windgeschwindigkeiten in Bayern an und weisen Flächen aus, in denen eine Nutzung der Windkraft voraussichtlich möglich erscheint. In der Gebietskulisse Windkraft werden Flächen berücksichtigt, die eine Windgeschwindigkeit größer als 4,5 m/s in 140 m Höhe aufweisen. Die Flächen wurden einer immissions- und naturschutzfachlichen Vorprüfung unterzogen. Für Ingolstadt ergeben sich im Westen und Norden des Stadtgebietes mittlere Windgeschwindigkeiten in 140 m von bis zu 5,5 bzw. 6 m/s.

Der Energie-Atlas Bayern liefert unter der Berücksichtigung der Gebietskulisse Windkraft unten folgenden Kartenausschnitt (**Abbildung 34**).

Die weiß dargestellten Flächen werden aufgrund von Windgeschwindigkeiten unter 4,5 m/s nicht berücksichtigt und finden daher in die Gebietskulisse keinen Eingang. Voraussichtlich

nicht mögliche Flächen - Ausschlussflächen – aufgrund des Immissions- und Naturschutzes sind hellrot dargestellt. Gelbe Flächen stehen für im Einzelfall für Windkraftanlagen mögliche Flächen. Bei grünen Flächen handelt es sich um Flächen mit ausreichender Windhöffigkeit. Da hier Windgeschwindigkeiten über 4,5 m/s erreicht werden, sind diese Flächen voraussichtlich für die Nutzung von Windkraft geeignet.

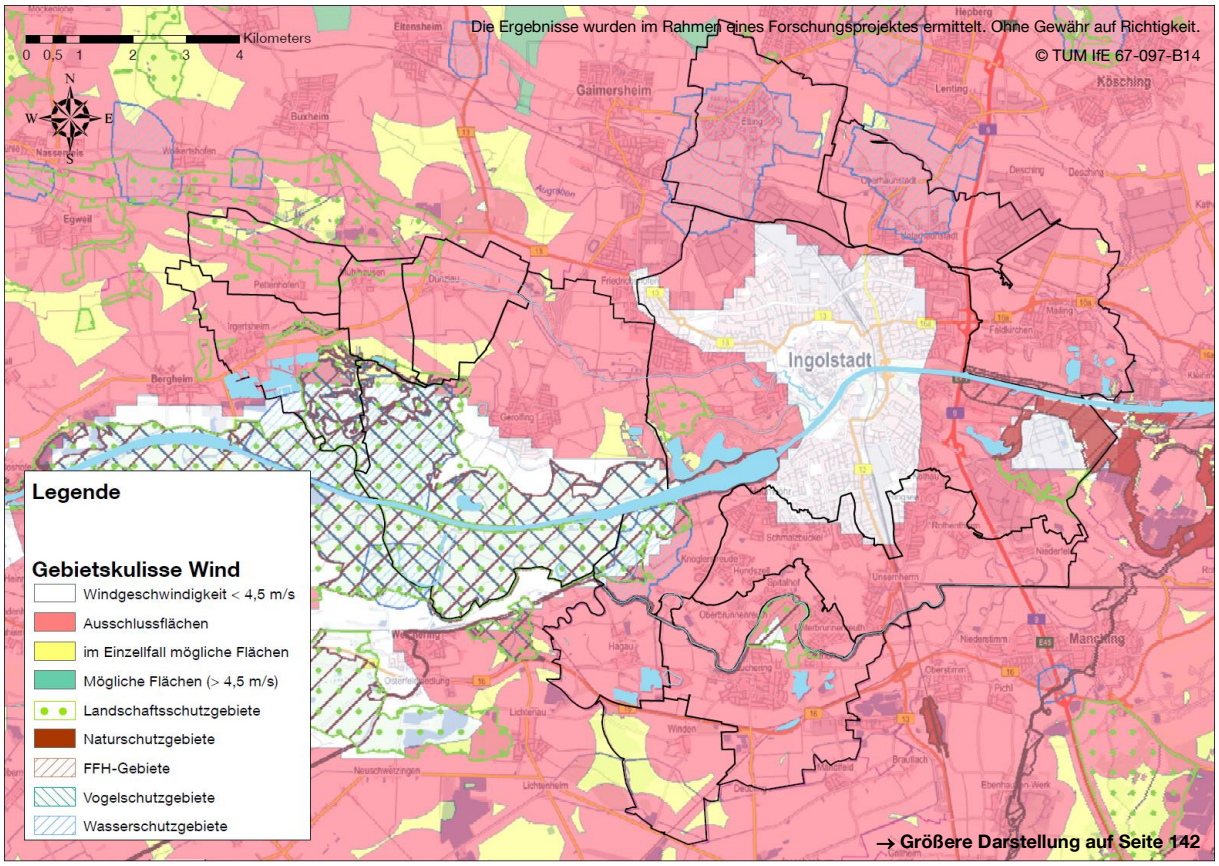



**Abbildung 34**: Gebietskulisse Windkraft für Ingolstadt [8, 2]

Neben Informationen zu geeigneten Flächen gibt die Grafik zusätzlich Auskunft über die Lage von Landschafts-, Natur-, Vogel- und Wasserschutzgebieten sowie von Fauna-Flora-Habitat-Gebieten (FFH-Gebiete) im Stadtgebiet von Ingolstadt und Umgebung.

Eine erste Abschätzung des Windkraftpotentials mithilfe der Gebietskulisse Windkraft zeigt, dass auf dem Stadtgebiet Ingolstadt nur sehr wenige Flächen für die Windkraftnutzung zur Verfügung stehen. Diese müssten allerdings einer weiteren Untersuchung unterzogen werden, da sie nur im Einzelfall im Betracht kommen und sensibel behandelt werden müssen (gelbe Flächen).

Für die Ermittlung der räumlichen Verteilung der Volllaststunden bzw. des Windenergieertrages bei beliebigen Anlagenkennlinien werden die Rasterdaten der mittleren jährlichen

Weibull-Parameter in 80 m über Grund des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Diese Rasterdaten wurden mit dem Statistischen Windfeldmodell des DWD berechnet.

Als Beispielanlage dient die Windkraftanlage ENERCON E-82 mit einer Nabenhöhe von 138 m. Sie besitzt eine Nennleistung von 2.300 kW, die Abschaltgeschwindigkeit liegt bei 28 bis 34 m/s. Der Rotordurchmesser beträgt 82 m.

**Abbildung 35** zeigt die Verteilung der Volllaststunden innerhalb der Planungsregion 10 (Kreisfreie Stadt Ingolstadt, Landkreise Eichstätt, Neuburg-Schrobenhausen und Pfaffenhofen an der Ilm) bei Verwendung der oben genannten Anlage.

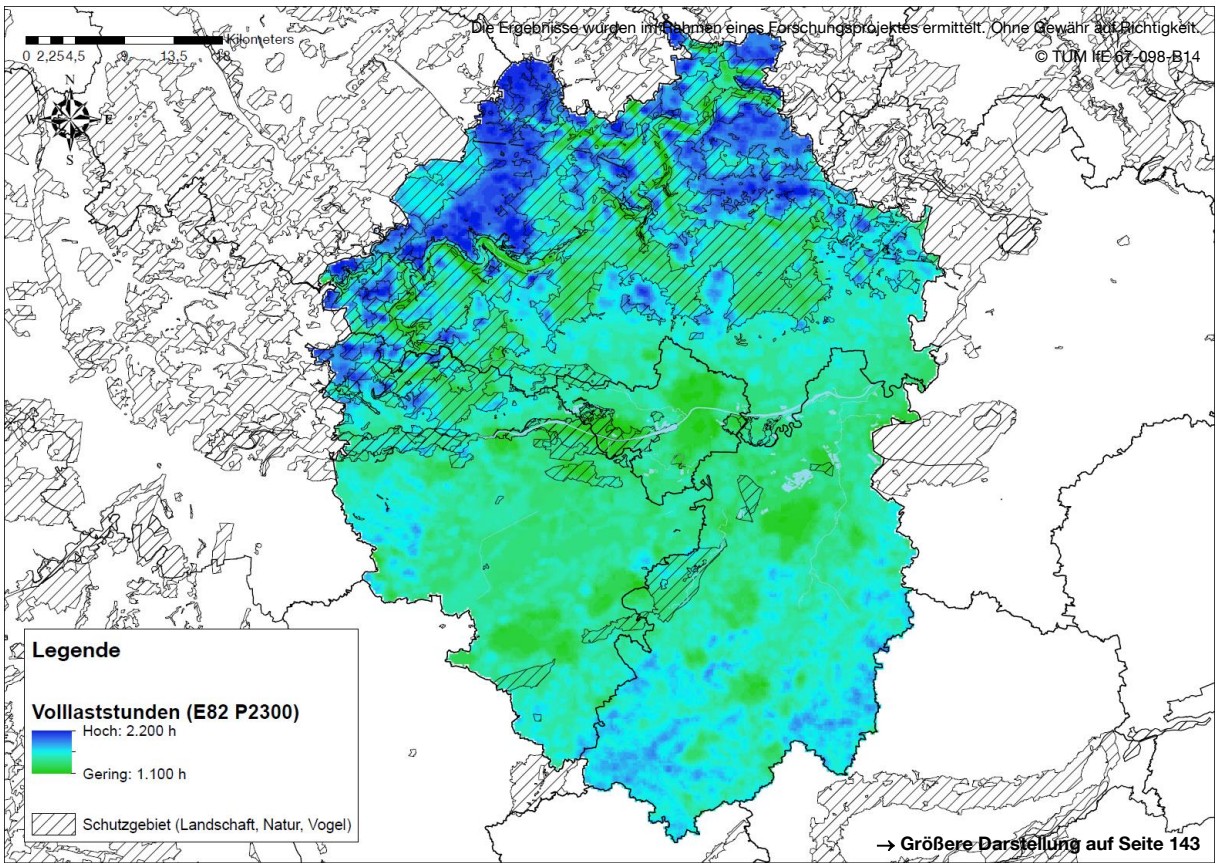



**Abbildung 35**: Volllaststunden bei Enercon-Anlage E-82 [38, 2]

Eine Konzentration der Flächen mit hoher Volllaststundenzahl ist im Norden der Planungsregion 10 festzustellen. Hier können Volllaststunden von über 2.200 erreicht werden. Im südlichen Teil der Planungsregion sowie in Ingolstadt ist mit deutlich weniger Volllaststunden zu rechnen. Hier werden Werte im mittleren Bereich errechnet bis hin zur minimalen Volllaststundenzahl von etwa 1.100. Es ist zu berücksichtigen, dass eine Windkraftanlage mit einer größeren Nabenhöhe aufgrund der dort herrschenden mittleren Windgeschwindigkeiten auch eine höhere Volllaststundenzahl erreichen kann.

Einen höher aufgelösten Blick in das Stadtgebiet von Ingolstadt hinsichtlich der erzielbaren Volllaststunden liefert **Abbildung 36**.

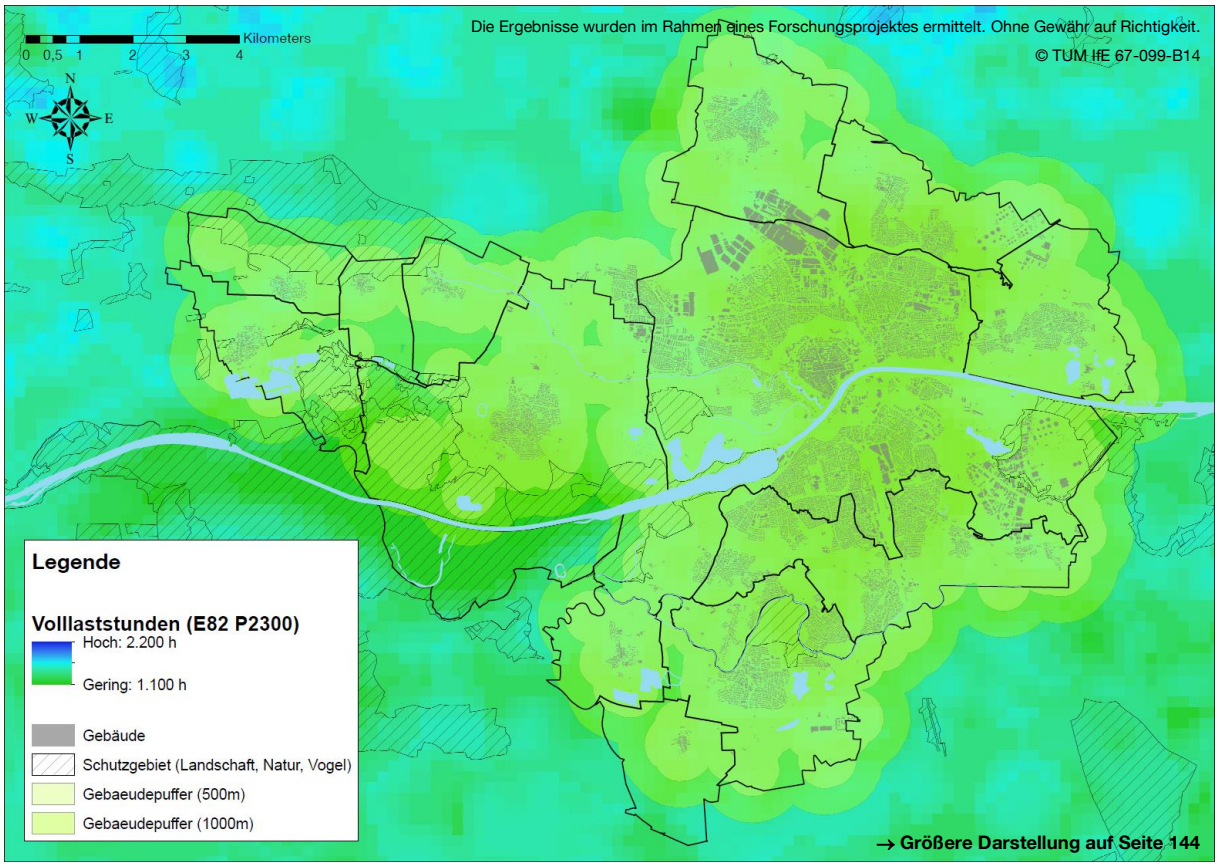



**Abbildung 36**: Volllaststunden bei Enercon-Anlage E-82 [38, 2]

Die verfügbaren Flächen werden unter Anwendung verschiedener Abstände der Anlagen zu Gebäuden (500 m und 1.000 m) bewertet. Darüber hinaus liefert die Grafik Informationen zur Lage von Schutzgebieten. Bei einem Gebäudeabstand von 1.000 m sind nahezu keine geeigneten Flächen mehr in Ingolstadt verfügbar.

Da das Stadtgebiet von Ingolstadt in einem Becken liegt (Ingolstädter Becken), werden die höchsten Volllaststundenzahlen in kleinen Flächen im Norden, Westen und Süden erreicht (etwa 1.500 h).

Der Windenergieertrag errechnet sich aus den Volllaststunden sowie der Leistung einer Windkraftanlage und ist für die genannte Beispielanlage in **Abbildung 37** dargestellt.

Analog zu Abbildung 36 ergeben sich die höchsten Windenergieerträge wiederum in den nördlichen, westlichen und südlichen Teilen des Stadtgebietes. Die erzielbaren Energieerträge liegen dort etwa im Bereich um 3,5 GWh pro Jahr und Anlage.

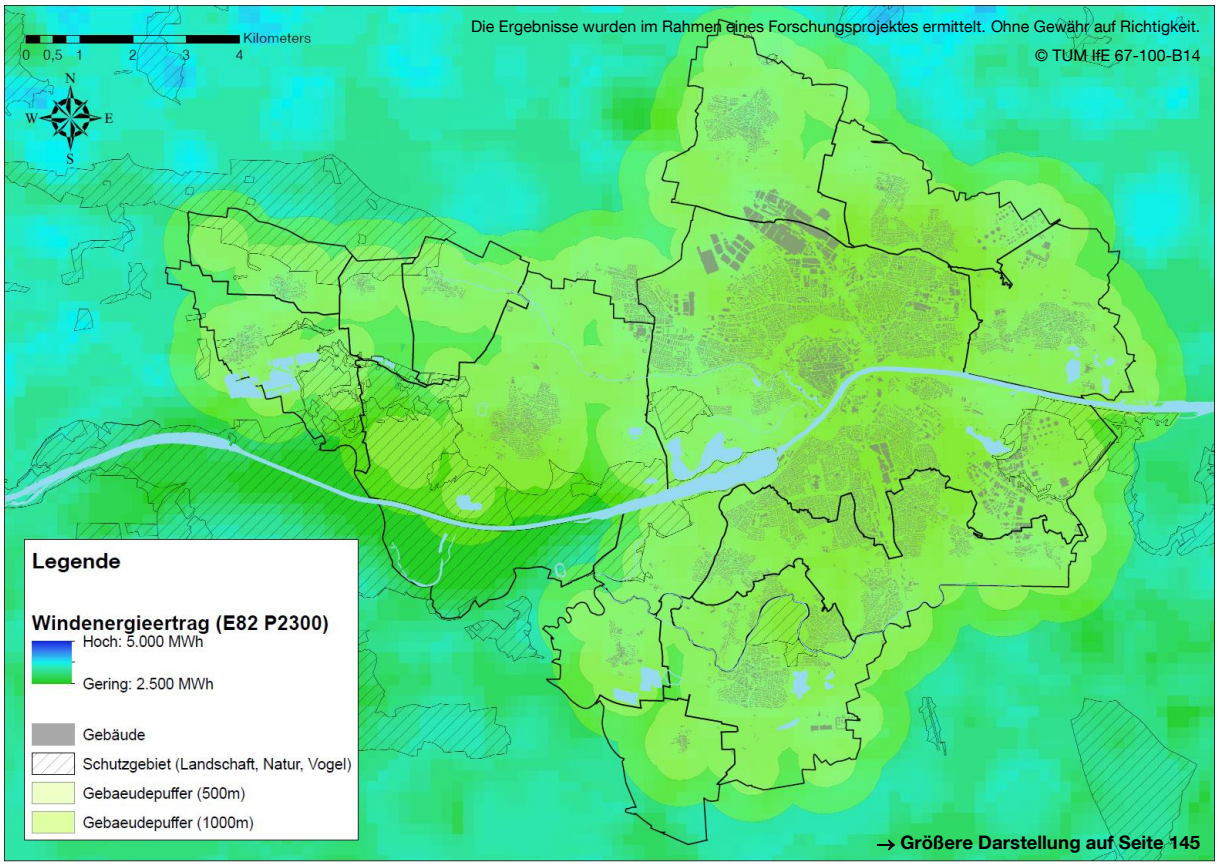



**Abbildung 37**: Windenergieertrag bei Enercon-Anlage E-82 [38, 2]

Das Stadtgebiet von Ingolstadt eignet sich unter Berücksichtigung der gegenwärtigen politischen und wirtschaftlichen Situation nicht zur Nutzung von Großwindkraftanlagen. Zudem muss eine Bewertung aus militärisch flugbetrieblicher Sicht der Bundeswehr durchgeführt werden. Der rund um Neuburg und Ingolstadt (Manching) stattfindende Flugverkehr hat eine Bauhöhenbeschränkung aufgrund von Mindestradarführungshöhen zur Folge und schränkt die Möglichkeiten der Windkraftnutzung in der Region weiter ein.

Der Betrieb von Kleinwindkraftanlagen könnte in Ingolstadt womöglich von Interesse sein. Je nach Leistungsklasse werden Kleinwindkraftanlagen bis zu 5, 30 oder 100 kW angeboten. Die Nabenhöhen liegen im Bereich von 10 bis 30 m. Durch diese geringen Nabenhöhen im Vergleich zu Großwindkraftanlagen dürften die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Errichtung von Kleinwindkraftanlagen weniger streng ausfallen was z. B. den Aspekt Mindestabstand zu (Wohn-)Gebäuden anbelangt. Installationen von Kleinwindkraftanlagen sind wie bei großen Anlagen möglich auf Freiflächen, aber auch auf Autobahnbrücken, Masten oder Gebäuden [39].

In Südbayern treten in 10 m Höhe Windgeschwindigkeiten im Bereich von 2 bis 3 m/s auf. Entlang von Flüssen in Tälern können die Werte allerdings etwas geringer ausfallen. Das

Stadtgebiet von Ingolstadt zeigt in 10 m Höhe mittlere Windgeschwindigkeiten von rund 2,5 bis 3,5 m/s [8].

Der Betrieb von Kleinwindkraftanlagen ist eine attraktive Option zur Nutzung von regenerativen Energien, die sich bei entsprechenden Vergütungen als wirtschaftlich erweisen kann. Für weitergehende Untersuchungen bedarf es genauerer Messwerte.

Die Stadtwerke Ingolstadt kamen in ihren Untersuchungen bezüglich des Potentials für Windkraft in Ingolstadt (Messung von Windgeschwindigkeiten) ebenfalls zu dem Ergebnis, dass aufgrund der ungünstigen Windverhältnisse der Einsatz von Windkraft zur elektrischen Energieerzeugung in Ingolstadt nicht sinnvoll erscheint.

## 5.2 Biomasse

Unter Biomasse werden Stoffe organischen Ursprungs verstanden. Dazu zählen die in der Natur lebenden Tiere und Pflanzen, die erzeugten Rückstände wie tierische Exkremente, abgestorbene Masse wie Stroh sowie im Allgemeinen alle Stoffe, die durch Umwandlungsprozesse oder stoffliche Nutzung entstanden sind. In diesen Bereich fallen beispielsweise Schlachtabfälle, Pflanzenöl, Alkohol, Papier etc. [40]. Biomasse steht zur stofflichen und energetischen Nutzung, also zur Bereitstellung von Strom, Wärme oder biogenen Kraftstoffen, zur Verfügung.

Grundsätzlich wird zwischen primärer Biomasse und sekundärer Biomasse unterschieden. In die Kategorie Primärprodukte (direkt energetisch nutzbare Biomasse aus Energiepflanzen) fallen beispielsweise Raps, Getreide, Miscanthus oder Holz. Die sekundäre Biomasse bezieht sich auf Abfall-Biomasse wie Altpapier, Altholz oder biogene Reststoffe.

Insgesamt gesehen ist der Anteil der Biomassenutzung in Bayern höher als in den restlichen Bundesländern (hoher Waldanteil). Dabei dominieren forstliche Produkte wie z. B. Holz. Aktuell trägt die Biomasse zu etwa 6 % zur Deckung des Gesamtenergieverbrauchs in Bayern bei [41].

### Landwirtschaft

Im Bereich der Landwirtschaft kann Biomasse sowohl bei der Nutztierhaltung als auch bei der Bewirtschaftung von Ackerflächen anfallen.

Im Jahr 2010 setzte sich der Nutztierbestand auf dem Stadtgebiet von Ingolstadt gemäß **Tabelle 6** zusammen. So wurden insgesamt 2.978 Rinder und Milchkühe, 798 Schweine, 439 Schafe, 302 Einhufer sowie 6.343 Hühner gehalten.

**Tabelle 6**: Viehbestand 2010 in Ingolstadt [3]

| *Tierart* | *Bestand am 01.03.2010* |
|---|---|
| Rinder und Milchkühe | 2.288 (davon 690 Milchkühle) |
| Schweine | 798 |
| Schafe | 439 |
| Einhufer (Pferde, Esel, Maultiere) | 302 |
| Hühner | 6.343 |

Um die Gas- und Energieausbeute des bei der Nutztierhaltung anfallenden Festmistes und der anfallenden Gülle zu beurteilen, bedarf es Richtwerte für verschiedene Substrate. Diese sind in **Tabelle 7** zusammengefasst.

**Tabelle 7**: Gasausbeute verschiedener tierischer Substrate [42]

| *Tierart* | *Gülle [$m^3$/a]* | *Festmist [t/a]* | *Methan [$Nm^3$/a]* | *Energie [$kWh_{el}$/a]* |
|---|---|---|---|---|
| Mastrind | - | 3,5 | 185 | 701 |
| Milchkuh | 20 | - | 340 | 1.288 |
| Mastschwein | 0,2 | - | 2,4 | 9 |
| Reitpferd | - | 12 | 420 | 1.591 |
| Legehenne | 0,007 $m^3$ Rottemist/a | | 0,57 | 2,16 |

Für Mastrinder kann eine Festmistmenge von 3,5 t/a angegeben werden, was zu einer Methanmenge von 185 $Nm^3$/a bzw. einer elektrischen Energieausbeute von 701 $kWh_{el}$/a führt (BHKW-Wirkungsgrad von 38 $\%_{el}$). Für Milchkühle ergibt sich bei einer Güllemenge von 20 $m^3$/a eine elektrische Energie von 1.288 $kWh_{el}$/a. Mastscheine und Pferde tragen mit je-

weils 9 und 1.591 $kWh_{el}/a$ zur elektrischen Energieerzeugung bei. Eine Legehenne entspricht 2,16 $kWh_{el}/a$.

Unter Berücksichtigung des Tierbestandes ergeben sich zusammenfassend für das tierische Biomassepotential die in **Tabelle 8** aufgeführten Werte.

**Tabelle 8**: Tierisches Biomassepotential in Ingolstadt

| *Tierart* | *Biogas [$Nm^3/a$]* | *Methan [$Nm^3/a$]* | *Energie [$MWh_{el}/a$]* |
|---|---|---|---|
| Mastrind | 473.008 | 295.630 | 1.120 |
| Milchkuh | 376.960 | 234.600 | 889 |
| Mastschwein | 3.064 | 1.915 | 7 |
| Reitpferd | 202.944 | 126.840 | 480 |
| Legehenne | 5.786 | 3.616 | 14 |
| Gesamt | 1.061.762 | 662.600 | 2.510 |

Den größten Anteil an der Biogas- bzw. Methanproduktion und somit an der elektrischen Energiemenge haben die Mastrinder mit etwa 45 %. Insgesamt ergibt sich ein tierisches Biomassepotential in Ingolstadt für Methan von etwa 662.600 $Nm^3/a$ (ca. 6,6 GWh/a). Das entspricht einer elektrischen Energiemenge von rund 2.500 $MWh_{el}/a$. Bei Annahme eines durchschnittlichen Jahresstrombedarfs für einen Haushalt von 3.500 kWh, könnten gut 700 Haushalte mit elektrischer Energie versorgt werden.

Neben der anfallenden Biomasse in der Nutztierhaltung können darüber hinaus auf landwirtschaftlichen Flächen Energiepflanzen angebaut werden. Welche Flächen in Ingolstadt dabei welcher Nutzungsart unterliegen, kann **Tabelle 9** entnommen werden.

**Tabelle 9:** Bodennutzung in Ingolstadt [3]

| *Nutzungsart* | *Fläche [ha]* |
|---|---|
| Grünland (Wiesen und Weiden) | 779 |
| Getreide | 3.742 |
| Silomais inkl. Grünmais | 222 |

Insgesamt werden derzeit auf 4.743 ha Fläche bereits Feldfrüchte angebaut, die sich für die Gewinnung von Biogas weiterverarbeiten lassen. Es wird angenommen, dass diese Fläche zum Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung steht. Ein potentieller Nutzungskonflikt zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion wird an dieser Stelle vernachlässigt. Zudem stehen neben oben angegeben Flächen weitere Anbaugebiete für Hülsenfrüchte oder Futterpflanzen zur Verfügung.

Richtwerte für die Gasausbeute verschiedener pflanzlicher Substrate werden in **Tabelle 10** aufgeführt.

**Tabelle 10**: Gasausbeute verschiedener pflanzlicher Substrate [42]

| *Pflanzenart* | *Festmasse [t/ha]* | *Methan [$Nm^3$/ha]* | *Energie [$kWh_{el}$/ha]* |
|---|---|---|---|
| Grünland | 33 | 2.904 | 11.011 |
| Getreide-GPS | 40 | 3.846 | 14.568 |
| Silomais | 50 | 4.945 | 18.731 |

Durchschnittlich können pro ha knapp 15 MWh elektrische Energie erzeugt werden. Bei Nutzung von Silomais beläuft sich diese Menge auf etwa 18,8 $MWh_{el}$/ha. Grünland trägt mit 11 $MWh_{el}$/ha zur Energieerzeugung bei.

Sofern die oben ausgewiesenen Flächen zum Anbau von nachwachsenden Energiepflanzen genutzt werden, kann das Biomassepotential auf landwirtschaftlich genutzten Flächen gemäß **Tabelle 11** angegeben werden.

**Tabelle 11**: Biomassepotential auf landwirtschaftlich genutzten Flächen

| *Pflanzenart* | *Biogas [$Nm^3$/a]* | *Methan [$Nm^3$/a]* | *Energie [$MWh_{el}$/a]* |
|---|---|---|---|
| Grünland | 3.619.546 | 2.262.216 | 8.576 |
| Getreide-GPS | 23.026.771 | 14.391.732 | 54.513 |
| Silomais | 1.756.464 | 1.097.790 | 4.158 |
| Gesamt | 28.402.781 | 17.751.738 | 67.247 |

In Ingolstadt würde eine energetische Nutzung von Getreide-GPS zu einem Anteil an der Biogas- bzw. Methanproduktion und somit an der elektrischen Energiemenge von 80 % führen. Insgesamt kann ein theoretisches maximales Biomassepotential in Ingolstadt für Methan von etwa 18 Mio. $Nm^3/a$ (ca. 176 GWh/a) ermittelt werden, was einer elektrischen Energiemenge von rund 67 $GWh_{el}/a$ gleichkommt. Wird erneut ein durchschnittlicher Jahresstrombedarf für einen Haushalt von 3.500 kWh angenommen, könnten ca. 19.000 Haushalte mit elektrischer Energie versorgt werden.

Weitere Pflanzen, die auf dem Stadtgebiet angebaut werden, können z. B. zur Erzeugung von Bioethanol oder Biodiesel herangezogen werden.

Zur Biodieselgewinnung eignen sich Weizen, Roggen und Kartoffeln. In Ingolstadt werden etwa 2.300 ha der landwirtschaftlich genutzten Fläche verwendet, um Weizen anzubauen, Roggen wächst auf 80 ha, während für Kartoffeln eine Anbaufläche von 517 ha angegeben wird [3]. Unter Berücksichtigung der entsprechenden Energieerträge bei einem mittleren Ertragsniveau (Weizen: 16.700 kWh/ha, Roggen: 11.400 kWh/ha, Kartoffeln: 23.600 kWh/ha) [43], ergibt sich ein theoretisches Potential von etwa 50 GWh/a oder 8,7 Mio. l Bioethanol.

Winterraps wird in Ingolstadt auf 755 ha angebaut. Raps kann zur Erzeugung von Biodiesel verwendet werden. Damit können 1.151 l/ha oder 10.800 kWh/ha gewonnen werden [43]. Insgesamt ergibt sich damit ein theoretisches jährliches Potential von 870.000 l Biodiesel oder 8 GWh an Energie.

**Forstwirtschaft**

Auf dem Stadtgebiet von Ingolstadt steht eine Waldfläche von 1.797 ha zur Verfügung. Zusammen mit den Ingolstädter Kommunalbetrieben bewirtschaftet die Stadt Ingolstadt im Stadtgebiet insgesamt 725,6 ha Wald, 627,3 ha davon forstwirtschaftlich. Dabei beträgt der durchschnittliche jährliche Zuwachs pro ha Waldfläche etwa 4,8 Erntefestmeter ohne Rinde (Efm. o. R.); der durchschnittliche jährliche Holzeinschlag in Ingolstadt liegt bei 2,0 Efm o. R./ha [44].

Der Heizwert über alle Baumarten kann im Mittel mit 2.300 kWh/Efm angegeben werden [45]. Insgesamt ergibt sich damit eine jährliche Energiemenge aus nachhaltig erzeugter Biomasse von etwa 7 GWh.

Eine gesonderte Betrachtung von schnellwachsenden kurzumtriebsfähigen Baumarten wie Pappel oder Weide wird in Abschnitt 7.6 vorgenommen.

**Biogene Abfallstoffe**

In Ingolstadt fallen jährlich rund 18.000 t Bioabfall sowie etwa 16.000 t Grünschnitt (Laub, Gras, Baum- und Strauchschnitt) an [7, 46].

Der Heizwert für Grüngut kann im Mittel mit 0,3 kWh/kg angegeben werden [47]. Aus einem Kilogramm Bioabfall kann etwa 1,4 kWh Energie erzeugt werden [48]. Insgesamt beläuft sich somit das theoretische Potential der biogenen Abfallstoffe in Ingolstadt auf gut 25 GWh/a.

Ein Teil des anfallenden Bioabfalls sowie des Grünschnittes wird in Ingolstadt bereits schon energetisch verwertet.

Zusammenfassend kann für den Bereich Biomasse ein theoretisches Gesamtpotential von ca. 200 GWh/a errechnet werden. Dies ist gegenüber der Energienachfrage der Stadt vergleichsweise gering.

## 5.3 Wasser

Die Wasserkraft in Bayern besitzt eine lange Tradition und weist im Allgemeinen bereits einen sehr hohen Ausbaugrad auf. Das Potential der großen Flüsse Bayerns ist weitestgehend ausgeschöpft. Etwa 60 % des regenerativen Stromes in Bayern werden derzeit durch die Wasserkraft erzeugt. Im Jahr 2010 wurden etwa 15 % des bayerischen Strombedarfs durch die aus Wasserkraft gewonnene Energie gedeckt (Bundesdurchschnitt 3 %) [49].

Ingolstadt wird von der Donau durchflossen. Sie trennt das Stadtgebiet etwa in der Mitte. Weitere Flüsse sind die Schutter – ein Nebenfluss der Donau – sowie der Mailinger Bach, ein linker Zufluss der Donau.

Ein wichtiger Parameter bei der Auslegung von Wasserkraftanlagen ist der Abfluss und dessen Extremwerte, welche hauptsächlich bezüglich Hochwasser von Interesse sind (Schäden an Wasserkraftwerken). Die täglichen Abflusswerte der Donau am Messpunkt Ingolstadt Luitpoldstraße über das gesamte Jahr 2012 werden in **Abbildung 38** dargestellt.

Der mittlere Abfluss (MQ) der Donau in Ingolstadt beträgt etwa 285 $m^3/s$. Der niedrigste Abfluss (NQ) des Jahres 2012 belief sich auf etwa 62 $m^3/s$. Das arithmetische Mittel aus den niedrigsten Abflüssen – der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) – ergibt einen Wert von 130 $m^3/s$. Der Hochwasserabfluss und der mittlere Hochwasserabfluss belaufen sich auf jeweils 2.270 $m^3/s$ und 920 $m^3/s$. Unterdurchschnittliche Abflussmengen treten in Ingolstadt vor allem im den Monaten Juli bis Dezember auf, wohingegen in den restlichen Monaten des Jahres die Abflussmenge über dem mittleren Abfluss liegt.

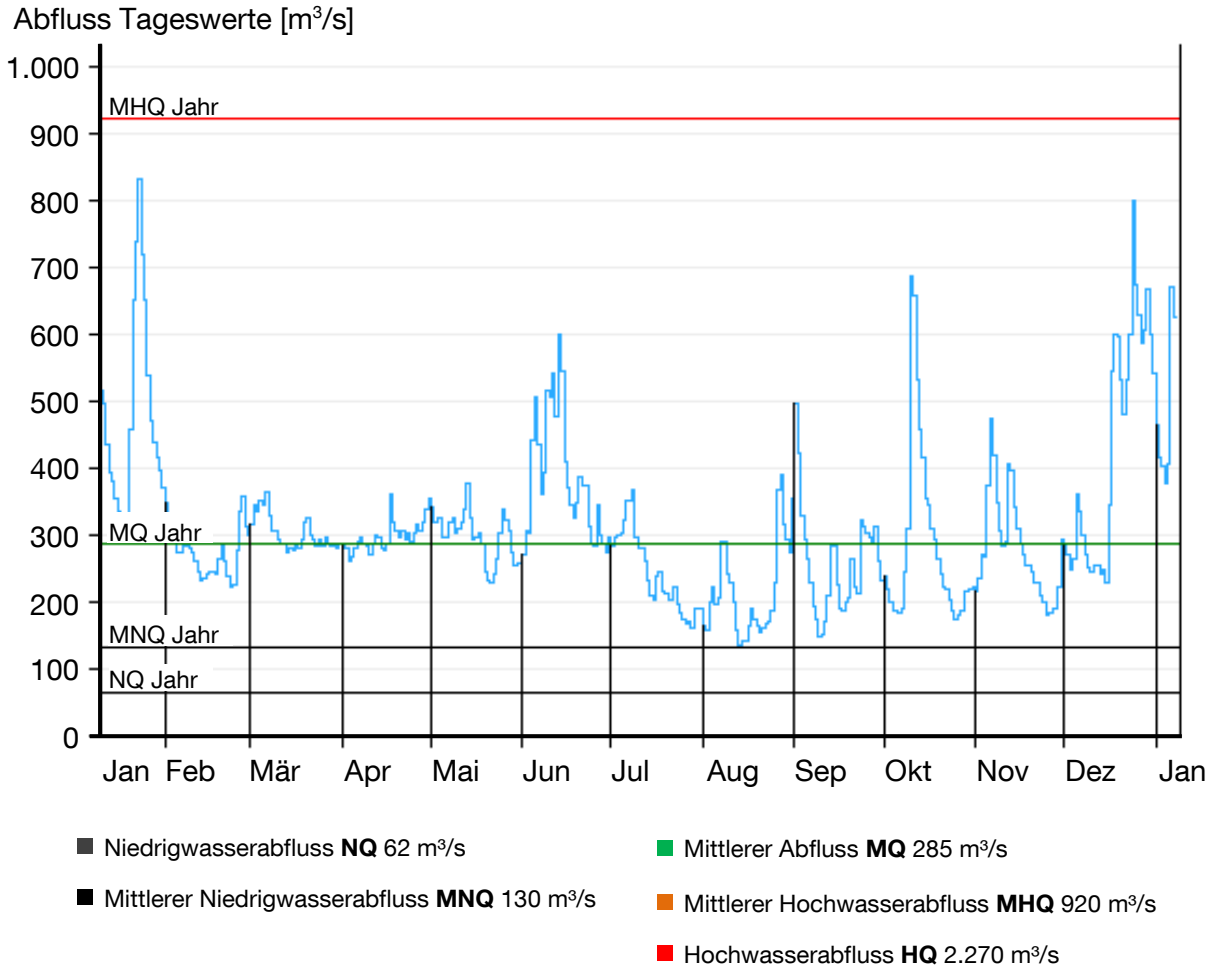



**Abbildung 38**: Abflusswerte der Donau am Messpunkt Luitpoldstraße [50]

Entlang der Donau in Ingolstadt und Umgebung existieren mehrere Laufwasserkraftwerke. Dazu zählen das 1971 in Betrieb genommene Laufwasserkraftwerk Ingolstadt (Ausbauleistung: 19,8 MW), das Laufwasserkraftwerk Bergheim (Inbetriebnahme: 1970, Ausbauleistung: 23,7 MW) im Landkreis Neuburg-Schrobenhausen sowie das Laufwasserkraftwerk Vohburg (Inbetriebnahme: 1992, Ausbauleistung: 23,3 MW) im Landkreis Pfaffenhofen an der Ilm [5]. Alle drei Kraftwerke werden von der E.ON Wasserkraft GmbH betrieben.

Das gesamte Potential der Donau in Ingolstadt ist durch das Laufwasserkraftwerk an der Donaustaustufe Ingolstadt bestimmt. Das Kraftwerk verfügt über drei Kaplan-Turbinen (je 6,6 MW) und produziert mit einer elektrischen Netto-Nennleistung von 19,8 MW eine Strommenge von etwa 130.000 MWh/a. Wird ein durchschnittlicher Stromverbrauch von 3.500 kWh/a für einen Haushalt angenommen, könnten theoretisch mehr als 30.000 Ingolstädter Haushalte mit regenerativem Strom aus Wasserkraft versorgt werden (vgl. Abbildung 6). Der vom Kraftwerk erzeugte Strom wird allerdings in vollem Umfang in das Bahnstromnetz des Betreibers DB Energie GmbH eingespeist. Die Netzebene des Anschlusses liegt

bei 20 kV. Auch die beiden Laufwasserkraftwerke Bergheim und Vohburg in den angrenzenden Landkreisen werden zur Bahnstromerzeugung herangezogen [5, 6].

Neben dem Laufwasserkraftwerk Ingolstadt existieren noch weitere kleinere Wasserkraftanlagen entlang der Schutter und des Mailinger Bachs. Die Kraftwerke Brodmühle, Schaumühle und Ochsenmühle werden entlang der Schutter im Westen des Stadtgebietes betrieben, am Mailinger Bach im Osten existiert ein kleineres Laufwasserkraftwerk an der Moosmühle. Zusammengefasst generieren diese Kleinwasserkraftanlagen etwa 10 MWh/a [6].

Im Vergleich zur Donau sind die Abflussmengen von Schutter und Mailinger Bach vernachlässigbar gering. Der Abfluss des Mailinger Bachs am Pegel Unterhaunstadt liegt beispielsweise bei nur etwa 0,14 $m^3/s$ [50]. Dies hat Einfluss auf das Energieerzeugungspotential der beiden Flüsse. Im Vergleich mit dem Potential der Donau dürfte dies vernachlässigbar sein.

Die Bayerische Staatsregierung will den Anteil der aus Wasserkraft gewonnenen elektrischen Energie an der Deckung des Strombedarfs in Bayern zukünftig weiter erhöhen. Insgesamt wird von einer Potentialerhöhung von rund 14 % ausgegangen. Dies soll durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden. Zum einen trägt der Neubau an neuen Standorten dazu bei (3 %), zum anderen kann das Potential der Wasserkraft durch den Neubau an bestehenden Querkraftwerken erhöht werden (1 %). Durch die Modernisierung und die Nachrüstung bestehender Anlagen könnten weitere 2 % bzw. 7 % gewonnen werden [51].

Bei bestehenden Anlagen kann das Potential durch Verbesserung des Ausbaugrades gesteigert werden. Dies geschieht beispielsweise durch den Zubau eines Kleinwasserkraftwerks zum bestehenden Wasserkraftwerk. Eine kurzfristige Stauzielerhöhung stellt eine weitere Methode der Potentialerhöhung dar. Üblicherweise existieren im Oberwasser der Anlage zum einen das einzuhaltende Stauziel $Z_S$ bei Normalwasserbedingungen sowie zum anderen das höchste Stauziel $Z_H$ bei Hochwasser. Eine Potentialerhöhung der Anlage kann erreicht werden durch Erhöhung des Dauerstauziels von $Z_S$ auf $Z_H$ (größere Fallhöhe bei Normalwasserbedingungen). Im Hochwasserfall erfolgt eine erneute Absenkung auf $Z_S$. Des Weiteren kann der Wirkungsgrad von älteren Wasserkraftanlagen erhöht werden. Dazu sind allerdings zumeist hohe Investitionskosten notwendig. Diese Maßnahme ist zudem nur für vereinzelte Anlagen sinnvoll [51].

Das Wasserkraftpotential in Ingolstadt ist nahezu vollständig ausgeschöpft. Werden die Punkte Neubau von Anlagen und Modernisierung bzw. Wirkungsgraderhöhung von bestehenden Anlagen in Ingolstadt außer Acht gelassen, können noch 7 % Potentialerhöhung durch einen verbesserten Ausbaugrad und einer kurzfristigen Stauzielerhöhung erreicht

werden. Dies entspricht rund 9 GWh/a zusätzlicher Stromerzeugung. Die Möglichkeiten der Anwendung dieser Maßnahmen werden im Rahmen dieser Studie nicht untersucht.

## 5.4 Geothermie

Geothermie wird auch als Erdwärme bezeichnet und meint die thermisch gespeicherte Energie unterhalb der Erdoberfläche. Es wird zwischen tiefer und oberflächennaher Geothermie unterschieden. Die Grenze liegt bei etwa 400 m. Da für die oberflächennahe Geothermie bestimmte Systeme oft auch Bereiche der Tiefengeothermie benutzen, wird der Übergang zwischen beiden Arten immer fließender. Die Nutzung der oberflächennahen Geothermie basiert in den meisten Fällen auf einer Wärmepumpennutzung. Eingesetzt werden können z. B. Erdwärmekollektoren, Zweibrunnensysteme oder Erdwärmesonden. Das Temperaturniveau bei Nutzung der oberflächennahen Geothermie ist zu gering, um einen Kraftwerksprozess einzubinden [37].

Anlagen zur Tiefengeothermie sind derzeit in Ingolstadt nicht in Betrieb. Die geologischen Voraussetzungen hierfür sind nicht gegeben [7].

**Abbildung 39** zeigt die geothermische Ergiebigkeit bis 100 m Tiefe auf dem Stadtgebiet.

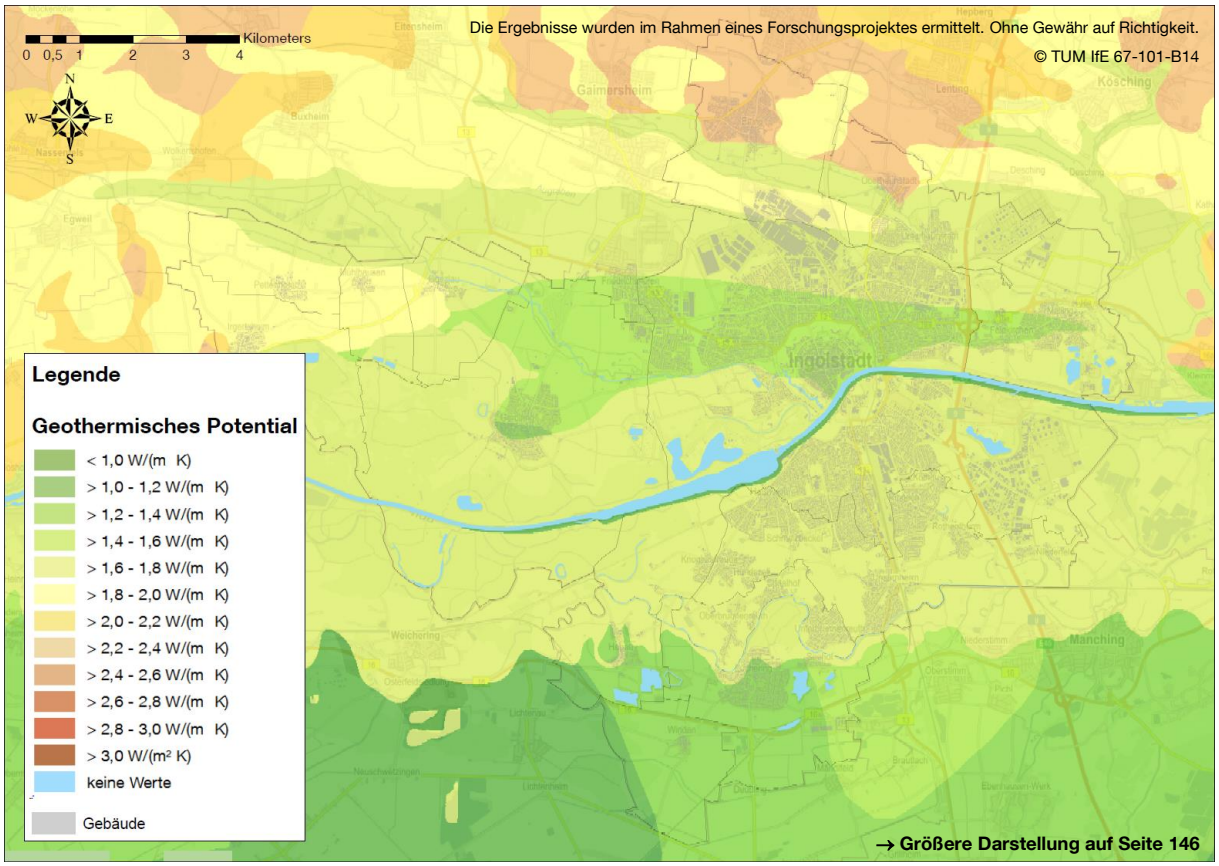



**Abbildung 39**: Geothermisches Potential in Ingolstadt [8, 2]

Die Abschätzung des Potentials für Erdwärmesonden in Ingolstadt basiert erneut auf dem Bayerischen Energie-Atlas.

Die Eignung eines Gebietes für die Nutzung von Erdwärmesonden ist entscheidend von der Beschaffenheit des Untergrundes abhängig. Es wird deutlich, dass ein Großteil der Fläche Ingolstadts eine relativ geringe geothermische Ergiebigkeit (bis zu 1,6 W/(m K)) aufweist. Lediglich im Norden des Stadtgebietes können Ergiebigkeiten von etwas über 2 W/(m K) vorgefunden werden.

Daraus können im nächsten Schritt günstige Gebiete für Erdwärmesonden abgeleitet werden. **Abbildung 40** gibt Aufschluss über die Eignung des Stadtgebietes für die Nutzung von Erdwärmesonden. Die Basis bilden Vorgaben im Leitfaden für Erdwärmesonden in Bayern und Informationen der Wasserwirtschaftsverwaltung.

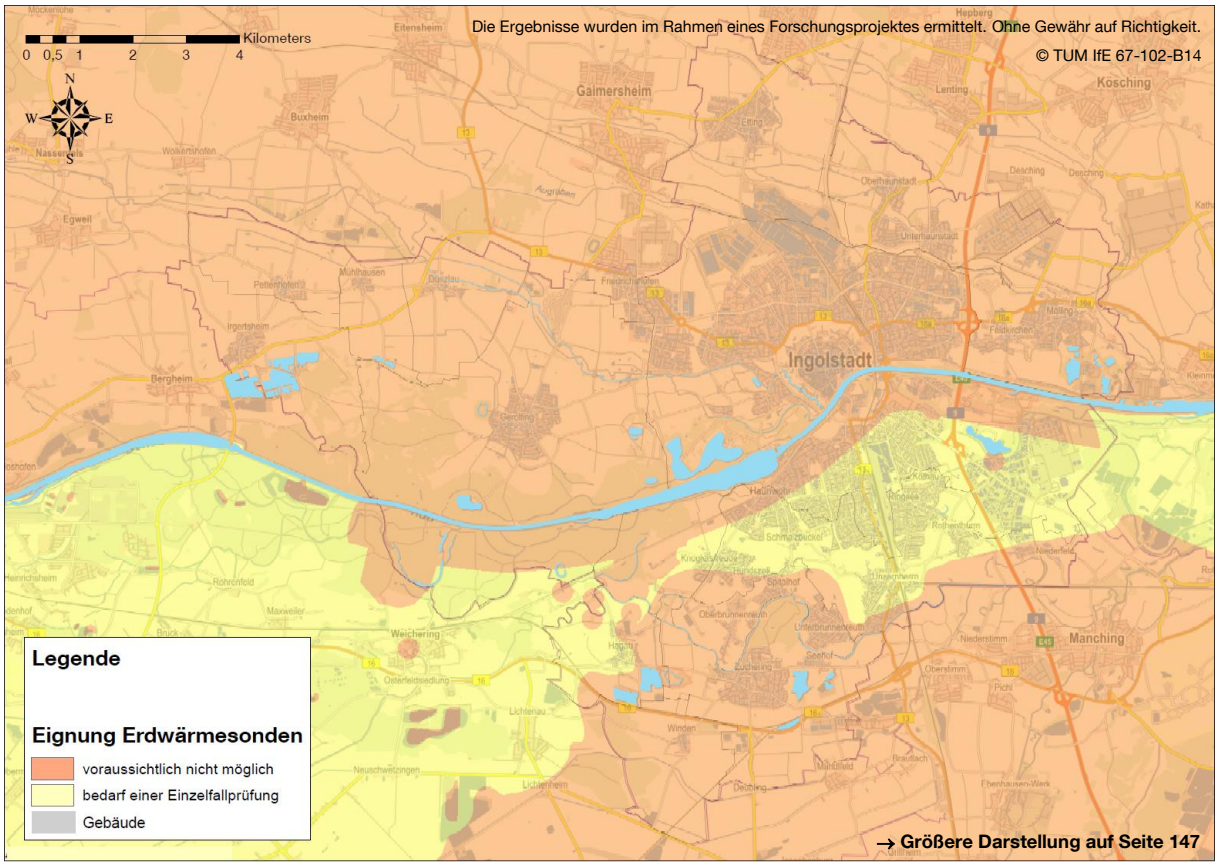



**Abbildung 40:** Günstige Gebiete für Erdwärmesonden in Ingolstadt [8, 2]

Voraussichtlich mögliche Flächen sind in Ingolstadt nicht vorzufinden. Im Großteil des Stadtgebietes sind Flächen vorhanden, die eine Nutzung von Erdwärmesonden voraussichtlich nicht möglich machen. Vereinzelt kann in der Südstadt ein Einsatz nach Einzelfallprüfung empfehlenswert sein.

Die Eignung von Grundwasserwärmepumpen hängt vereinfacht im Wesentlichen von der Grundwassermächtigkeit sowie der Durchlässigkeit des Bodens ab. Die Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten $k_f$ in [m/s] ist in **Abbildung 41** zu sehen.

Der Durchlässigkeitsbeiwert gibt die Durchflussrate von Wasser durch den Boden oder Fels an. Es können nur etwa über die Hälfte des Stadtgebietes Aussagen getroffen werden.

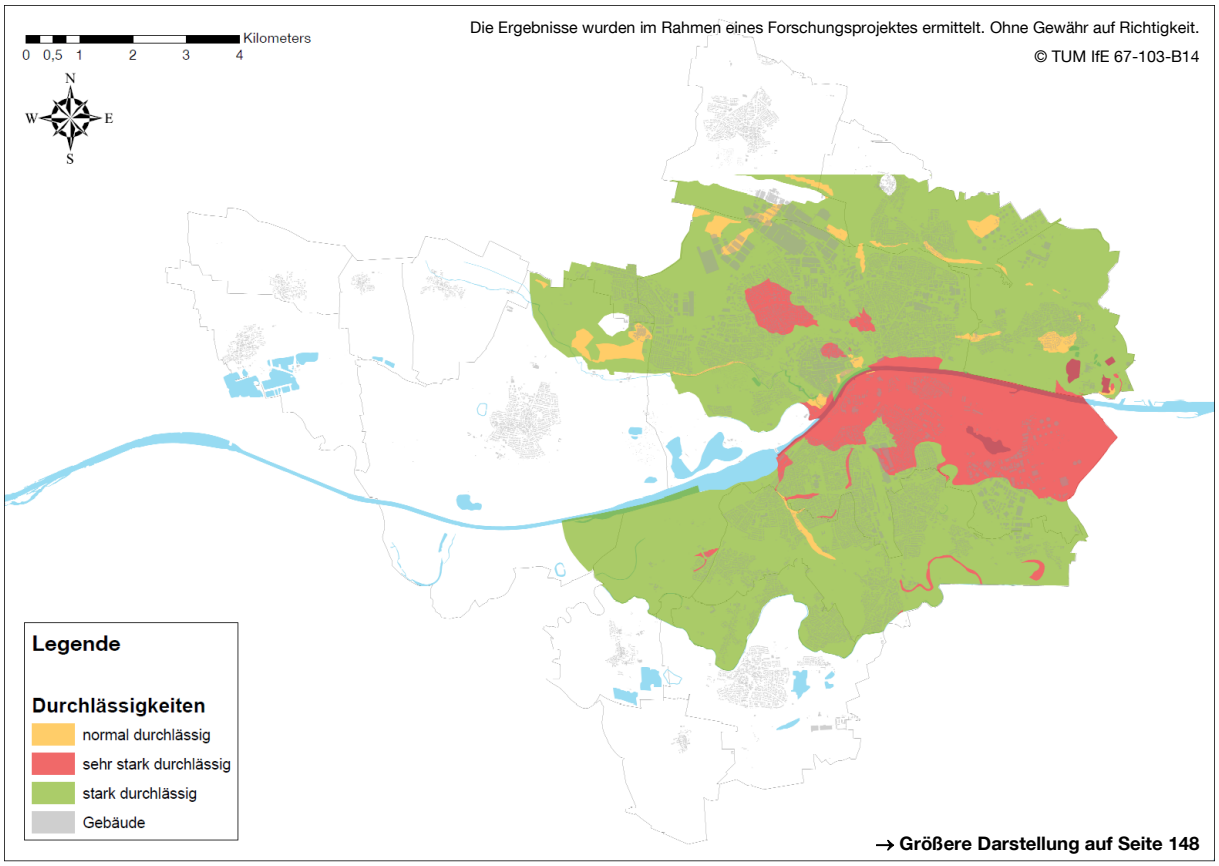



**Abbildung 41:** Grundwasserdurchlässigkeiten in Ingolstadt [52, 2]

Grundsätzlich ist die Beschaffenheit des Untergrundes hinsichtlich der Durchlässigkeitsbeiwerte für die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen geeignet. Die Durchlässigkeiten können von normal durchlässig bis stark durchlässig klassifiziert werden, wobei der überwiegende Teil des Stadtgebietes sehr hohe Durchlässigkeiten aufweist.

Als zweites Kriterium für den Einsatz von Grundwasserwärmepumpen wird die Grundwassermächtigkeit herangezogen. Sie beschreibt den Abstand zwischen der Grundwasseroberfläche und der Grundwassersohle. Die Verteilung der Grundwassermächtigkeiten über das Stadtgebiet Ingolstadts ist **Abbildung 42** zu entnehmen.

Bis zu einer Grundwassermächtigkeit von weniger als 3 m wird die entsprechende Fläche als bedingt geeignet eingestuft. Böden, in denen die Grundwassermächtigkeit zwischen 3 m und 8 m liegt, können als geeignet für die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen ange-

sehen werden. Sehr gut können Grundwasserwärmepumpen dort eingesetzt werden, wo die Mächtigkeit mehr als 8 m beträgt.

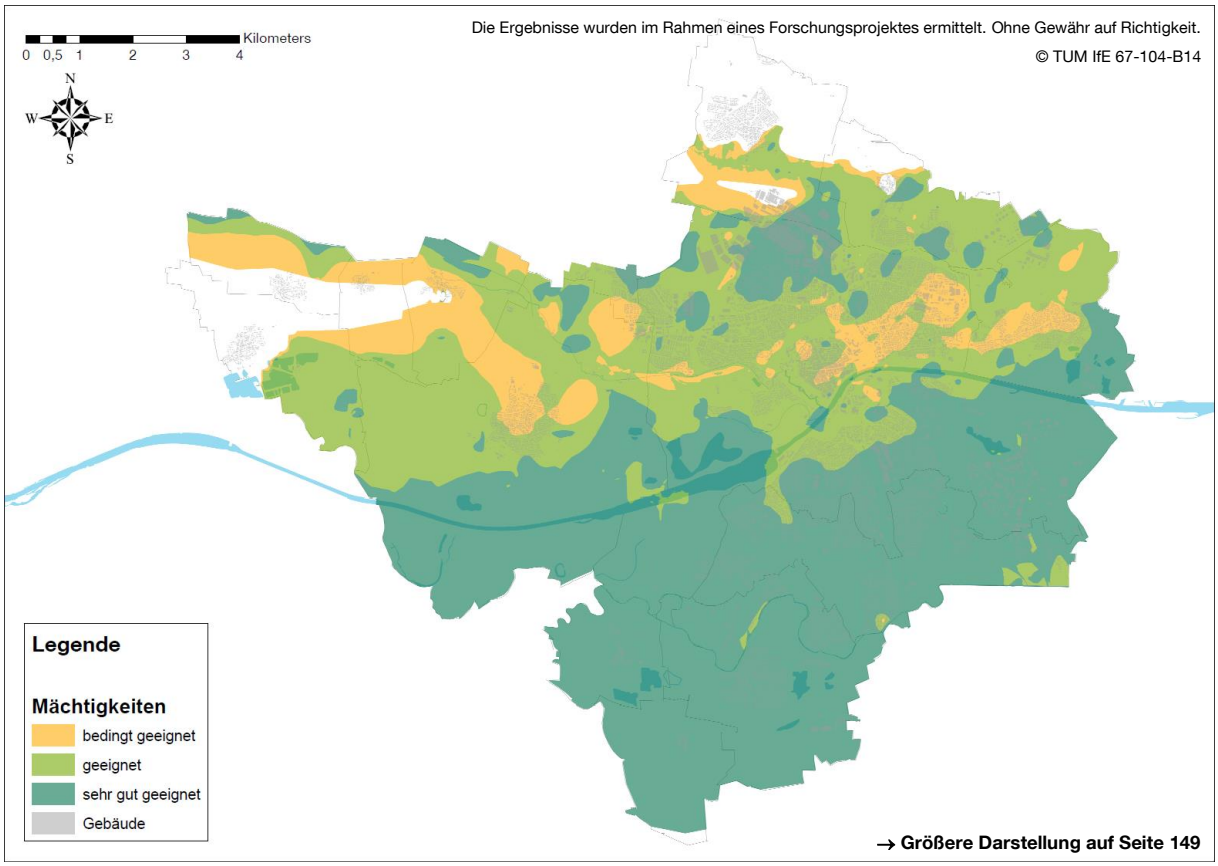



**Abbildung 42:** Grundwassermächtigkeiten in Ingolstadt [52, 2]

Zusammenfassend können in **Abbildung 43** alle Gebäude identifiziert werden, die für die Nutzung einer Grundwasserwärmepumpe geeignet sind. Die Karte zeigt die theoretische Eignung für Grundwasserwärmepumpen in Ingolstadt auf Basis der beiden Kriterien Durchlässigkeit und Mächtigkeit.

Darüber hinaus sind natürlich die hydrochemischen Eigenschaften des Grundwassers zur Ermittlung der lokalen Eignung nötig. Hierzu liegen keine Daten vor, weshalb im Rahmen dieser Studie keine Aussagen darüber getroffen werden können.

Das Potential, das sich für die Wärmepumpennutzung mit Flächenkollektoren auf dem gesamten Ingolstädter Stadtgebiet ergibt, wird in Abschnitt 7.4 im Rahmen der Konzeptentwicklung behandelt.

Derzeit sind in Ingolstadt bereits ca. 70 Erdwärmesonden sowie etwa 180 Grundwasserwärmepumpen in Betrieb.

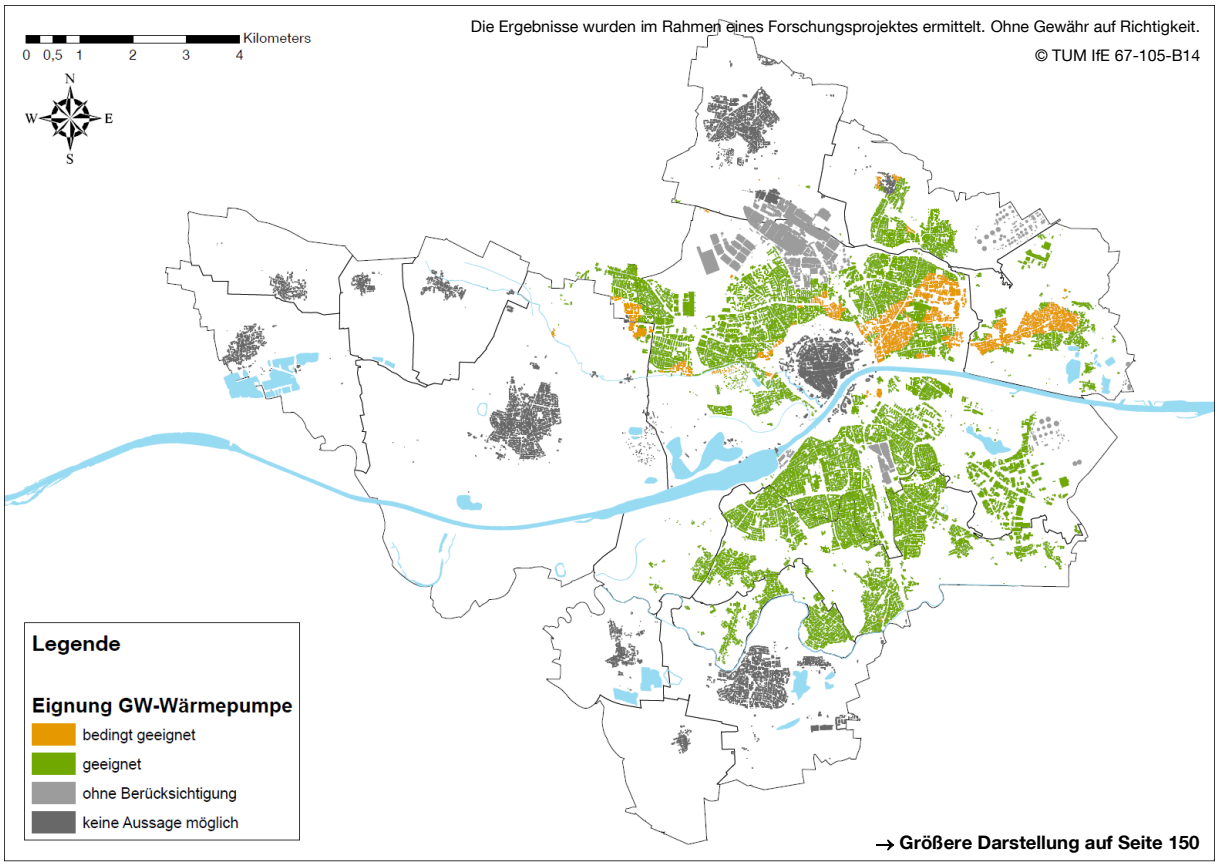



**Abbildung 43:** Theoretische Eignung für Wärmepumpen (Grundwasser) in Ingolstadt auf Basis von Durchlässigkeiten und Mächtigkeiten

# 6 Analyse des Solarpotentials

## 6.1 Vorgehensweise und Methodik

Die Analyse des Solarpotentials geschieht auf Basis von geometrischen Gebäudedaten. Dabei werden drei Genauigkeitsstufen unterschieden. Die Untersuchung geht von vorhandenen Dachflächen, Dachneigungen sowie Ausrichtungen aus. Zudem werden in einfacher Weise auch Abschattungen berücksichtigt.

**Genauigkeitsstufe 1**

Die Analyse im Rahmen der Genauigkeitsstufe 1 basiert auf den Grundrissen der Ingolstädter Gebäude.

Im ersten Schritt wird eine Auswahl aller geeigneten Gebäude erstellt. Ungeeignete Objekte oder Objekte, die keiner Analyse des PV-Potentials unterzogen werden sollen oder bereits über eine PV-Anlage verfügen, werden aus dieser Auswahl entfernt. Aufgrund der aktuellen Beschlusslage in Ingolstadt wird für die gesamte Innenstadt innerhalb des Grüngürtels kein PV-Potential ausgewiesen. Zudem eignen sich Kraftwerks- und Raffineriestandorte nur bedingt für die Nutzung von Photovoltaikanlagen. Bereits vorhandene PV-Anlagen werden berücksichtigt.

Im zweiten Schritt wird für alle geeigneten Gebäude auf Basis der Grundfläche die nutzbare Dachfläche abgeschätzt. Anschließend erfolgt die Ermittlung der Peak-Leistung der PV-Anlagen sowie der erzeugten Energie. Die rechnerische Ermittlung der Peak-Leistung wird dabei durch die Multiplikation der Gebäudegrundfläche, des Gebäudefaktors sowie des Leistungsfaktors erreicht. Der Leistungsfaktor wird mit 0,1 kW pro $m^2$ nutzbarer Dachfläche angenommen. Um die erzeugte Energie zu bestimmen, erfolgt eine Berücksichtigung der Volllaststunden.

**Genauigkeitsstufe 2**

Die Ermittlung des PV-Potentials auf der Genauigkeitsstufe 2 nimmt neben den Gebäudegrundflächen auch die exakten Dachflächen, Dachneigungen und Ausrichtungen der Objekte in die Betrachtungen mit auf. Außerdem wird über einen Faktor der Abschattung von Dachflächen in einer einfachen Weise Rechnung getragen.

Nach Abzug aller ungeeigneten und nicht zu betrachtenden Objekte erfolgt entsprechend des Dachtyps der Gebäude (Satteldach, Flachdach etc.) die Ermittlung der nutzbaren Dachfläche. Die Bewertung erfolgt anhand Elevation und Azimut des entsprechenden Daches. Des Weiteren werden Anlagen mit einer zu geringen ermittelten Leistung (z. B. 5 $kW_p$) nicht in die Berechnungen mit aufgenommen.

**Genauigkeitsstufe 3**

Zur Ermittlung des PV-Potentials in Genauigkeitsstufe 3 werden neue Methodiken angewandt. Basis bildet hier ein bereits bestehendes 3D-Modell der Ingolstädter Gebäude sowie Laserscandaten der gesamten Stadt. Dies lässt eine sehr genaue Ermittlung des PV-Potentials zu.

In einem ersten Schritt werden alle zu untersuchenden Dachflächen identifiziert und anhand der Kriterien Elevation und Azimut bewertet. Die theoretisch maximal nutzbare Dachfläche eines Gebäudes setzt sich aus mehreren Teilstücken zusammen.

Im zweiten Bearbeitungsschritt werden in Form eines gleichmäßigen Rasters Evaluationspunkte über die einzelnen Dachflächen gelegt. Der Punktabstand kann dabei beliebig festgelegt werden (hier 25 cm). Diese verteilten Punkte bilden die Grundlage für die Berechnung der solaren Einstrahlungsleistung auf das Gebäudedach abhängig vom Sonnenstand. Die linke Darstellung in **Abbildung 44** zeigt die Einstrahlungsleistung, die in den jeweiligen Punkten ermittelt werden konnte.

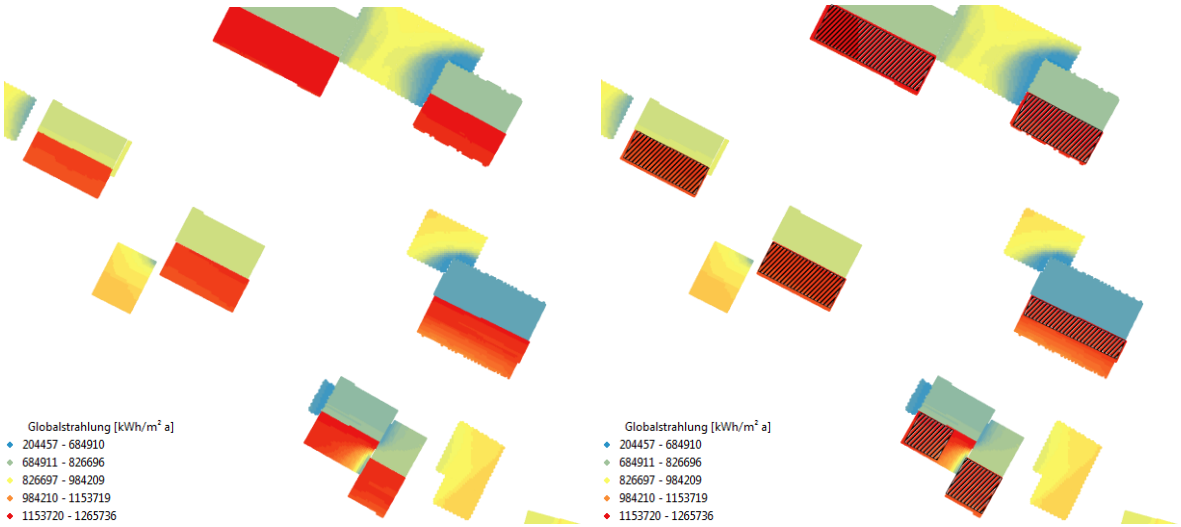



**Abbildung 44:** Einstrahlungsleistung und Modulflächen auf exemplarischem Gebiet

Auf den tieferliegenden Dachflächen ist aufgrund der Verschattung durch höhergelegene Objekte (Dachflächen) eine reduzierte Einstrahlungsleistung festzustellen. Diese Vorgehens-

weise erlaubt es, für die PV-Nutzung geeignete Bereiche des Daches zu identifizieren und aufgrund zu geringer Einstrahlungsleistungen bestimmte Teilstücke des Daches auszuschließen.

In einem letzten Schritt wird mittels eines Clusteralgorithmus eine Identifikation von zur photovoltaischen Nutzung geeigneten Dachflächen vorgenommen. Somit kann letztendlich eine theoretisch maximal mögliche Modulfläche bestimmt werden. Die Verteilung der möglichen Modulflächen ist in Abbildung 44 rechterhand abgebildet. Schließlich kann für die Untersuchung im Rahmen der Genauigkeitsstufe 3 erneut die Peak-Leistung sowie die erzeugte Energie der Photovoltaikmodule angegeben werden.

## 6.2 Auswertung

Die Potentiale für Photovoltaik und Solarthermie werden getrennt angegeben. Zunächst werden die Ergebnisse der Analyse für die Genauigkeitsstufen 1 und 2 beschrieben. Die Kriterien Dachneigung, Ausrichtung und Verschattung sind bereits Bestandteil dieser beiden Untersuchungen. Anschließend erfolgt eine Abschätzung des Solarthermiepotentials in Ingolstadt. Die vollständigen Ergebnisse der Genauigkeitsstufe 3 werden in Form einer Datenbank übergeben, die die Ergebnisse der Dachflächenuntersuchung beinhaltet und geografisch verortet.

### Photovoltaik

Das ermittelte technische Gesamtpotential für Genauigkeitsstufe 1 und 2 wurde einer Rasterung mit einer Auflösung von 200 m unterworfen. Im Allgemeinen ist ein hohes Potential deutlich in Gebieten festzustellen, in denen eine hohe Gebäudedichte vorzufinden ist, wie z. B. in den Kernen der untersuchten Ortschaften auf dem Stadtgebiet. Zudem kann für Gebiete, die durch eine hohe Gesamtdachfläche charakterisiert sind, ein hohes Potential für Photovoltaikanlagen ausgewiesen werden. Dazu zählen beispielsweise Gebiete um den Nordpark oder das Gewerbegebiet an der Manchinger Straße.

Gebäude in den ländlichen Gebieten und Ortschaften eignen sich besonders zur Nutzung photovoltaischer Systeme. Die Bebauungsdichte ist geringer und es kann mit weniger Verschattungen im Vergleich zu zentraleren Gebieten in Ingolstadt gerechnet werden.

Nach Abzug der bereits vorhandenen Anlagen können gemäß Genauigkeitsstufe 1 in einem 100 % Photovoltaik-Szenario noch etwa 154 GWh/a an elektrischer Energie erzeugt werden. Dies würde zur Versorgung von gut 44.000 Haushalten in Ingolstadt ausreichen.

Die Ermittlung des Photovoltaikpotentials auf Basis der Genauigkeitsstufe 2 nimmt weitere Faktoren in die Analyse mit auf. Das sich dabei für Ingolstadt ergebende Photovoltaikpotential ist in **Abbildung 45** dargestellt.

Die grundsätzliche örtliche Verteilung des Potentials ist ähnlich dem Ergebnis aus der ersten Untersuchung. Auch hier ergeben sich aufgrund dichter Bebauung bzw. einer großer Gesamtdachfläche Gebiete mit besonders guter Eignung für Photovoltaikanlagen. Insgesamt sind mehr Rasterzellen mit einer höheren Leistungs- bzw. Energiedichte vorzufinden.

Das Gesamtpotential dieser Analyse, das sich theoretisch nach Abzug bereits vorhandener PV-Anlagen noch erschließen lässt, ergibt sich zu etwa 230 GWh/a und liegt somit höher als in der Genauigkeitsstufe 1 (veränderte Methodik). Wird die Verschattung der PV-Module noch in einfacher Weise faktorbasiert berücksichtigt, verringert sich das Potential im Untersuchungsgebiet auf ca. 170 GWh/a. Die erzeugte elektrische Leistung würde der Versorgung von 48.500 Haushalten genügen.

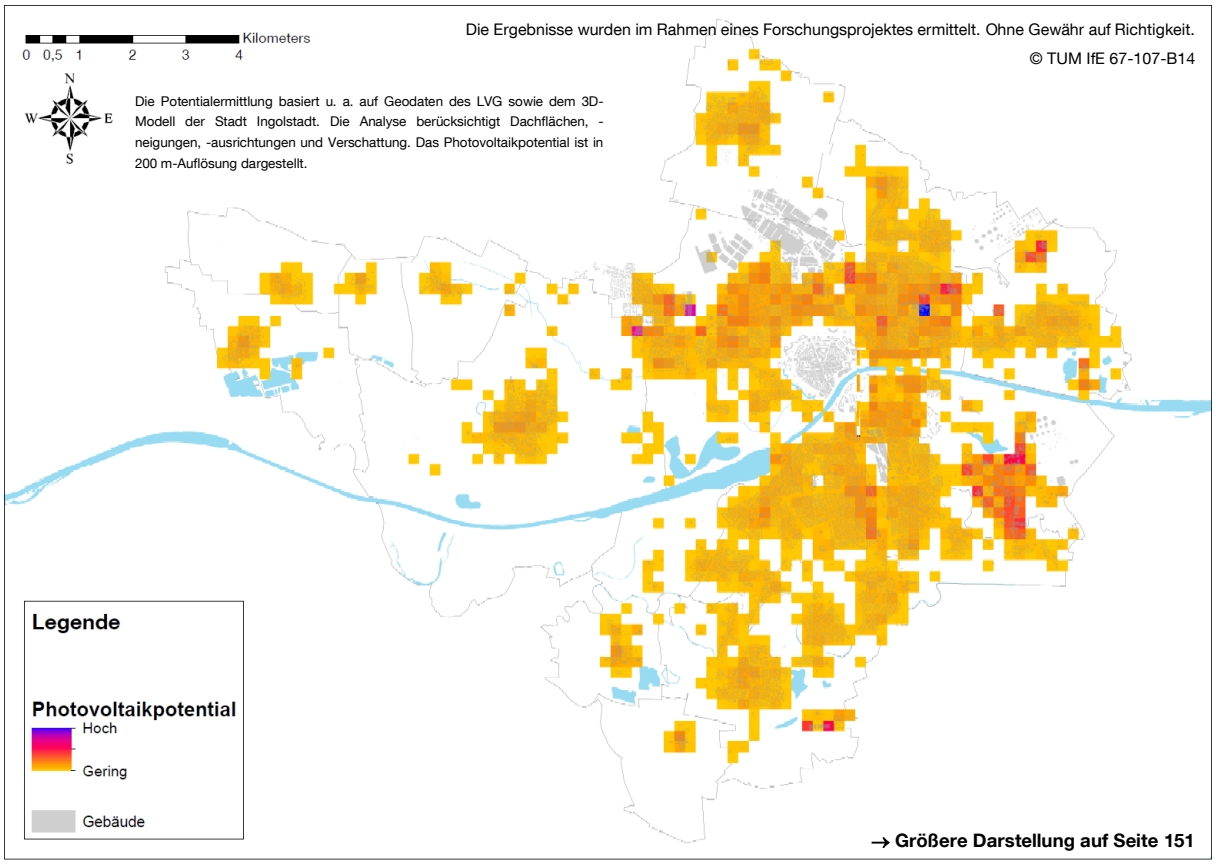



**Abbildung 45:** Photovoltaikpotential: 200 m x 200 m Raster (Genauigkeitsstufe 2) [2]

**Solarthermie**

Anlagen zur photovoltaischen Energieerzeugung sollten perfekt auf dem Gebäudedach ausgerichtet sein, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Solarthermieanlagen dagegen müssen nicht zwangsläufig im exakten Winkel zur Sonne platziert werden und liefern auch bei bedecktem Himmel noch ausreichend Leistung.

Das Solarthermiepotential in Ingolstadt wird hier auf Basis der Gebäudegrundrisse nach Abzug ungeeigneter Gebäude (analog PV-Potential) ermittelt [32]. Unter Berücksichtigung der typisch nutzbaren Solareinstrahlung in Ingolstadt ergibt sich die gesamte über Dachflächen nutzbare Solareinstrahlung in der Stadt. Der Jahresnutzungsgrad der Solarthermie-Anlage wird mit 65 % angenommen. In einem 100 % Solarthermie-Szenario kann von einem theoretischen maximalen Potential von 2,5 TWh/a ausgegangen werden.

# 7 Konzepterstellung

## 7.1 Identifizierung von Sanierungsschwerpunkten

In Kapitel 4 wurde die Ermittlung des Wärmebedarfs der Ingolstädter Gebäude ausführlich beschrieben. Der Wärmebedarf wird dabei maßgeblich vom Gebäudealter, von der Nutzungsart sowie dem Gebäudealter entsprechenden spezifischen Wärmebedarfen bestimmt.

Zur Bestimmung des maximalen Sanierungspotentials ist die Differenz aus dem Wärmebedarf im Ist-Zustand und dem Wärmebedarf im vollständig sanierten Zustand zu bilden. Dies ermöglicht letztendlich die Ausweisung eines maximalen Sanierungspotentials für jedes Gebäude bzw. für jeden Baublock/Cluster in Ingolstadt.

Das in Ingolstadt vorhandene Sanierungspotential ist in **Abbildung 46** dargestellt.

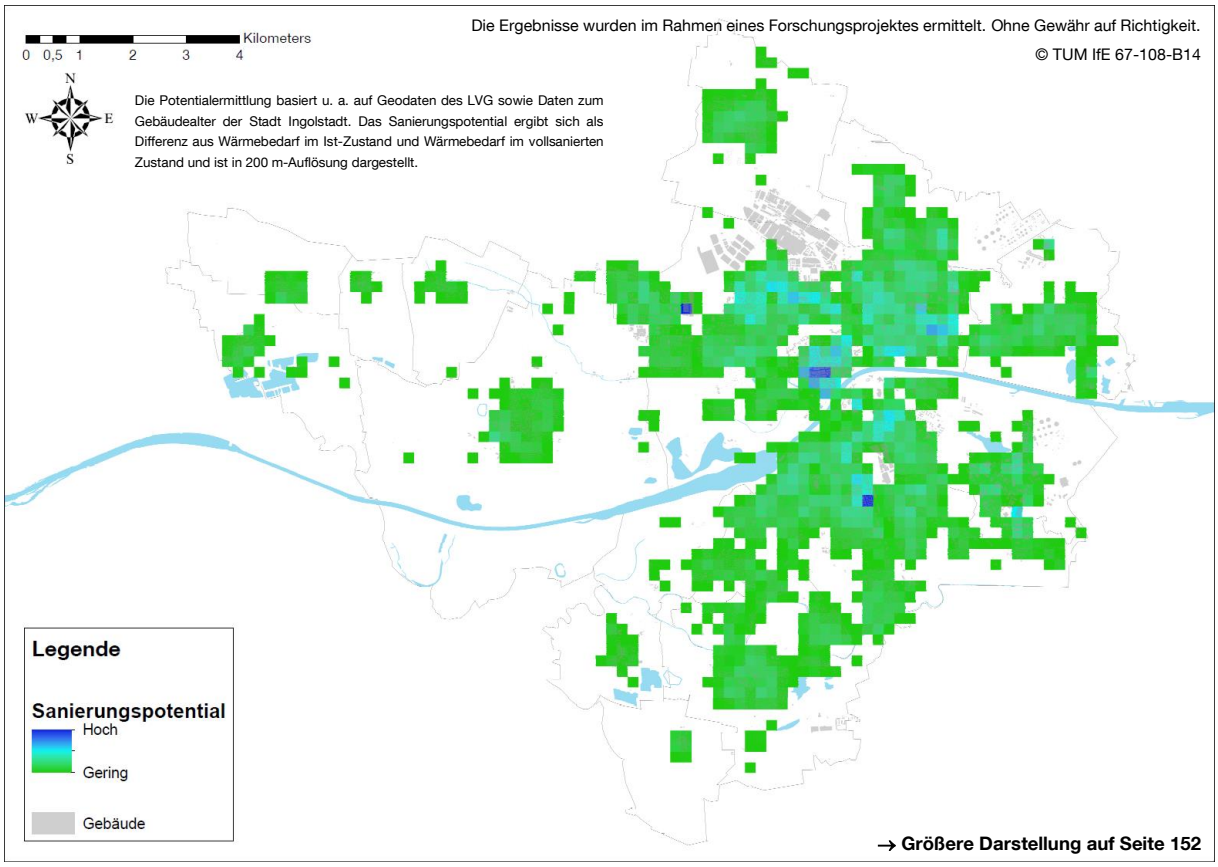



**Abbildung 46:** Vorhandenes Sanierungspotential der Ingolstädter Gebäude [2]

Ausgehend von den Gebäuden im unsanierten Zustand beträgt das ermittelte maximale Sanierungspotential im Untersuchungsgebiet 400 GWh. Das entspricht einer Reduzierung des Wärmebedarfs in Höhe von 24 %. Diese Maßnahmen wirken sich positiv auf die $CO_2$-

Bilanz aus. Durch vollständige Ausnutzung der ausgewiesen Potentiale können etwa 110 kt $CO_2$ eingespart werden. Ohne Berücksichtigung bleiben hierbei Gebiete um Audi, Raffinerien, Kraftwerke und die Staudinger-Logistik. Aufgrund der speziellen Nutzung ist hier eine Prognose über die künftige Entwicklung der Einsparungen durch Sanierung nicht möglich. Zur Verbesserung der Aussagekraft werden diese Gebiete deshalb nicht zur Untersuchung herangezogen.

Gebiete mit besonders hohem Sanierungspotential sind in Abbildung 46 einzusehen. Die Rasterkarte zeigt, dass insbesondere in Gebieten mit einer hohen Bebauungsdichte und älteren Gebäuden ein hohes Sanierungspotential vorliegt. Vor allem die Stadtteile Mitte, Nordost, Nordwest und Münchner Straße weisen ein hohes Sanierungspotential auf. Diese stellen somit Vorzugsgebiete für Sanierung dar.

In Abschnitt 7.9 sind Gebiete mit besonders hohem Sanierungspotential Vorzugsgebieten für Klein-BHKW-Anlagen und Fernwärme gegenübergestellt. Basierend auf der Karte können in Verbindung mit gebäudescharfem Gebäudealter und Sanierungsstand Vorzugsobjekte für Sanierung identifiziert werden. Für das weitere Vorgehen zur Reduzierung des Heizenergiebedarfs durch Sanierung wird die Definition eines Pilotprojekts vorgeschlagen, das die Grobplanung des Energienutzungsplans in eine spezifische praktische Anwendung überführt.

**Definition Pilotprojekt 1: Kosteneffiziente Sanierung**

Im Rahmen des Pilotprojektes soll die Effizienz von Sanierungsmaßnahmen nach wirtschaftlichen Kriterien beurteilt werden. Ziel ist eine kapitaleffiziente Sanierung.

Dafür sollen geeignete Gebäude mit gleicher Altersklasse und Struktur nach verschiedenen Sanierungsstandards saniert werden. Diese Gebäude sollen einen hohen spezifischen Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser aufweisen. Idealerweise sollte es sich um Wohngebäude handeln, da dort höhere Einsparpotentiale als bei Gebäuden anderer Nutzung vermutet werden. Bei der Auswahl der Objekte ist auf deren Vergleichbarkeit zu achten. Vor und nach der Durchführung der baulichen Sanierungsmaßnahmen ist ein exaktes Monitoring des Energiebedarfs nötig, um die tatsächlichen Einsparungen exakt abschätzen zu können. Diesen Einsparungen können die Kosten der Sanierung gegenübergestellt werden. Unter Berücksichtigung der Heizungssysteme und der benötigten Energieträger ergeben sich spezifische $CO_2$-Vermeidungskosten. Dadurch lässt sich nicht nur feststellen, in welchem Umfang Sanierungsmaßnahmen wirtschaftlich für ein einzelnes Gebäude sind, sondern auch die

Fragestellung, wie ein Gebiet bzw. eine Nachbarschaft aus gesamtwirtschaftlicher Sicht kostenoptimal $CO_2$-Emissionen reduzieren kann, kann beantwortet werden.

Das Pilotprojekt liefert somit einen wichtigen Beitrag und Argumente für die Entscheidung, ob in einem speziellen Gebiet ein Ausbau der Fernwärme, eine drastische Reduzierung des Heizenergiebedarfs durch Sanierung, die Wärmeversorgung durch Klein-BHKW-Anlagen oder eine Mischform oben genannter Möglichkeiten durchgeführt werden soll.

## 7.2 Ausbau der existierenden Fernwärme

Um einen weiteren Ausbau der Fernwärme in Ingolstadt zu untersuchen, werden die aktuellen Versorgungsgebiete der Fernwärme (**Abbildung 47**) dem zukünftigen Energiebedarf nach Sanierung (**Abbildung 48**) gegenübergestellt.

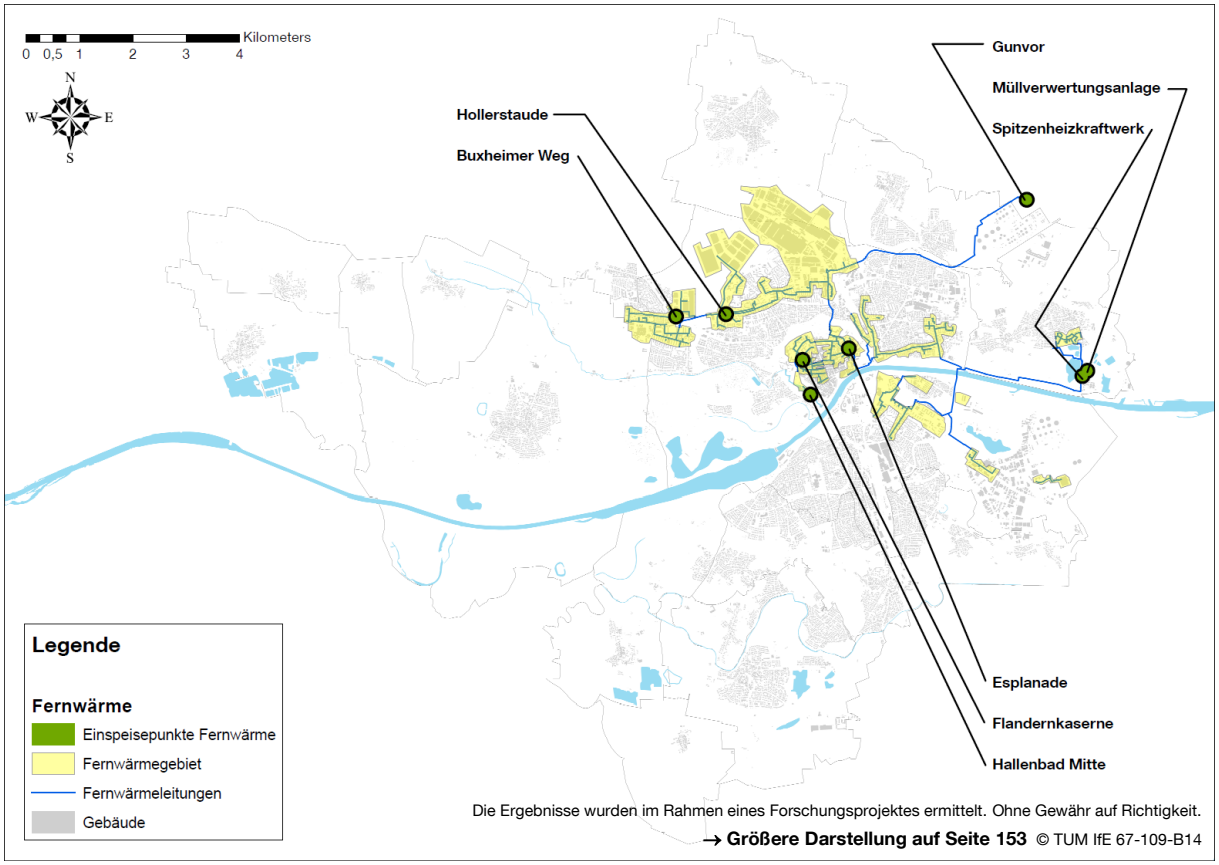



**Abbildung 47:** Vorhandene Fernwärmegebiete in Ingolstadt [12, 2]

Das Fernwärmepotential in vorhandenen Fernwärmegebieten beträgt nach Vollsanierung 220 GWh/a ohne Berücksichtigung des Großabnehmers Audi. Im unsanierten Zustand beträgt das Fernwärmepotential ohne Audi noch 292 GWh/a. Der Vergleich der aktuellen Erzeugungsmenge mit dem Wärmebedarf in den aktuell erschlossenen Fernwärmegebieten ergibt eine hohe Deckung des Gesamtwärmebedarfs vor der Sanierung. Im vollsanierten

Zustand entspricht das Fernwärmepotential innerhalb der vorhandenen Fernwärmegebiete nahezu der für diese Objekte zur Verfügung stehenden Erzeugungsmenge (exkl. Audi).

Aufgrund einzelner Großverbraucher aus der Industrie und deren in dieser Studie nicht bekannten Wärmenachfrage ist eine abschließende Aussage über Anschlussgrade in den Fernwärmegebieten jedoch nicht möglich. In einem ersten Schritt muss deshalb eine weitere mögliche Nachverdichtung des vorhandenen Fernwärmenetzes und damit eine Erhöhung des Anschlussgrades in den vorhandenen Fernwärmegebieten geprüft werden, bevor neue Fernwärmegebiete erschlossen werden.

Mögliche Potentialgebiete liegen in unmittelbarer Nähe zu vorhanden Fernwärmegebieten und weisen langfristig eine hohe Wärmenachfrage auf. Diese ist in Abbildung 48 dargestellt. Einzelne Potentialgebiete werden nochmals in Abschnitt 7.9 hervorgehoben.

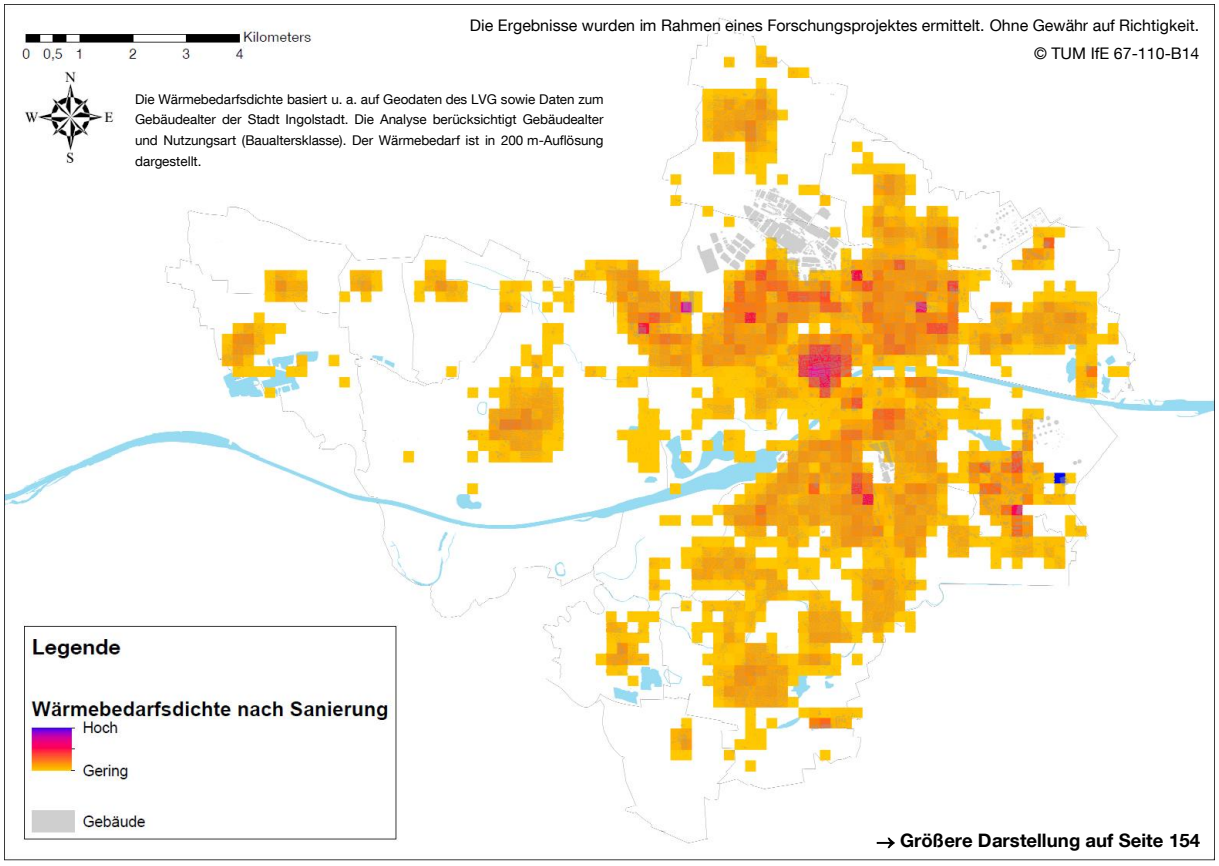



**Abbildung 48:** Wärmebedarfsdichte nach Sanierung in Ingolstadt [2]

Bei einem deutlichen Ausbau des Fernwärmenetzes ist ein Ausbau der Wärmeerzeugungskapazität nötig. Eine Abwärmenutzung aus Raffinerieanlagen in Vohburg sowie aus dem Kraftwerk Irsching stellen mögliche Optionen dar. Gemäß den Stadtwerken Ingolstadt besitzt das Fernwärmenetz einen Primärenergiefaktor von Null. Fernwärme stellt somit eine ausgezeichnete Option dar, den Energieeinsatz und die $CO_2$-Emissionen drastisch zu redu-

zieren. Das exakte $CO_2$-Minderungspotential ist vom Anschlussgrad der Fernwärme in bestehenden Gebieten und der Neuerschließung von Fernwärmegebieten abhängig. Um dieses exakt zu spezifizieren, müssen weitere Daten erhoben werden. Anders als durch konventionelle Heizungsanlagen entstehen durch Fernwärme zudem keine lokalen Emissionen. Schadstoffemissionen können reduziert und die Luftqualität damit erhöht werden.

Bei Erschließung von Neubaugebieten in der Nähe von existierenden Fernwärmegebieten ist eine Eignung für Fernwärme zu prüfen. Oft weisen Neubaugebiete jedoch niedrige spezifische Verbräuche auf. Deshalb ist auch auf eine wirtschaftliche Eignung der Fernwärme zu achten, um hohe Anschlusskosten zu vermeiden.

## 7.3 Klein-Blockheizkraftwerke

Klein-BHKW-Anlagen erreichen durch die kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme hohe Effizienzen. Insbesondere im Hinblick auf die durch die Abschaltung von Kernkraftwerken entstehende Reduzierung der Erzeugungsleistung stellt die kombinierte Erzeugung eine interessante Alternative zu konventionellen Heizsystemen dar. Das Ergebnis der Untersuchung hinsichtlich der Eignung von Gebäuden für BHKWs ist in **Abbildung 49** dargestellt

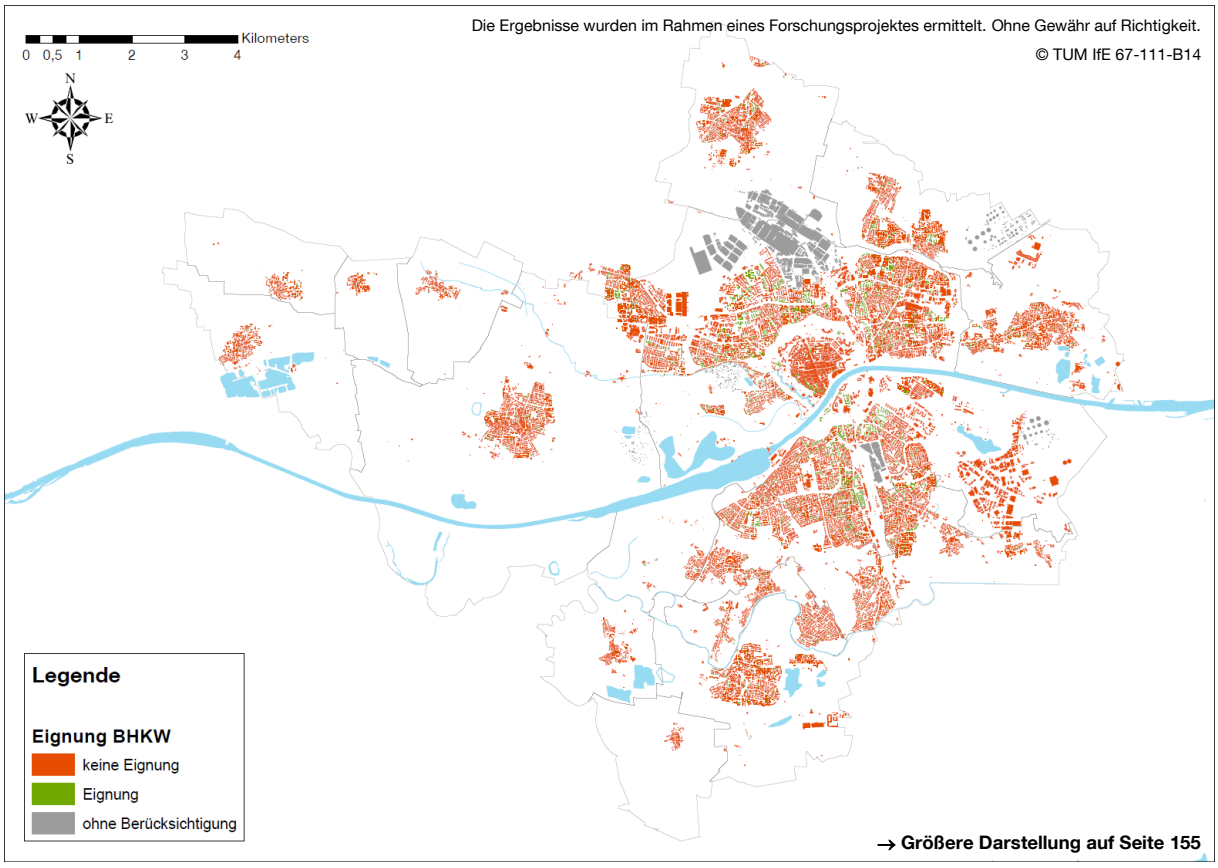



**Abbildung 49:** Eignung für Klein-BHKWs in Ingolstadt [2]

Die Wirtschaftlichkeit derartiger Anlagen ist nur unter einem kontinuierlichen Betrieb mit gleichzeitiger Wärme- und Stromnachfrage gegeben. Zusätzlich sind derzeit nur Anlagen größerer Leistungsklassen ökonomisch sinnvoll. Deshalb eignen sich vor allem Mehrfamilienhäuser, die einen ganzjährig hohen Wärmebedarf aufweisen.

Im Rahmen der Studie wurde die Eignung einzelner Gebäude für den Einsatz von Klein-BHKW-Anlagen auf Basis der in Kapitel 4 vorgestellten Gebäudedatenbank ermittelt. Da Klein-BHKW-Anlagen in Fernwärmeversorgungsgebieten nicht gefördert werden sollen und mit der in Ingolstadt hoch effizienten Fernwärme konkurrieren, werden Gebäude in Fernwärmegebieten von der Eignung ausgeschlossen. Um nur wirtschaftliche Anlagen zu identifizieren, wird ein Jahreswärmebedarf von 40 MWh vorausgesetzt. Industrie und Gewerbe eignen sich aufgrund ihrer Verbrauchsstruktur nur teilweise für den Einsatz von Klein-BHKW-Anlagen. Da hierzu keine ausreichend genauen Daten vorliegen, wurden nur Gebäude mit Wohnnutzung untersucht.

Auf Basis der vorgestellten Methodik ergibt sich im sanierten Zustand ein maximales Potential zur Deckung des Wärmebedarfs von 220 GWh/a. Ein zusätzlicher Restwärmebedarf in diesen Gebäuden von 57 GWh/a muss über Spitzenlastkessel gedeckt werden. Gebiete und Objekte mit besonders hohem Potential können Abbildung 49 entnommen werden. Im Allgemeinen eignen sich vor allem Gebäude mit, auch nach Sanierung, hohen Wärmebedarfen. Diese treten vermehrt in den Stadtbezirken Mitte (große Ausschlussgebiete durch Fernwärme beachten), Nordost, Nordwest und Münchner Straße auf. Beim Vergleich dieser Vorzugsgebiete zeigt sich deutlich der Nutzungskonflikt mit Fernwärmepotentialgebieten und Schwerpunktgebieten für Sanierung (Kapitel 7.9).

Durch den Einsatz von Klein-BHKW Anlagen und die kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme kommt es im Stadtgebiet zu einem höheren Gasverbrauch und einem vermehrten Ausstoß von $CO_2$. Dieser steigt um 16 % im Vergleich zu gasversorgten Gebäuden von 75 kt/a auf 86 kt/a. Die erzeugte Strommenge beträgt bei maximaler Nutzung des Potentials unter Verwendung typischer Betriebsparameter 100 GWh/a. Somit könnten rechnerisch 29.000 Haushalte in Ingolstadt aus lokaler Erzeugung versorgt werden. Bei Nutzung aller 3.288 Standorte ergibt sich eine elektrische Gesamtleistung von 20 MW.

Eine Kombination der einzelnen Standorte zu einem virtuellen Kraftwerk stellt ein interessantes Konzept der intelligenten Stromerzeugung dar. Dieses wird im Zusammenhang mit anderen Konzepten zur Stromerzeugung in Kapitel 7.5 beschrieben.

## 7.4 Wärmepumpen

Mit sinkendem Energieverbrauch und besseren Isolierungen steigt die Attraktivität von elektrischer Energie als Quelle für die Wärmeerzeugung. Insbesondere bei Neubau stellen Wärmepumpen eine interessante Alternative zu konventionellen Heizsystemen dar. Technisch ist es möglich, auch Bestandsgebäude auf die für Wärmepumpen benötigte Niedrigtemperatursysteme umzurüsten.

Im Rahmen der Studie wurde eine Methodik entwickelt, mögliche Potentiale zu identifizieren. Als Kriterium für die Eignung wurde die Energienutzfläche ins Verhältnis zu der unbebauten Grundstücksfläche gesetzt. Mittels einer Wirtschaftlichkeitsgrenze wird zwischen geeigneten und ungeeigneten Versorgungsobjekten unterschieden. Dadurch wird dem Flächenbedarf Rechnung getragen, welcher durch die Verwendung von Flächenkollektoren entstehen würde.

**Abbildung 50** visualisiert das Ergebnis der Untersuchung.

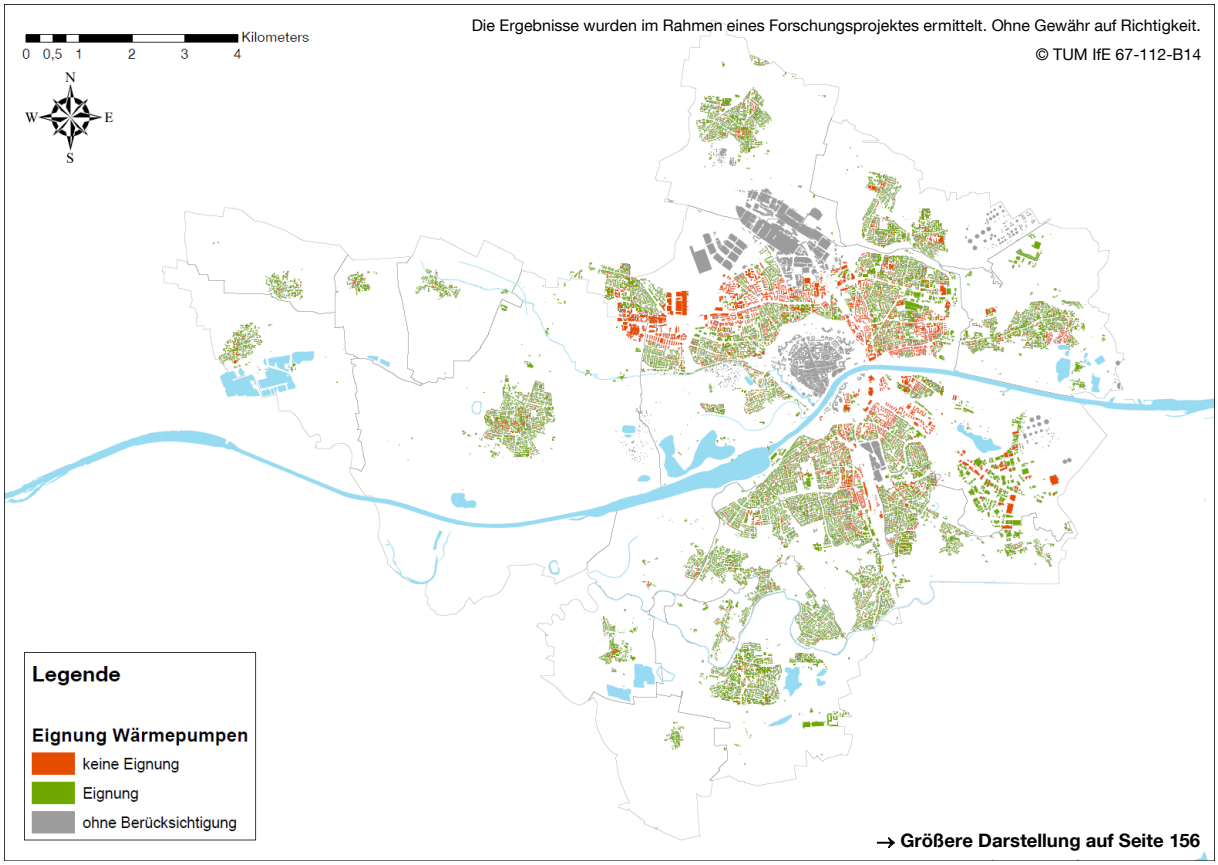



**Abbildung 50:** Eignung für Wärmepumpen (Kollektoren) in Ingolstadt [2]

Die Verwendung von Grundwasserwärmepumpen und Erdsonden konnte aufgrund mangelnder Daten nicht in die Methodik integriert werden. Die prinzipielle Eignung dieser Systeme wird jedoch in Kapitel 5.4 diskutiert.

Gebäude in Fernwärmeversorgungsgebieten und für Klein-BHKW-Anlagen geeignete Gebäude sind von der Eignung für Wärmepumpen ausgeschlossen.

Deutlich zu erkennen ist, dass sich vor allem Gebäude – insbesondere Ein- und Zweifamilienhäuser – im ländlicheren Bereich bzw. im Bereich des Stadtrands für die Nutzung von Wärmepumpen eignen. Im innerstädtischen Bereich ist hingegen nur vereinzelt Potential vorhanden.

Im sanierten Zustand wird ein Potential zur Wärmebedarfsdeckung von 670 GWh/a ermittelt. Dieses Potential beinhaltet auch Gebäude, die sich aufgrund der eigentlichen Bau- und Heizstruktur nur unter hohem Sanierungsaufwand für die Nutzung eignen. Um das wirtschaftlich nutzbare Potential zu ermitteln, müssen mehr Daten über die jeweiligen Objekte bezogen werden. Eine Definition von Vorzugsgebieten ist nicht zielführend, da die Eignung von individuellen Objekteigenschaften abhängt und im Einzelfall geprüft werden muss. Insbesondere in Gebieten ohne Gasnetz stellen Wärmepumpen eine interessante Alternative zu konventionellen Heizsystemen dar.

Über typische Parameter ergibt sich bei voller Nutzung des Potentials ein zusätzlicher Strombedarf von 192 GWh/a. Lokal gesehen können somit die Emissionen vollständig vermieden werden. Werden Gasheizungen substituiert, ergibt sich eine lokale $CO_2$-Einsparung von 163 kt/a. Das Potential liegt höher, wenn Ölheizungen ersetzt werden (aufgrund höherer spezifischer Emissionen), jedoch niedriger bei der Substitution von Pellet- oder Holzheizungen. Die zusätzlichen globalen Emissionen durch die Stromerzeugung sind stark vom zukünftigen Energiemix abhängig.

## 7.5 Versorgungsausblick Photovoltaik – BHKW – Elektromobilität

In den Abschnitten 7.1 bis 7.4 werden mögliche Konzepte für die zukünftige Wärmeversorgung in Ingolstadt vorgeschlagen und beschrieben. Auch im Bereich der Stromversorgung bieten sich auf Basis von Photovoltaik-Anlagen, Klein-BHKWs und der Integration von Elektrofahrzeugen interessante Versorgungskonzepte.

Die momentan in Ingolstadt installierte Photovoltaikleistung ist im Vergleich zu anderen Städten und Kommunen mit 282 W/Einwohner bereits sehr hoch. Die lokale Verteilung der derzeit vorhandenen PV-Anlagen ist **Abbildung 51** zu entnehmen.

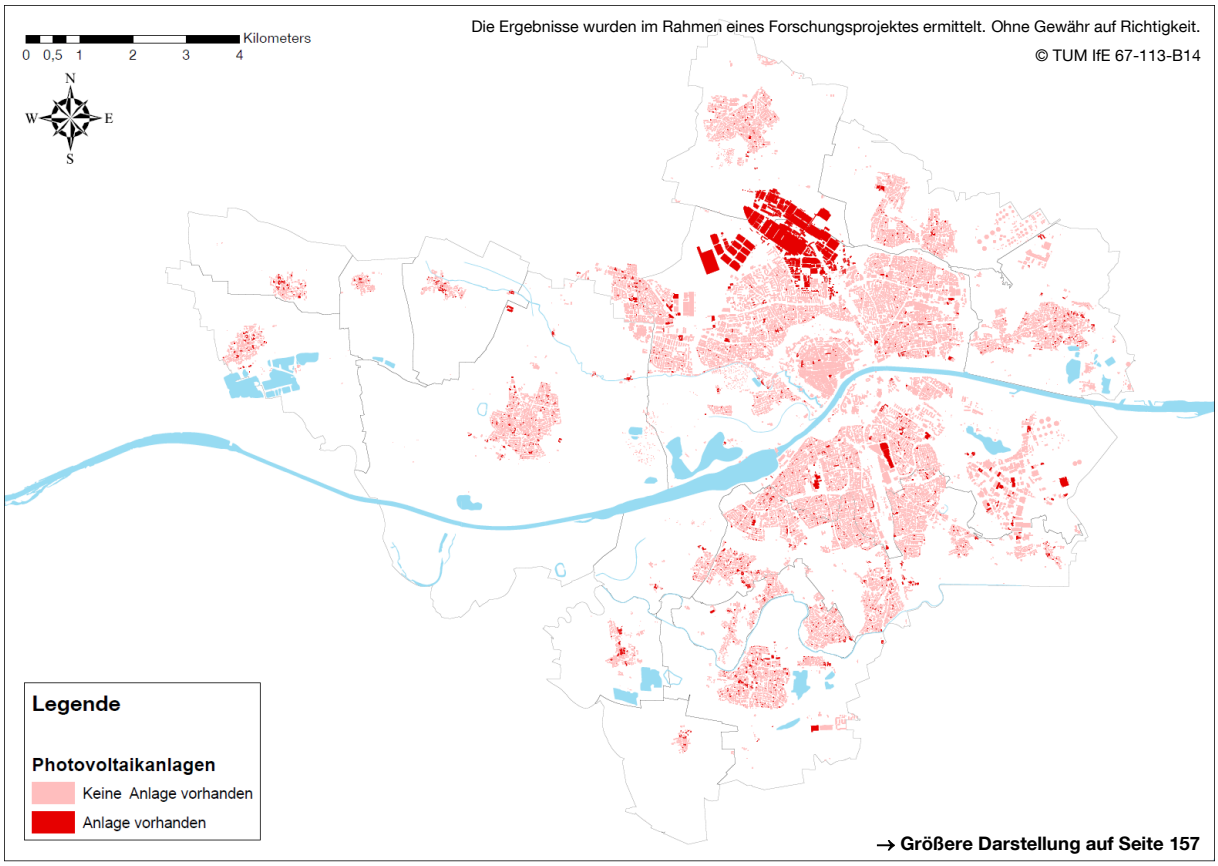



**Abbildung 51:** Vorhandene PV-Anlagen in Ingolstadt [12, 2]

Die in Abschnitt 6 durchgeführten Potentialanalysen haben zudem gezeigt, dass das theoretisch noch auszuschöpfende Potential in Ingolstadt auf einem hohen Niveau liegt und die elektrische Energiegewinnung durch PV-Anlagen in Zukunft noch deutlich gesteigert werden kann. Das abhängig von der gewählten Genauigkeitsstufe ermittelte Potential liegt in Ingolstadt zwischen 154 GWh/a und 230 GWh/a.

Dennoch muss an dieser Stelle auf die allgemeine Problematik bei der Integration von Photovoltaikanlagen hingewiesen werden. PV-Anlagen erzeugen vor allem während der Sommermonate den größten Anteil des jährlichen Energieertrages. Zudem kommt es um die Mittagszeit zu einem Anstieg der Leistung sowie der erzeugten Energie, die den Eigenverbrauch übersteigen kann. In den Abend- und Nachtstunden wird keine elektrische Energie mehr erzeugt.

Die Herausforderung besteht darin, die Photovoltaik auf effektivere Weise in das Energiesystem eines Gebäudes bzw. der Stadt zu integrieren. Denkbar wäre beispielsweise eine sinnvolle Kopplung der Energieerzeugung aus Photovoltaik- und BHKW-Anlagen. In Kapitel 7.3 wurde erläutert, dass sich im sanierten Zustand knapp 3.300 Gebäude in Ingolstadt für den wirtschaftlichen Einsatz eines Klein-BHKWs eignen würden. Eine Eignung für den Ein-

satz von PV-Anlagen ist grundsätzlich für jedes Gebäude gegeben. Die Zusammenschaltung verschiedener dezentraler Stromerzeugungseinheiten wie PV-Anlagen und BHKWs würde zur Bildung eines sogenannten virtuellen Kraftwerkes in Ingolstadt führen. Dieser Verbund aus Erzeugungseinheiten kann Strom bereitstellen und somit die Erzeugungsleistung von größeren Kraftwerken ersetzen. Mithilfe des Einsatzes von BHKWs (Kapitel 7.3) könnte in Ingolstadt bereits eine maximale elektrische Gesamtleistung von 20 MW zur Verfügung gestellt werden. In den Sommermonaten kann eine PV-Anlage aufgrund des hohen Ertrages ideal zur Stromversorgung eines Gebäudes eingesetzt werden, während in den Wintermonaten der erzeugte Strom aus der BHKW-Anlage genutzt werden kann. Somit kann ein ganzjähriges Erzeugungskonzept realisiert werden.

Ferner kann sich die Integration eines Elektrofahrzeuges in das Energiesystem eines mit PV und BHKW ausgerüsteten Gebäudes positiv auswirken. Die Batterie des Elektroautos kann mit überschüssigem PV-Strom, wie er beispielsweise während der Mittagszeit zur Verfügung steht, geladen werden und dient somit als Stromspeicher. Somit kann eine $CO_2$-neutrale Integration von Elektrofahrzeugen sichergestellt werden.

**Definition Pilotprojekt 2: Erneuerbare Erzeugung und Elektromobilität**

Im Rahmen des Pilotprojektes soll das Zusammenspiel von erneuerbarer Energieerzeugung und der Integration von Elektrofahrzeugen innerhalb von Gebäuden untersucht und beurteilt werden.

Zunächst können dafür verschiedene Gebäude, die auf Basis der durchgeführten Analysen sowohl BHKW- als auch PV-Eignung aufweisen, identifiziert werden. In das Energiesystem dieser Gebäude soll anschließend ein Elektrofahrzeug eingebunden werden. Dadurch lassen sich die Deckungsgrade von PV- und BHKW-Anlagen sowie der zusätzliche Nutzen eines Elektrofahrzeuges gegenüberstellen und bewerten. Ähnliche Konzepte werden bereits verfolgt (z. B. Projekt „e-MOBILie“ im Schaufenster Elektromobilität). Dadurch soll eine optimierte Verknüpfung elektrischer Mobilität mit regenerativer Stromerzeugung erreicht werden. Ziel ist letztendlich ein intelligentes Gebäude, das ein optimiertes Management von BHKW-, PV-Anlagen und Elektrofahrzeugen durchführt.

Das Pilotprojekt soll Erkenntnisse darüber liefern, ob und auf welche Weise Elektrofahrzeuge in Kombination mit lokal erzeugter regenerativer Energie zur Senkung der $CO_2$-Emissionen beitragen können. Neben einer Bewertung der ökonomischen und ökologischen

Effekte können auch Empfehlungen für die Weiterentwicklung sowohl bei Elektrofahrzeugen als auch bei Energiemanagementsystemen abgeleitet werden.

**Abbildung 52** beschreibt den Zusammenhang von erneuerbarer Energieerzeugung und Elektromobilität im Projekt e-MOBILie.

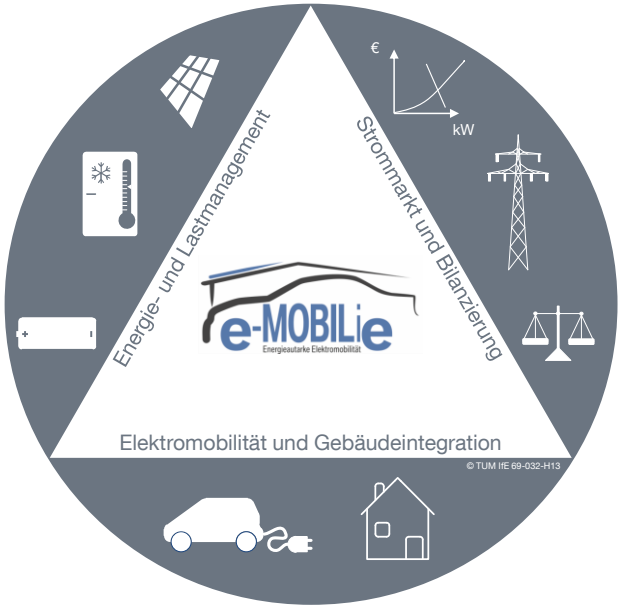



**Abbildung 52:** e-MOBILie - Elektromobilität und Gebäudeintegration

**Definition Pilotprojekt 3: Intelligente Stromtankstellen für Elektrofahrzeuge**

Ein weiteres vorgeschlagenes Pilotprojekt basiert auf der Integration von intelligenten Elektrotankstellen in Ingolstadt.

Wie in Kapitel 2.3 ersichtlich, hat die Stadt Ingolstadt einen positiven Pendlersaldo von über 35.000 zu verzeichnen. Ein Großteil der Pendler davon wird aufgrund der ländlich geprägten Umgebung Ingolstadts auf einen Pkw zurückgreifen. Das Pilotprojekt soll große Parkplatzflächen, wie sie z. B. auf dem Betriebsgelände von Audi oder am Hindenburgpark existieren, auf Ihre Eignung für Stromtankstellen hin untersuchen und bewerten. Idealerweise können auf entsprechenden Parkflächen intelligente Stromtankstellen installiert werden, die vor allem von Pendlern während des Tages genutzt werden. Eine Kombination der Stromtankstellen mit PV-Anlagen und somit eine Ladung der Fahrzeugbatterien mit photovoltaisch erzeugtem Strom ist ebenfalls im Rahmen des Pilotprojektes denkbar. Auf die Problematik der Photovoltaik (Mittagsspitze) wurde in den vorangegangenen Ausführungen bereits hingewiesen.

Durch die Integration von Stromtankstellen für Pendler und Nutzung der überschüssigen Energie aus Photovoltaik während der Mittagszeit lässt sich eine $CO_2$-neutrale Integration von Elektrofahrzeugen für Pendler auf dem Stadtgebiet realisieren. Würden Fahrzeugbatterien mit dem deutschen Strommix geladen, wäre der Betrieb von Elektrofahrzeugen zwar lokal emissionsfrei, die Erzeugung des Ladestroms würde jedoch weitere Emissionen im Energiesektor verursachen. Der vermehrte Einsatz von elektrisch betriebenen Fahrzeugen trägt zudem zur Lastglättung bei. Die lokalen Emissionen innerhalb der Stadt können durch die Nutzung des aus regenerativen Energiequellen stammenden Stroms signifikant gesenkt werden.

**Abbildung 53** zeigt den Einsatz einer intelligenten Ladestation. Diese Ladestation wurde im Rahmen des Studentenprojekts InCharge entwickelt.

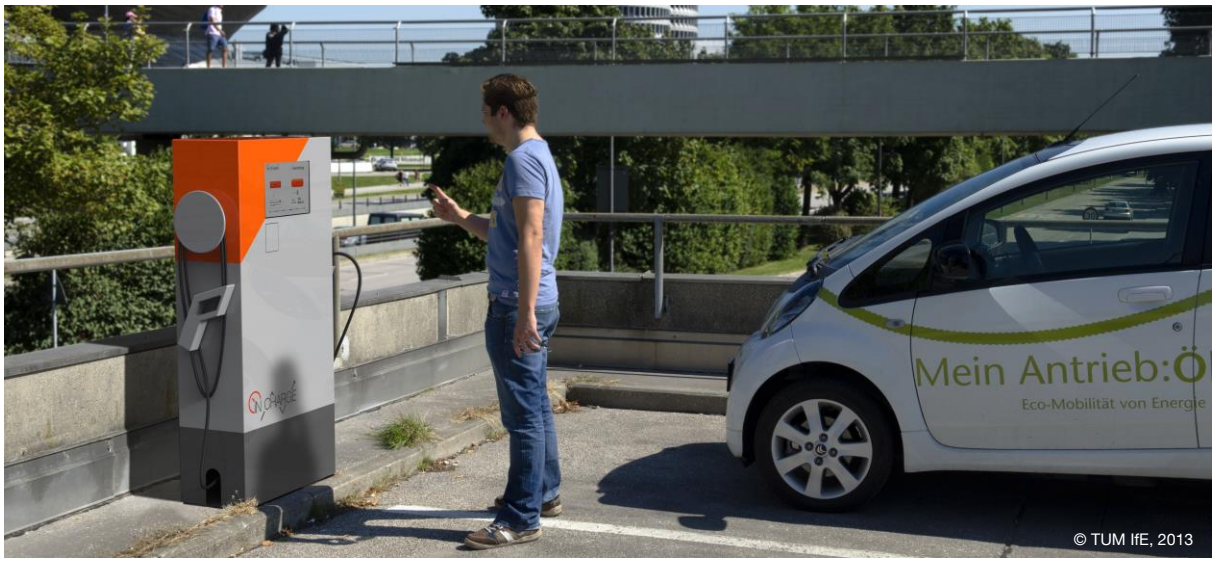



**Abbildung 53:** Intelligente Ladestation InCharge

## 7.6 Kurzumtriebsplantagen

Um die Eignung von Grundstücken für den Anbau von Kurzumtriebsplantagen zu untersuchen, bedarf es der Bewertung mehrerer Eigenschaften.

Liegen die zu untersuchenden Flächen in Natur- oder Vogelschutzgebieten, ist eine Realisierung von Kurzumtriebsplantagen oftmals nicht möglich. Der Errichtung von Kurzumtriebsplantagen in Landschaftsschutzgebieten gehen im Allgemeinen weitere Genehmigungen voraus. Des Weiteren ist die Erlaubnis der Nutzung von Grünlandflächen für Kurzumtriebspflanzen abhängig vom entsprechenden Bundesland. Ebenfalls problematisch können sich Böden mit hohem Tonanteil (Durchwurzelbarkeit, Bodenbearbeitung), Staunässe oder sehr feuchte Flächen erweisen [53].

Im Folgenden werden für eine erste Abschätzung des Potentials für Kurzumtriebsplantagen in Ingolstadt sämtliche Acker- und Dauergrünlandflächen im Stadtgebiet mit einbezogen. Die dabei bekannten und zur Abschätzung des Potentials zur Verfügung stehenden Kriterien beziehen sich auf:

- Bodenart
- Zustandsstufe (Ackerschätzung) / Bodenstufe (Grünlandschätzung)
- Entstehungsart (Ackerschätzung) / Klimastufe (Grünlandschätzung)
- Bodenzahl (Ackerschätzung) / Grünlandgrundzahl (Grünlandschätzung)
- Ackerzahl (Ackerzahl) / Grünlandzahl (Grünlandschätzung)

Die beiden wesentlichen Kriterien, die das Wachstum von Kurzumtriebsplantagen entscheidend beeinflussen, sind zum einen die Wasserverfügbarkeit auf einer Fläche und zum anderen die durchschnittliche Jahreslufttemperatur. Richtwerte für die klimatischen Bedingungen belaufen sich auf etwa 300 mm Niederschlag in der Wachstumsphase der Kurzumtriebsplantagen sowie auf eine durchschnittliche Jahrestemperatur von mindestens 7 °C [54, 53].

Ackerstandorte werden im Moment überwiegend zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion genutzt. Der verstärkte Anbau von Energiepflanzen wie Pappeln oder Weiden auf diesen Flächen steht dieser Nutzung jedoch konkurrierend gegenüber. Um die jeweiligen Standorte in Ingolstadt anhand ihrer natürlichen Bodenbeschaffenheit bewerten zu können, wird das Kriterium der Ackerzahl herangezogen. Die Ackerzahl bewertet die Ertragsfähigkeit einer Fläche und berücksichtigt dabei auch die klimatischen Verhältnisse sowie die Geländegestaltung. Somit ist es möglich, eine Aussage über die Eignung einer Ackerfläche für den Anbau von kurzumtriebsfähigen Energiepflanzen oder für die Nutzung zur Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln in Abhängigkeit der Ackerzahl zu treffen.

Im Gegensatz zu Kulturpflanzen, die in der Nahrungs- und Futtermittelproduktion gängig sind, können kurzumtriebsfähige Energiepflanzen auch auf Böden geringerer Ertragskraft bzw. kleinerer Ackerzahl und entsprechend vorhandener Wasserversorgung angepflanzt werden. Gründe hierfür sind unter anderem der geringere Nährstoffbedarf derartiger Pflanzen sowie die tiefer reichenden Wurzeln [54].

Die Konkurrenz zur Produktion von Nahrungs- und Futtermittel spielt beim Umbruch von Grünlandflächen zu Standorten für Pappeln oder Weiden eine untergeordnete Rolle. Grundsätzlich ist eine Nutzung von Grünlandstandorten für Kurzumtriebsplantagen möglich. Die rechtlichen Grundlagen bezüglich des Grünlandumbruchs sowie der Nutzung und des An-

baus von kurzumtriebsfähigen Energiepflanzen auf Grünlandstandorten unterliegt jedoch den einzelnen Bundesländern [53]. Zudem ist auf Grünland eine Vielzahl höherer Pflanzenarten beheimatet oder dient der Bevölkerung als Erholungsgebiet, was mit einer weiteren Einschränkung des Potentials einhergeht. Ob entsprechende Grünlandflächen für Kurzumtriebsplantagen geeignet sind, muss unter verschiedensten Aspekten im Einzelfall geprüft werden [54].

**Abbildung 54** zeigt die Eignung von Acker- und Grünlandflächen in Ingolstadt zur Kurzumtriebsbewirtschaftung.

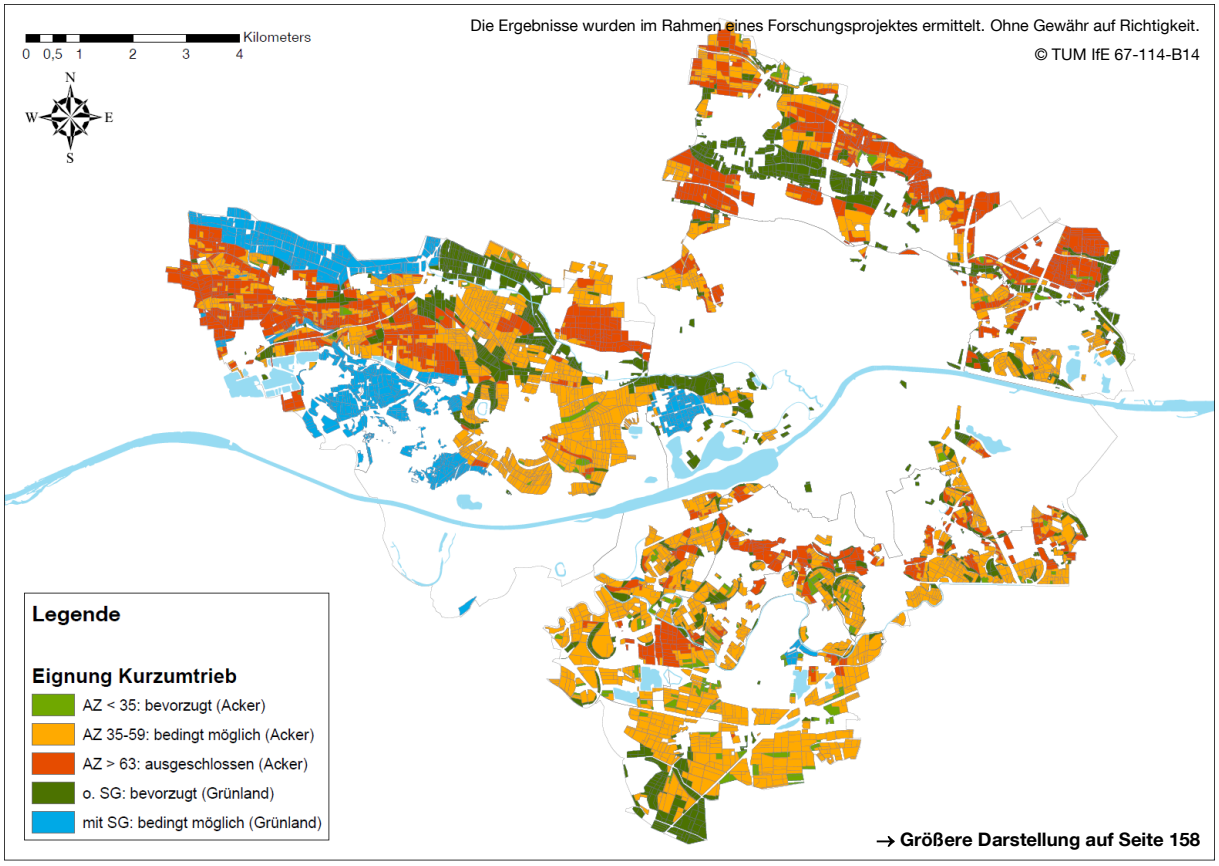



**Abbildung 54**: Eignung von Acker- und Dauergrünlandflächen für Kurzumtriebsplantagen [55, 2]

Die Datenbasis bilden Informationen zur Acker- und Grünlandschätzung des Amtes für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten in Ingolstadt.

Unter Annahme einer ausreichenden Wasserversorgung sowie einer geeigneten Jahresmitteltemperatur werden zur Abschätzung des Potentials die einzelnen Ackerflächen nach der Ackerzahl kategorisiert, die Grünlandflächen gemäß dem Vorhandensein einer Schutzzone (Naturschutzgebiet, Landschaftsschutzgebiet, Vogelschutzgebiet) [54]: Ackerflächen mit einer Ackerzahl kleiner 35 werden als bevorzugt für Kurzumtriebsplantagen angesehen, da

für eine landwirtschaftliche Nutzung dieser Flächen für herkömmliche Kulturpflanzen mit Einschränkungen gerechnet werden muss. Flächen mit einer günstigeren Ertragsfähigkeit (Ackerzahl zwischen 35 und 59) eignen sich entsprechend gut für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion und sind daher nur als bedingte Flächen für kurzumtriebsfähige Energiepflanzen einzustufen. Sehr gut für die landwirtschaftliche Nutzung geeignete Standorte (Ackerzahl > 63) werden in der vorliegenden Studie der Kurzumtriebsbewirtschaftung vorenthalten.

In obiger Grafik sind alle mit einer Schutzzone belegten Grünlandflächen blau und somit bedingt möglich dargestellt. Schutzzonenfreie Grünlandstandorte werden ebenfalls als mögliche Flächen für Kurzumtriebsplantagen ausgewiesen, um das mögliche Potential zu ermitteln.

Mit einem Heizwert für Holzhackschnitzel von 5 MWh/$t_{atro}$ und mittleren Trockenmasseerträge von 7 bis 11 $t_{atro}$/(ha a) für Pappeln und 5 bis 9 $t_{atro}$/(ha a) für Weiden [53] ergeben sich jährliche Energieerträge in Ingolstadt entsprechend **Tabelle 12**.

**Tabelle 12**: Energieerträge durch Kurzumtriebsbewirtschaftung in Ingolstadt

| | *AZ < 35, o. SG* | *AZ 35-59* | *AZ > 63* | *gesamt* |
|---|---|---|---|---|
| Fläche [ha] | 1.075 | 2.392 | 1.368 | 4.835 |
| $Energieertrag_{Pappel}$ [GWh/a] | 38 bis 59 | 83 bis 132 | 48 bis 75 | 170 bis 266 |
| $Energieertrag_{Weide}$ [GWh/a] | 27 bis 48 | 60 bis 108 | 34 bis 61 | 121 bis 218 |

Werden lediglich die Acker- und Grünlandflächen genutzt, die aufgrund ihrer Ackerzahl bevorzugt für den Anbau von Energiepflanzen in Frage kommen und keine Schutzzonenbelegung aufweisen, ergibt sich im Mittel ein jährlicher Energieertrag von 48,5 GWh (Pappelanbau) bzw. 37,5 GWh (Weidenanbau) als maximales theoretisches Potential.

Angenommen wird ein durchschnittlicher Wärmebedarf pro Haushalt von 150 kWh/($m^2$ a). Bei einer durchschnittlichen Haushaltsgröße von 86 $m^2$ und Berücksichtigung von Wirkungsgradverlusten des Wärmenetzes und des Kessels könnten somit maximal etwa 3.500 Ingolstädter Haushalte mit Wärme versorgt werden.

Die Frage nach der technischen Realisierbarkeit des maximalen theoretischen Potentials (Hangneigung, mechanisierte Bewirtschaftung etc.) kann jedoch an dieser Stelle nicht beantwortet werden und muss im Einzelfall für jedes ermittelte Potentialgebiet geprüft werden.

Darüber hinaus müssen vor allem im nördlichen Stadtgebiet die für das Stadtklima der Stadt Ingolstadt wichtigen Frischluftschneisen berücksichtigt werden. Die naturräumliche Schutzfunktion dieser Bach- und Flussniederungen darf nicht beeinträchtigt werden. Auch hier ist eine Einzelfallprüfung notwendig.

## 7.7 Photovoltaik entlang der Autobahn

Bei der Bestimmung geeigneter Flächen zur Errichtung von PV-Anlagen auf Freiflächen entlang Autobahnen oder Schienenwegen sind unterschiedliche Parameter/Ausschlusskriterien in die Planungen mitaufzunehmen. Diese umfassen die Geländeeignung/Ausrichtung (ungünstig geneigte Flächen), Mindestflächen für Freiflächenanlagen (1.000 $m^2$), Naturschutz- und Waldflächen sowie den vorgefundenen Leitungsbestand (Versorgungsleitungen). Nach Abzug der Ausschlussflächen, die keine weitere Berücksichtigung finden, können die verbleibenden Potentialflächen in den nächsten Bearbeitungsschritt übernommen werden. Weitere Gunst-/Ungunstkriterien oder Grundstücks- und Eigentumsverhältnisse sind zu prüfen und abzuklären [56].

Um mögliche Potentialflächen entlang der Bundesautobahn 9 zu identifizieren, ist in einem ersten Schritt die Ausdehnung des Untersuchungsraumes festzulegen. Die Vergütungsfähigkeit von Freiflächenanlagen ist gegeben, wenn sich die Anlage in einer Entfernung bis zu 110 m, gemessen vom äußeren Rand der Fahrbahn, befindet [56].

Um erste Flächen auszuschließen, werden bebaute Flächen, Ortschaften, Waldflächen sowie Landschafts- und Naturschutzgebiete berücksichtigt und vom Untersuchungsraum abgezogen. Diese grundsätzlich für Freiflächenphotovoltaik in Frage kommenden Gebiete werden im nächsten Schritt weiter eingeschränkt, indem Flächen für Straßen, Wege, Bahnstrecken und Gewässer etc. als nicht geeignet eingestuft werden [56].

Das sich letztendlich ergebende Potentialgebiet entlang der Autobahn 9 ist in **Abbildung 55** dargestellt. Es ist in mehrere Teilgebiete unterteilt.

Insgesamt ergibt sich gemäß der Analyse eine maximale Potentialfläche von etwa 1,27 $km^2$. Mit einer durchschnittlich installierten Leistung von 33 MW/$km^2$ für Freiflächenanlagen [57] kann ein maximales theoretisches Potential von 42 MW ermittelt werden.

In einem weiteren Schritt können die ermittelten Flächen bezüglich ihrer räumlichen Ausrichtung (Neigung) evaluiert werden, um eventuell ungünstig exponierte Bereiche als nicht geeignet zu klassifizieren. Dies wird im Rahmen dieser Untersuchung nicht durchgeführt.

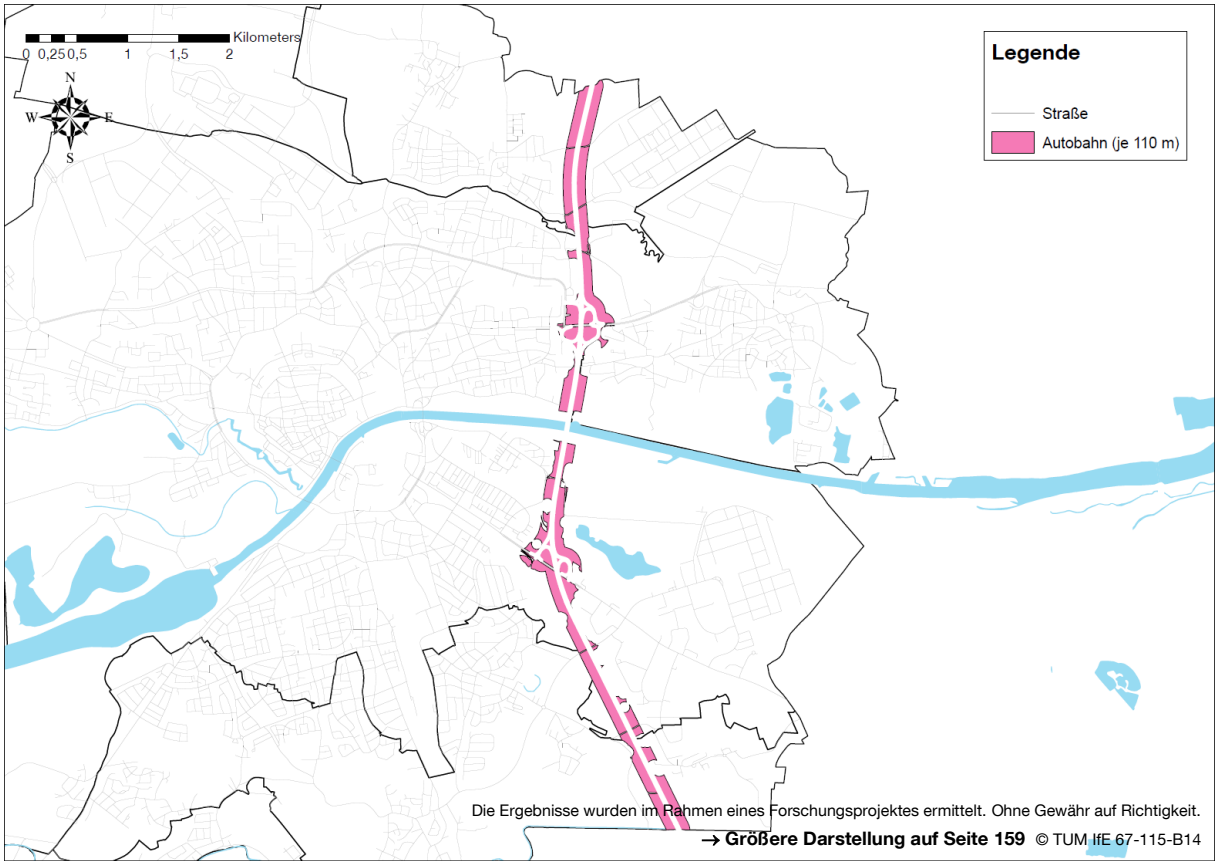



**Abbildung 55:** Untersuchungsraum nach Abzug aller Ausschlussflächen [2]

Durch die Errichtung von Freiflächenphotovoltaik und die Erzeugung elektrischer Energie kommt es zu einem rechnerisch ermittelten Einsparpotential von ca. 16,6 kt. Zugrunde gelegt wird der Ingolstädter Strommix mit einem spezifischen Emissionsfaktor von 387 g/kWh.

## 7.8 Abwasserwärmenutzung

Durch das Ableiten von häuslichem und industriellem Abwasser in die Kanalisation geht thermische Energie verloren. Diese Verluste können durch Abwasserwärmerückgewinnung reduziert werden.

Eine direkte thermische Verwendung des Abwassers über Wärmetauscher ist aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus und des inhomogenen Wärmeträgermediums problematisch. Um nutzbare Temperaturniveaus zu erzielen, werden deshalb Wärmepumpen eingesetzt. Im Sommer ist es möglich, Abwasser als Kältequelle zu verwenden und zur Gebäudekühlung einzusetzen. Die Kopplung von Abwasserwärmerückgewinnungsanlagen mit Heizkesseln

oder Klein-BHKW-Anlagen zur Versorgung von größeren Gebäudekomplexen oder Nahwärmenetzen bietet sich an, um die Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. Somit kann der Primärenergiebedarf und damit der Ausstoß von $CO_2$ und anderen Emissionen verglichen mit konventionellen Heizsystemen signifikant reduziert werden.

Eine exakte Untersuchung ist dabei für jeden Einzelfall nötig. Neben verbraucherseitigen Anforderungen sind auch abwasserseitige Bedingungen zur wirtschaftlichen Nutzung zu erfüllen. Ungeeignet für Abwasserwärmerückgewinnung sind Einfamilienhäuser (zu geringe Wärmeleistung) und Prozesswärmeverbraucher (Temperaturniveau) [58].

Das im Auftrag des Bundesverbands der deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V. ermittelte Abwasserpotential für Deutschland beträgt 3.665 GWh/a [59]. Angewandt auf Ingolstadt würde dies ein theoretisches Abwasserpotential von 5,8 GWh/a bedeuten. Das entspricht rechnerisch dem Jahreswärmebedarf von 430 Haushalten. Dieses theoretische Potential verringert sich weiter aufgrund kanalseitiger Einschränkungen sowie geeigneter Verbrauchsstrukturen.

**Abbildung 56** visualisiert die Standorte in Ingolstadt, an denen Abwasserwärmenutzung möglicherweise geeignet ist.

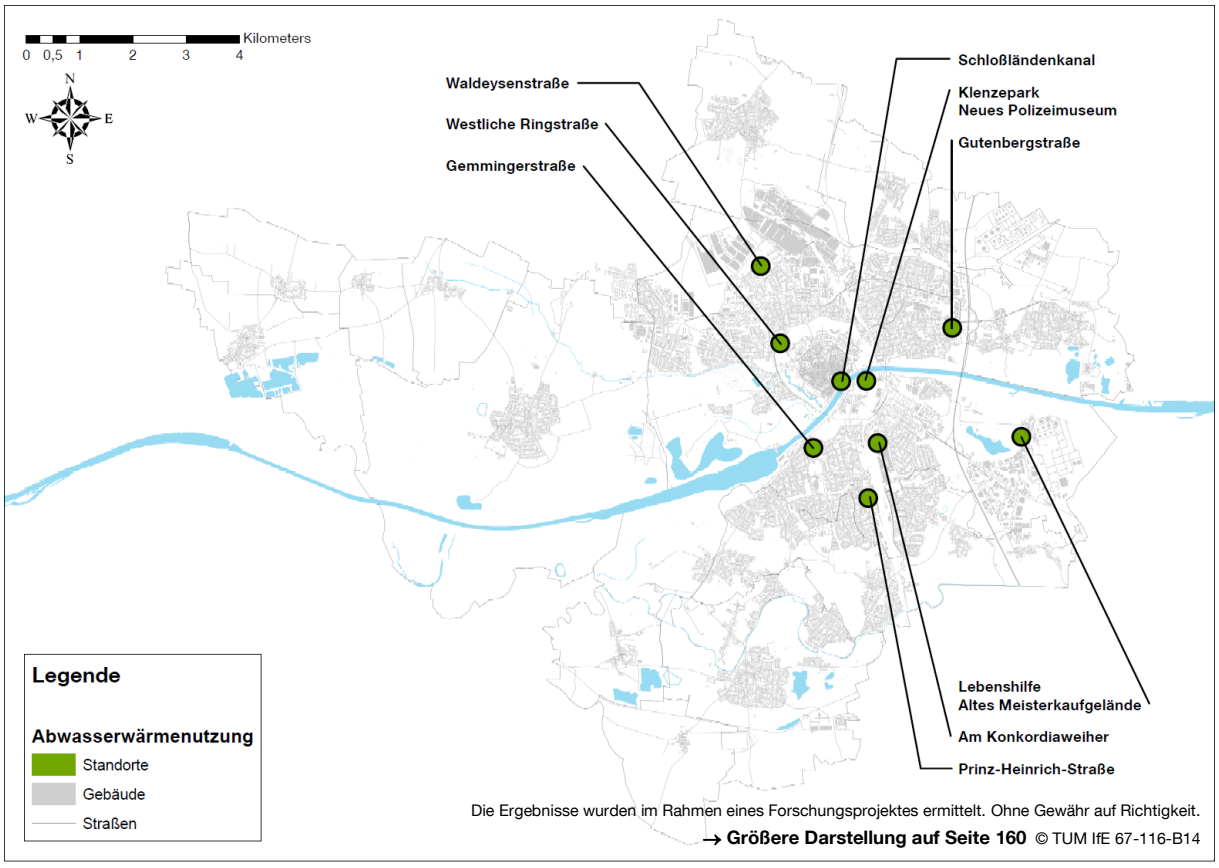



**Abbildung 56:** Mögliche Standorte zur Nutzung von Abwasserwärme in Ingolstadt [46, 2]

Weitere Daten und Untersuchungen zu den einzelnen Standorten liegen gegenwärtig nicht vor.

## 7.9 Zusammenfassung der Konzepte und Schwerpunktpotentiale

Basierend auf den Kapiteln 7.1 bis 7.4 werden Gebiete mit besonders guter Eignung identifiziert. Diese sind in **Abbildung 57** dargestellt.

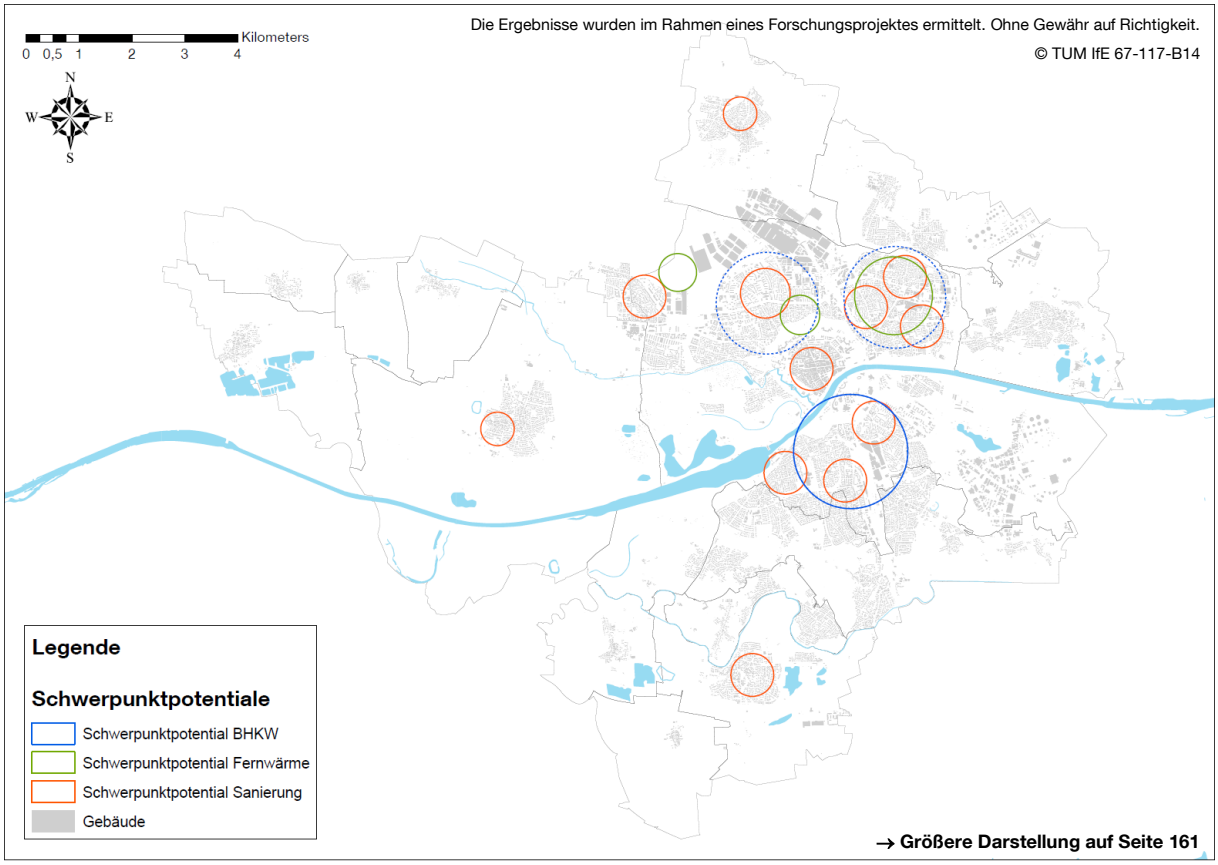



**Abbildung 57:** Vergleich der abgeleiteten Schwerpunktpotentiale aus Konzepten [2]

Fernwärmepotentiale ergeben sich in unmittelbarer Umgebung der bereits existierenden Fernwärmegebiete in Vierteln und Nachbarschaften mit einem besonders hohen langfristigen Wärmebedarf und relativ altem Gebäudebestand. Zusätzlich wird im Nordosten ein Neubaugebiet mit Fernwärmeanschluss als Potentialgebiet gekennzeichnet (Kapitel 7.2).

Die Stadtteile Nordost und Nordwest sind auch für Klein-BHKW-Anlagen besonders interessant. Vor allem Gebäude mit hohen Wärmebedarfen, auch nach Sanierung, eignen sich im Allgemeinen zur Nutzung derartiger Anlagen. Zusätzlich besteht südlich der Donau ein hohes Potential (Kapitel 7.3). Da jedoch Überschneidungen der Schwerpunktpotentiale für Fernwärme und BHKW-Anlagen festzustellen sind (v. a. nördlich der Donau) und grundsätz-

lich in Fernwärmevorranggebieten ein Rückbau von Gasleitungen denkbar ist, ist in diesen Regionen eine entsprechende Prüfung der Optionen durchzuführen.

Auch Sanierung trägt in oben genannten Gebieten besonders zur Reduzierung der heizungsbedingten $CO_2$-Emissionen bei. Darüber hinaus werden auf der Karte weitere Gebiete mit mittlerem bis hohem Potential hervorgehoben, dass insbesondere durch eine hohe Bebauungsdichte und älterem Gebäudebestand zustande kommt (Kapitel 7.1).

Auffällig ist die Überschneidung von Potentialgebieten insbesondere in den Stadtteilen Nordwest, Nordost und Münchner Straße. Werden verschiedene Maßnahmen gleichzeitig durchgeführt, kann es zu unerwünschten Wechselwirkungen zwischen diesen kommen. Beispielsweise hätte eine Sanierung einen negativen Effekt auf den Fernwärmeabsatz und die Klein-BHKW-Eignung. Ebenso konkurrieren Klein-BHKW-Anlagen und Fernwärme um attraktive Kunden (Gasrückbau). Um erhöhte Netzkosten und Fehlinvestitionen zu vermeiden, ist es wichtig, Maßnahmen auf diesen Gebieten spartenübergreifend zu koordinieren. Nur so kann eine gesamtwirtschaftlich nachhaltige und wirtschaftliche Versorgung erreicht werden.

Potentialgebiete für Wärmepumpen sind in obiger Karte nicht visualisiert. Wärmepumpen, die sich insbesondere für Ein- und Zweifamilienhäuser mit niedrigem spezifischen Wärmebedarf eignen, treten jedoch nicht direkt in Konkurrenz zu den anderen Maßnahmen. Insbesondere in ländlichen Gebieten führen Technologien, die Strom in Wärme umwandeln, jedoch zu einem erheblich steigenden Strombedarf.

Die ermittelten Schwerpunktpotentiale und Ergebnisse beruhen auf Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Um ein Gesamtkonzept für die Stadt Ingolstadt zu entwerfen, sind in einem weiteren Schritt zwingend weitere detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen einzelner Teilkonzepte notwendig.

# 8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die vorgelegte Studie zeigt die Wichtigkeit der Energieplanung für die Stadtplanung auf. Ist-Zustand und Potentiale werden analysiert, der Einfluss von Maßnahmen und Konzepten wird aufgezeigt und Pilotprojekte werden definiert, um den Energienutzungsplan in konkrete Maßnahmen zu überführen.

Darüber hinaus soll der ENP in die Energieplanung und Flächenplanung der Stadt Ingolstadt einfließen, um Sanierungsmaßnahmen, den Ausbau von erneuerbaren Energien und die Integration von hocheffizienten Systemen zu koordinieren. Der Energienutzungsplan stellt hierbei einen Konzeptrahmen dar, auf Basis dessen Stadtplaner, Stadtwerke und die Politik weitere Maßnahmen ableiten können, um die Energiewende in Ingolstadt voran zu bringen.

Im Folgenden sind zusammenfassend die Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen aus dem Energienutzungsplan thematisch aufgeführt:

**Wind**

Nach Analyse des Windpotentials in Ingolstadt zeigt die in Kapitel 5.1 dargestellte Methodik, dass unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen, politischen und umweltrechtlichen Rahmenbedingungen keine geeigneten Flächen für Großwindanlagen vorhanden sind. Eine Eignung für Kleinwindanlagen kann nicht ausgeschlossen werden und ist ggf. im Einzelfall zu prüfen.

**Biomasse**

In Kapitel 5.2 wird ein maximales Biomassepotential von 200 GWh/a ermittelt. Dieses ist verglichen mit der Energienachfrage relativ gering. Zusätzlich wird in Kapitel 7.6 ein Potential von 50 GWh/a durch die Nutzung von Kurzumtriebsplantagen ermittelt. Hier ist die verwendete Methodik für die Eignung bestimmter Flächen und Gebiete zu beachten. Diese kann in Planungen zur künftigen Flächennutzung integriert werden.

**Wasser**

Wie in Kapitel 5.3 dargestellt, ist das Wasserkraftpotential fast vollständig ausgeschöpft. Werden die Punkte Neubau von Anlagen und Modernisierung bzw. Wirkungsgraderhöhung

von bestehenden Anlagen in Ingolstadt außer Acht gelassen, können noch 7 % Potentialerhöhung durch einen verbesserten Ausbaugrad und einer kurzfristigen Stauzielerhöhung erreicht werden. Dies entspricht rund 9 GWh/a zusätzlicher Stromerzeugung. Die Anwendbarkeit dieser Maßnahmen ist zu prüfen.

**Geothermie und Wärmepumpen**

Anlagen zur Tiefengeothermie sind derzeit in Ingolstadt nicht in Betrieb. Die geologischen Voraussetzungen hierfür sind nicht gegeben.

Voraussichtlich mögliche Flächen zur Nutzung von Wärmesonden sind in Ingolstadt nicht vorzufinden. Im Großteil des Stadtgebietes sind Flächen vorhanden, die eine Nutzung von Erdwärmesonden voraussichtlich nicht möglich machen. Vereinzelt kann in der Südstadt ein Einsatz nach Einzelfallprüfung empfehlenswert sein.

Grundsätzlich ist die Beschaffenheit des Untergrundes hinsichtlich der Durchlässigkeitsbeiwerte und Grundwassermächtigkeiten für die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen geeignet. Darüber hinaus sind die hydrochemischen Eigenschaften des Grundwassers zur Ermittlung der lokalen Eignung nötig.

Unter Berücksichtigung von Flächenkollektoren ergibt sich ein hohes Potential für Wärmepumpen im Stadtgebiet. Bei Neubauten von Ein- und Zweifamilienhäusern ist die Nutzung dieser Technologien zu untersuchen, insbesondere in Gebieten ohne Gasanschluss. Bei bestehenden Gebäuden sind Wärmepumpen ggf. erst nach sehr kostenaufwändigen Sanierungen wirtschaftlich. Auch hier ist der Einzelfall zu prüfen. Weitere Informationen hierzu sind in den Kapiteln 5.4 und 7.4 zu finden.

**Photovoltaik und Solarthermie**

Ingolstadt ist eine der führenden Städte Deutschlands, was die Stromerzeugung mittels Photovoltaik betrifft. Wie in Kapitel 6 gezeigt, ist auf Dachflächen noch ein hohes auszuschöpfendes Potential vorhanden. Um auch weiterhin Nutzungskonflikte zu vermeiden, sollte daher dieses Potential vorrangig genutzt werden. Zweitrangig sollten gegenüber Frei- und Ackerflächen Konversionsflächen oder Flächen entlang von Autobahnen bevorzugt werden. Das Potential auf Flächen entlang von Autobahnen wird in Kapitel 7.7 abgeschätzt. Über die Nutzung von Solarthermie können ohne Kenntnis des Einzelfalls keine pauschalen Aussagen getroffen werden.

**Fernwärme**

Fernwärme in Ingolstadt mit dem Primärenergiefaktor von Null stellt eine ausgezeichnete Möglichkeit dar, Emissionen im Stadtgebiet zu reduzieren. Neben Nachverdichtung des bestehenden Netzes ist bei Neubaugebieten und insbesondere Gebieten mit hoher Wärmenachfrage im Anschluss an existierende Fernwärmegebiete die Möglichkeit einer Fernwärmeversorgung zu prüfen. Durch Sanierungsmaßnahmen und Klein-BHKW-Anlagen können negative Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit und damit die Eignung von Fernwärmenetzen entstehen. Deshalb ist ein mit konkurrierenden Maßnahmen abgestimmtes Vorgehen nötig (Kapitel 7.2 und 7.9).

**Klein-BHKW-Anlagen und intelligente Versorgung**

Allein durch Klein-BHKW-Anlagen in größeren Wohngebäuden kann ein signifikantes Potential für Wärme- und Stromerzeugung realisiert werden. Wechselwirkungen mit Fernwärme und Sanierungsmaßnahmen sind bei der Ausweisung von Vorranggebieten zu berücksichtigen. Klein-BHKWs haben durch die kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme einen Anstieg der lokalen Emissionen zur Folge.

Das Zusammenschalten mehrerer Anlagen zu einem virtuellen Kraftwerk und die Kombination mit erneuerbaren Energien, Elektromobilität und Wärmepumpen oder BHKW-Anlagen haben positive Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit und stellen somit ein interessantes langfristiges Versorgungskonzept dar. Ein weiteres vielversprechendes Konzept stellt die Kopplung lokal erzeugter elektrischer Energie aus Photovoltaik mit dem Einsatz von Elektrofahrzeugen und Stromtankstellen dar (Kapitel 7.3, 7.5 und 7.9).

**Sanierung**

Energetische Sanierung im Zusammenspiel mit ohnehin geplanten Sanierungsmaßnahmen ermöglicht prinzipiell eine ökonomische Möglichkeit, Energie einzusparen und damit $CO_2$-Emissionen zu senken. Unterschiedlich starke Sanierungsmaßnahmen haben jedoch unterschiedliche Kosten und Einflüsse auf das Gesamtsystem der Wärmebereitstellung in Ingolstadt. In einem Pilotprojekt wird vorgeschlagen, diese Zusammenhänge genauer zu untersuchen, um eine gezieltere und kostenoptimale Sanierung im Hinblick auf das Gesamtsystem zu erreichen.

**Bilanz ECORegion/Klimabündnis**

Die $CO_2$- und Energiebilanz wurde mit ECORegion erstellt. Dieses Tool wird im Klimabündnis verwendet und gewährleistet eine gewisse Vergleichbarkeit zwischen den anwendenden Kommunen. Im Rahmen der Bearbeitung wurde festgestellt, dass ECORegion stark abhängig von den Eingangsdaten ist. Die Ergebnisse werden zudem stark von der gewählten Bilanzierungsmethodik beeinflusst. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden teils bewusst von ECORegion vorgegebene Werte verwendet. Wie von ECORegion vorgeschlagen, soll die Veröffentlichung der $CO_2$-Bilanz immer auf Grundlage einheitlicher Daten erfolgen, um über den Bilanzierungszeitraum eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Daher wird vorgeschlagen, die Bilanzierung auf Basis oben verwendeter Methodik auch für die Folgejahre fortzuführen.

**Integration des Energienutzungsplanes in die Flächennutzungsplanung und politische Entscheidungsfindung**

Ein Ziel der Erstellung eines Energienutzungsplanes für die Stadt Ingolstadt soll die Möglichkeit sein, Ergebnisse der Energieplanung in die Flächenplanung der Stadt zu integrieren. Dabei besteht die Möglichkeit, ausgewählte Karten und Ergebnisdarstellungen als zusätzliche Informationen (Layer) in den Flächennutzungsplan der Stadt einzuarbeiten. Geeignete Karten wie beispielsweise Karten zum Photovoltaik-Potential oder zu möglichen Sanierungsschwerpunkten können darüber hinaus als Fachplan oder Detailplan in die zukünftige Flächenplanung der Stadt einfließen.

Alle erarbeiten Ergebnisse (Potentiale, Analysen und Konzepte) können informell in die Flächenplanung aufgenommen werden. Ergebnisse aus dem Energienutzungsplan sollen zudem die Argumentation im Rahmen der Flächennutzung sowie die politische Entscheidungsfindung hinsichtlich der zukünftigen Energieversorgung in Ingolstadt unterstützen und versachlichen.

# 9 Zusammenfassung

Der Ausstieg aus der Kernenergie und die damit verbundene Energiewende führen zu neuen Herausforderungen bei der zukünftigen Ausrichtung der Energieversorgung in Bayern. Insbesondere die erneuerbaren Energien müssen zukünftig effizient ausgebaut und koordiniert und mit Energieeffizienzmaßnahmen in Einklang gebracht werden.

Ziel dieser Studie ist es, im Rahmen der Erarbeitung eines Energienutzungsplanes für die Stadt Ingolstadt Fragestellungen der Energieversorgung zu beantworten. Dazu zählen die Ermittlung der Potentiale erneuerbarer Energien, die Untersuchung von Möglichkeiten der Einsparung von Wärmeenergie sowie die Erstellung von ersten Energiekonzepten. Ein wesentliches Ergebnis soll darüber hinaus die Möglichkeit der Integration der Energieplanung in die Flächenplanung der Stadt Ingolstadt sein.

Im Rahmen der Studie wird zunächst eine energetische Bestandsanalyse durchgeführt. Diese berücksichtigt neben der Erzeugungsstruktur auf dem Ingolstädter Stadtgebiet auch die Verteilung der Energie in den Sparten Strom, Gas und Fernwärme. Die einzelnen Verteilnetzte werden beschrieben. Eine Abschätzung der Verbrauchsstruktur in den Sektoren Kommunale Liegenschaften, Haushalte, Industrie sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistung erfolgt ebenfalls. Zur Quantifizierung der energiebedingten $CO_2$-Emissionen in Ingolstadt kommt das vom Klimabündnis empfohlene Softwaretool ECORegion zum Einsatz. Unter Verwendung bundesdeutscher Durchschnittsdaten sowie Ingolstadt-spezifischer Informationen lässt sich der Ist-Zustand abbilden. Hinsichtlich der Emissionen ergibt sich ein typisches Bild einer industriegeprägten Stadt.

Um einen ersten Konzeptrahmen für die zukünftige Energieversorgung in Ingolstadt zu schaffen, bedarf es der Untersuchung der Potentiale der erneuerbaren Energien auf dem Stadtgebiet. Die Analyse erfolgt in den Bereichen Wind, Biomasse, Wasser, Geothermie und Photovoltaik/Solarthermie. Unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen, politischen und umweltrechtlichen Rahmenbedingungen sind keine geeigneten Flächen für Großwindanlagen in Ingolstadt vorhanden. Das durch die Nutzung von Biomasse erzielbare Potential ist gegenüber der Energienachfrage vergleichsweise gering. Das Wasserkraftpotential ist nahezu vollständig ausgeschöpft. Die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen ist in weiten Teilen des Stadtgebietes denkbar, während sich unter Berücksichtigung von Flächenkollektoren ein relativ hohes Potential für Wärmepumpen ergibt. Trotz der führenden Position In-

golstadts in der Solarbundesliga ist auf den Dachflächen der Ingolstädter Gebäude noch ein hohes auszuschöpfendes Potential vorhanden.

Aufbauend auf der Potentialermittlung der erneuerbaren Energien und der Bestimmung des Wärmebedarfs im Gebäudesektor ergeben sich erste verschiedene Konzepte für die zukünftige Energieversorgung Ingolstadts. Die Erarbeitung dieser Konzepte bzw. die Schwerpunktsetzung beruht auf Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. So kann zunächst über einen Ausbau der existierenden Fernwärme in Form von Nachverdichtung oder Prüfung der Fernwärmeversorgung in Neubaugebieten nachgedacht werden. Auch durch den Einsatz von Klein-BHKW-Anlagen in größeren Wohngebäuden oder die Nutzung von Wärmepumpen kann ein hohes Potential realisiert werden. Einen interessanten Ansatz stellt die Kopplung dezentraler Anlagen und Verbraucher (BHKW-Anlage, PV-Anlage, Wärmepumpe, Elektrofahrzeug) zu virtuellen Kraftwerken dar. Signifikante Einsparungen von Energie und $CO_2$ können ebenfalls durch energetische Sanierung ermöglicht werden.

Die zentralen Ergebnisse des Energienutzungsplans werden abschließend als Handlungsempfehlungen zusammengefasst um die Ergebnisse des Energienutzungsplans nachhaltig in die Stadt- und Energieplanung zu übernehmen. Darauf aufbauend können in einem nächsten Schritt konkrete energetische Maßnahmen für die Stadt Ingolstadt durchgeführt werden.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchungsregion Ingolstadt ..... 9

Abbildung 2: Tatsächliche Nutzung für Siedlung und Vegetation in Ingolstadt ..... 11

Abbildung 3: Bevölkerungsentwicklung in Ingolstadt ..... 12

Abbildung 4: Netzganglinie Strom für das Jahr 2013 ..... 17

Abbildung 5: Strommix im Versorgungsgebiet der Stadtwerke Ingolstadt ..... 18

Abbildung 6: Regenerative Versorgung von Ingolstädter Haushalten ..... 19

Abbildung 7: Versorgungsgebiet Gas ..... 20

Abbildung 8: Erdgaseinspeisung im Versorgungsgebiet ..... 20

Abbildung 9: Gasleitungen im Versorgungsgebiet Ingolstadt ..... 21

Abbildung 10: Fernwärme-Versorgungsgebiet der Stadtwerke Ingolstadt ..... 22

Abbildung 11: Fernwärmeleitungen im Versorgungsgebiet Ingolstadt ..... 23

Abbildung 12: Wärmebedarfsdeckung der kommunalen Liegenschaften ..... 24

Abbildung 13: Abgeschätzte Wärmebedarfsdeckung im Haushaltssektor ..... 26

Abbildung 14: Endenergieverbrauch nach Sektoren von 2008 bis 2012 ..... 30

Abbildung 15: Endenergieverbrauch nach Energieträgern von 2008 bis 2012 ..... 31

Abbildung 16: Endenergieverbrauch im Sektor Verkehr nach Energieträgern im Jahr 2012 32

Abbildung 17: Endenergieverbrauch im Sektor Verkehr nach Verkehrsträgern im Jahr 2012 ..... 32

Abbildung 18: $CO_2$-Emissionen nach Sektoren im Jahr 2012 ..... 33

Abbildung 19: $CO_2$-Emissionen nach Energieträgern von 2008 bis 2012 ..... 34

Abbildung 20: $CO_2$-Emissionen im Sektor Haushalte nach Energieträgern von 2008 bis 2012 ..... 34

Abbildung 21: $CO_2$-Emissionen im Sektor Verkehr nach Energieträgern im Jahr 2012 ..... 35

Abbildung 22: $CO_2$-Emissionen im Sektor Verkehr nach Verkehrsträgern im Jahr 2012 ..... 35

Abbildung 23: $CO_2$-Emissionen pro Einwohner nach Energieträgern ..... 36

Abbildung 24: $CO_2$-Emissionen nach Sektoren im Jahr 2012 ..... 37

Abbildung 25: $CO_2$-Emissionen nach Energieträgern von 2008 bis 2012 ..... 37

Abbildung 26: $CO_2$-Emissionen im Sektor Haushalte nach Energieträgern von 2008 bis 2012 ..... 38

Abbildung 27: $CO_2$-Emissionen im Sektor Verkehr nach Energieträgern im Jahr 2012 ..... 39

Abbildung 28: $CO_2$-Emissionen im Sektor Verkehr nach Verkehrsträgern im Jahr 2012 ..... 39

Abbildung 29: $CO_2$-Emissionen pro Einwohner nach Energieträgern ..... 40

Abbildung 30: Möglichkeiten der Nutzung eines Gebäudedatensatzes ..... 41

Abbildung 31: Klassifizierung der Ingolstädter Gebäude nach Baualtersklassen ..... 42

Abbildung 32: Spezifischer Wärmebedarf zur Berechnung des Wärmebedarfs vor und nach Sanierung ..... 43

Abbildung 33: Ermittelte Wärmebedarfsdichte im Ist-Zustand in Ingolstadt ..... 44

Abbildung 34: Gebietskulisse Windkraft für Ingolstadt ..... 48

Abbildung 35: Volllaststunden bei Enercon-Anlage E-82 ..... 49

Abbildung 36: Volllaststunden bei Enercon-Anlage E-82 ..... 50

Abbildung 37: Windenergieertrag bei Enercon-Anlage E-82 ..... 51

Abbildung 38: Abflusswerte der Donau am Messpunkt Luitpoldstraße ..... 58

Abbildung 39: Geothermisches Potential in Ingolstadt ..... 60

Abbildung 40: Günstige Gebiete für Erdwärmesonden in Ingolstadt ..... 61

Abbildung 41: Grundwasserdurchlässigkeiten in Ingolstadt ..... 62

Abbildung 42: Grundwassermächtigkeiten in Ingolstadt ..... 63

Abbildung 43: Theoretische Eignung für Wärmepumpen (Grundwasser) in Ingolstadt auf Basis von Durchlässigkeiten und Mächtigkeiten ..... 64

Abbildung 44: Einstrahlungsleistung und Modulflächen auf exemplarischem Gebiet ..... 66

Abbildung 45: Photovoltaikpotential: 200 m x 200 m Raster (Genauigkeitsstufe 2) ..... 68

Abbildung 46: Vorhandenes Sanierungspotential der Ingolstädter Gebäude ..... 71

Abbildung 47: Vorhandene Fernwärmegebiete in Ingolstadt ..... 73

Abbildung 48: Wärmebedarfsdichte nach Sanierung in Ingolstadt ..... 74

Abbildung 49: Eignung für Klein-BHKWs in Ingolstadt ..... 75

Abbildung 50: Eignung für Wärmepumpen (Kollektoren) in Ingolstadt ..... 77

Abbildung 51: Vorhandene PV-Anlagen in Ingolstadt ..... 79

Abbildung 52: e-Mobilie - Elektromobilität und Gebäudeintegration..... 81

Abbildung 53: Intelligente Ladestation InCharge ..... 82

Abbildung 54: Eignung von Acker- und Dauergrünlandflächen für Kurzumtriebsplantagen . 84

Abbildung 55: Untersuchungsraum nach Abzug aller Ausschlussflächen..... 87

Abbildung 56: Mögliche Standorte zur Nutzung von Abwasserwärme in Ingolstadt ..... 88

Abbildung 57: Vergleich der abgeleiteten Schwerpunktpotentiale aus Konzepten ..... 89

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Flächenverteilung in Ingolstadt ..... 10

Tabelle 2: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in Ingolstadt ..... 13

Tabelle 3: BHKWs in Ingolstadt ..... 16

Tabelle 4: Wärmebedarfsdeckung der kommunalen Liegenschaften ..... 25

Tabelle 5: Abgeschätzte Wärmebedarfsdeckung im Haushaltssektor ..... 26

Tabelle 6: Viehbestand 2010 in Ingolstadt ..... 53

Tabelle 7: Gasausbeute verschiedener tierischer Substrate ..... 53

Tabelle 8: Tierisches Biomassepotential in Ingolstadt ..... 54

Tabelle 9: Bodennutzung in Ingolstadt ..... 54

Tabelle 10: Gasausbeute verschiedener pflanzlicher Substrate ..... 55

Tabelle 11: Biomassepotential auf landwirtschaftlich genutzten Flächen ..... 55

Tabelle 12: Energieerträge durch Kurzumtriebsbewirtschaftung in Ingolstadt ..... 85

# Literaturverzeichnis

[1] OpenStreetMap: **Kartenausschnitt für das Stadtgebiet Ingolstadt**, http://www.openstreetmap.org, http://www.creativecommons.org, 2014

[2] Landesamt für Vermessung und Geoinformation: **Datenbereitstellung im Rahmen der Erstellung des Energienutzungsplans Ingolstadt**, München 2012

[3] Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung: **Statistik kommunal 2012 – Eine Auswahl wichtiger statistischer Daten für die Kreisfreie Stadt Ingolstadt**, München 2012

[4] Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung: **Genesis Online-Datenbank**, https://www.statistikdaten.bayern.de, München 2014

[5] Bundesnetzagentur: **Kraftwerksliste Bundesnetzagentur (bundesweit; alle Netz- und Umspannebenen)**, http://www.bundesnetzagentur.de, Bonn 2014

[6] Stadt Ingolstadt: **Rechnerisch mögliche Versorgung von Haushalten mit im Stadtgebiet regenerativ erzeugter Energie**, http://www.ingolstadt.de, Ingolstadt 2012

[7] Stadt Ingolstadt, Referat für Soziales, Umwelt und Gesundheit: **Vortragsfolien „Energiewende in Ingolstadt – Ein Überblick über den Stand der Umsetzung der Energiewende in Ingolstadt“**, Ingolstadt 2012

[8] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit: **Energie-Atlas Bayern 2.0**, http://www.energieatlas.bayern.de, München 2014

[9] Stadtwerke Ingolstadt: **Übersicht über die EEG-Einspeisung 2012**, http://www.swi-netze.de, Ingolstadt 2012

[10] Solarbundesliga: **Kategorie Großstädte**, http://www.solarbundesliga.de, Bad Oeynhausen 2014

[11] Nöther, Andreas: **Kraftwerksdaten Ingolstadt**, http://www.kraftwerke-online.de, Berlin 2013

[12] Stadtwerke Ingolstadt: **Datenbereitstellung im Rahmen der Erstellung des Energienutzungsplanes Ingolstadt**, Ingolstadt 2012-2014

[13] Zweckverband Müllverwertungsanlage Ingolstadt: **Die Entsorgungssituation im Zweckverbandsgebiet im Jahre 2011**, Jahresbericht 2011, Ingolstadt 2012

[14] Stadtwerke Ingolstadt: **Fernwärmeverbundprojekt**, http://www.swi-netze.de, Ingolstadt 2014

[15] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V.: **EnergyMap Ingolstadt**, http://www.energymap.info, Berlin 2012

[16] Stadtwerke Ingolstadt: **Netzbeschreibung - Strom**, http://www.swi-netze.de, Ingolstadt 2014

[17] Stadtwerke Ingolstadt: **Strukturdaten Strom (StromNEV, StromNZV)**, http://www.swi-netze.de, Ingolstadt 2013

[18] Stadtwerke Ingolstadt: **Netzganglinie Strom 2013**, http://www.swi-netze.de, Ingolstadt 2013

[19] Stadtwerke Ingolstadt: **Was steckt in Ihrem Strom? Ein Informationsblatt zu Ihrem Strommix**, http://www.sw-i.de, Ingolstadt 2013

[20] Stadt Ingolstadt, Beteiligungsmanagement: **Beteiligungsbericht 2011**, Ingolstadt 2011

[21] Stadt Ingolstadt, Beteiligungsmanagement: **Beteiligungsbericht 2013**, Ingolstadt 2013

[22] Stadtwerke Ingolstadt: **Beschreibung Netzgebiet SWI - Gasnetz**, http://www.swi-netze.de, Ingolstadt 2014

[23] Stadtwerke Ingolstadt: **Erdgasnetz: Strukturdaten und technische Daten für 2013**, http://www.swi-netze.de, Ingolstadt 2013

[24] Stadtwerke Ingolstadt: **Grafik Netzgebiet Gas**, http://www.swi-netze.de, Ingolstadt 2012

[25] Stadtwerke Ingolstadt: **Erdgaseinspeisung 2013**, http://www.swi-netze.de, Ingolstadt 2013

[26] Stadtwerke Ingolstadt: **Grafik Fernwärme-Versorgungsgebiet der Stadtwerke Ingolstadt**, http://www.swi-netze.de, Ingolstadt 2012

[27] Audi AG: **Umwelterklärung 2013 für den Audi Standort Ingolstadt**, Ingolstadt 2012

[28] Stadt Ingolstadt, Referat für Hoch- und Tiefbau, Amt für Gebäudemanagement: **Energiebericht 2011: Heizenergie – Strom – Wasser**, Ingolstadt 2011

[29] Stadt Ingolstadt: **Statistisches Jahrbuch 2014 – Statistiken nach Themenbereichen**, Ingolstadt 2014

[30] Wiesmeth, Michael: **Analyse und Modellierung des Potentials regenerativer Energien im Stadtgebiet von Ingolstadt**, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, München 2012

[31] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.: **Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland**, http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Energiedaten, Berlin 2014

[32] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern: **Leitfaden Energienutzungsplan**, München 2011

[33] ECOSPEED AG: **ECORegion – Bilanzierungsmethodik**, Zürich 2009

[34] ECOSPEED AG: **Ergebnisse der $CO_2$-Bilanzierung aus dem Softwaretool ECORegion**, Zürich 2014

[35] Stadt Ingolstadt: **Datenbereitstellung im Rahmen der Erstellung des Energienutzungsplanes Ingolstadt**, Ingolstadt 2013

[36] Institut Wohnen und Umwelt, **Deutsche Gebäudetypologie - Systematik und Datensätze**, Darmstadt 2005

[37] Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München: **Nutzung regenerativer Energien**, E&M Energie und Management Verlagsgesellschaft mbH, Herrsching 2010

[38] Deutscher Wetterdienst: **Wind Weibull-Parameter 80 m**, Offenbach 2012

[39] Bundesverband WindEnergie e. V.: **Wirtschaftlichkeit und Vergütung von Kleinwindenergieanlagen**, Berlin 2010

[40] Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans; Hofbauer, Hermann: **Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren**, Springer, Heidelberg 2009

[41] Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: **Gesamtkonzept Nachwachsende Rohstoffe in Bayern – Entwicklungen und Trends 2009**, München 2009

[42] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: **Faustzahlen Biogas**, http://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen/, Gülzow-Prüzen 2014

[43] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft: **Faustzahlen für die Landwirtschaft**, Darmstadt 2009

[44] Städtisches Forstamt Ingolstadt: **Datenbereitstellung im Rahmen der Erstellung des Energienutzungsplanes Ingolstadt**, Stammham 2012

[45] Bayerischer Waldbesitzerverband e. V.: **Der bayerische Waldbrief – Energie aus Holz**, München 2006

[46] Umweltamt Ingolstadt: **Datenbereitstellung im Rahmen der Erstellung des Energienutzungsplanes Ingolstadt**, Ingolstadt 2012-2014

[47] Schleiss, Konrad; Fuchs, Jacques: **Energie aus Grüngut: Grundsätzliche Überlegungen, Grundlagen und Kennzahlen, Vergleich Endprodukte**, educompost-ERFA-Tag 2006, Grenchen, Schweiz 2006

[48] Kehres, Bertram: **Weichenstellung für die Verwertung von Bioabfällen**, H&K aktuell, Köln-Gremberghoven 2009

[49] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit: **Bayerische Strategie zur Wasserkraft – 10-Punkte-Fahrplan für eine ökologische und naturverträgliche Wasserkraftnutzung**, München 2012

[50] Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hochwassernachrichtendienst: **Pegel im Donaugebiet: Ingolstadt Luitpoldstraße / Donau**, www.hnd.bayern.de, Augsburg 2012

[51] E.ON Wasserkraft GmbH, Bayerische Elektrizitätswerke GmbH: **Potenzialstudie „Ausbaupotentiale Wasserkraft in Bayern" – Bericht aus Sicht der beiden großen Betreiber von Wasserkraftanlagen in Bayern**, Landshut/Augsburg 2009

[52] Ingolstädter Kommunalbetriebe: **Datenbereitstellung im Rahmen der Erstellung des Energienutzungsplanes Ingolstadt**, Ingolstadt 2013

[53] Fachzentrum Land- und Ernährungswirtschaft: **DLG-Merkblatt 371: Kurzumtriebsplantagen – Anlage, Pflege, Ernte und Wertschöpfung**, Frankfurt/Main 2012

[54] Aust, Cisco: **Abschätzung der nationalen und regionalen Biomassepotentiale von Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland**, Dissertation, Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg., Freiburg im Breisgau 2012

[55] Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Ingolstadt: **Datenbereitstellung im Rahmen der Erstellung des Energienutzungsplanes Ingolstadt**, Ingolstadt 2014

[56] Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur: **Leitfaden: Photovoltaik-Projekte an Bundesautobahnen in Thüringen**, Gera/Jena 2011

[57] Ong, Sean; Campbell, Clinton; Denholm, Paul; Margolis, Robert; Heath, Garvin: **Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States**, NREL Technical Report, Denver, USA 2013

[58] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V., Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Arbeitsgemeinschaft für sparsame Energie- und Wasserverwendung (ASEW) GbR im Verband kommunaler Unternehmen, Institut für Energie und Infrastrukturfragen: **Heizen und Kühlen mit Abwasser**, München/Osnabrück/Köln/Zürich 2010

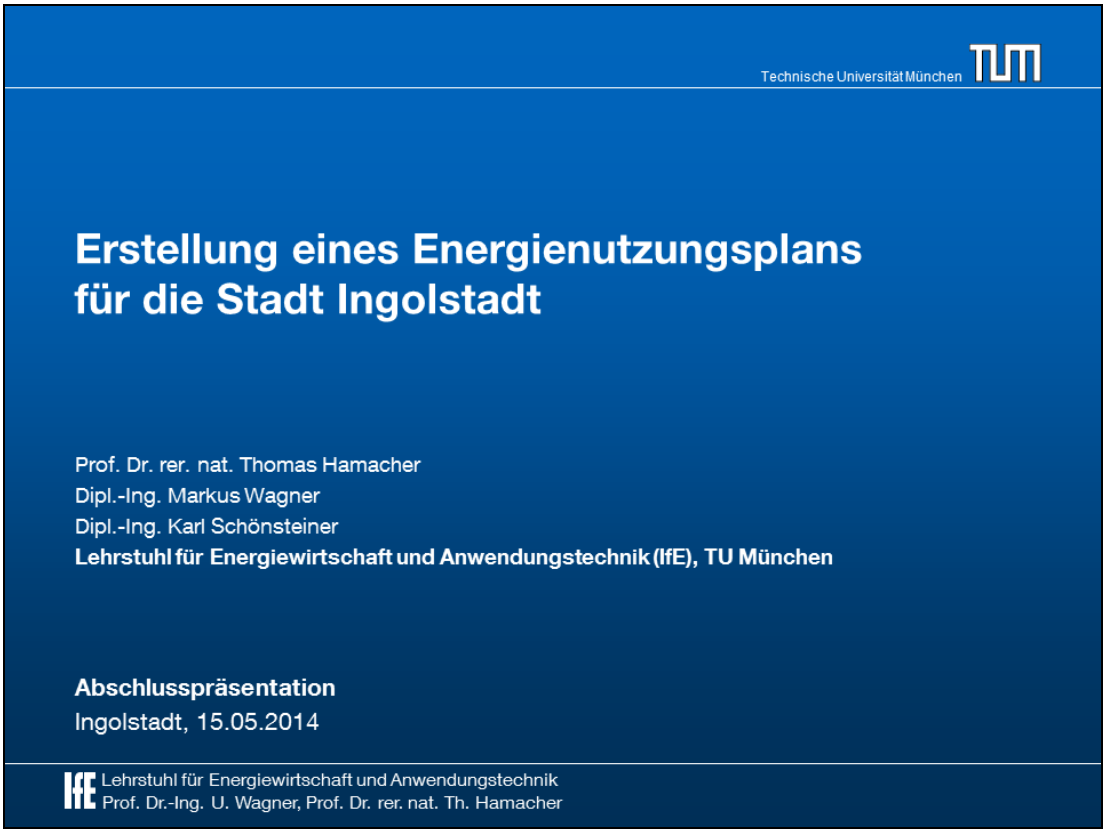
[59] Bundesverband der deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V.: **Ausgewählte Klimaschutzpotenziale der Abwasserwirtschaft**, Darmstadt/Heidelberg/Berlin 2010

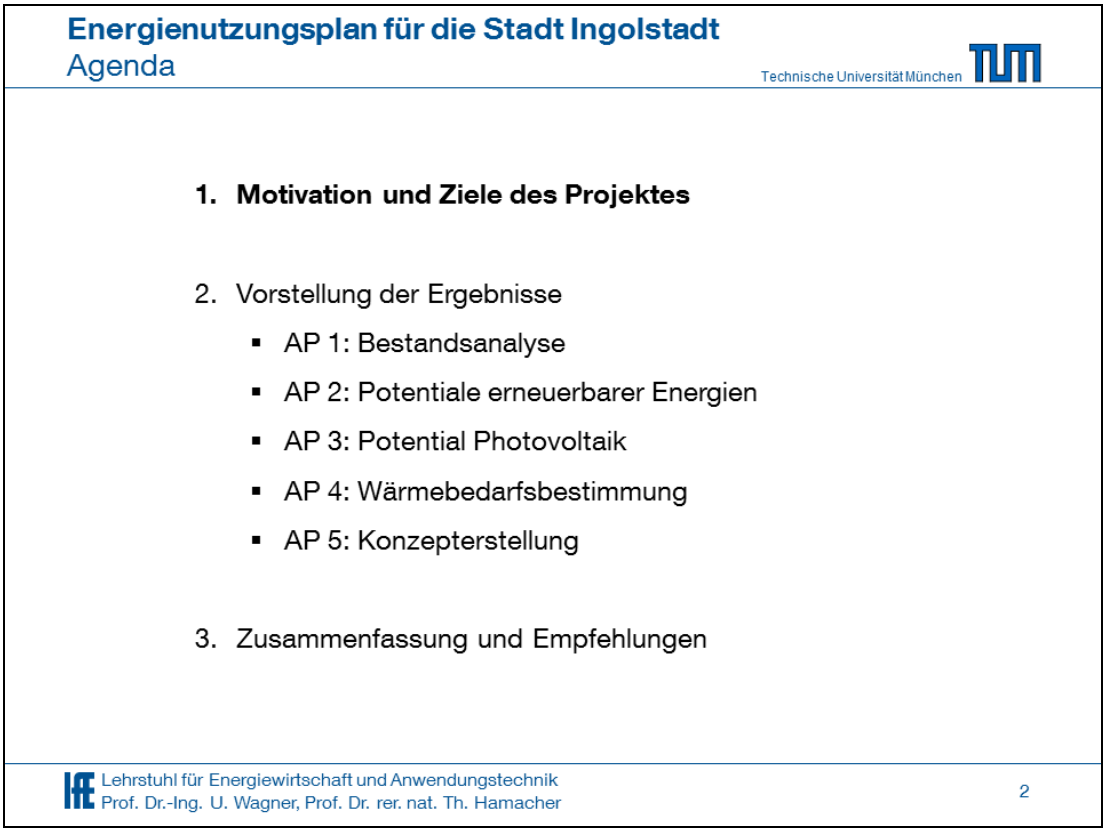
## Autoren

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München

- Dipl.-Ing. Markus Wagner
  Wissenschaftlicher Mitarbeiter, markus.wagner@tum.de
- Dipl.-Ing. Karl Schönsteiner
  Wissenschaftlicher Mitarbeiter, karl.schoensteiner@tum.de
- Dipl.-Ing. Tobias Eder
  Wissenschaftlicher Mitarbeiter, t.eder@tum.de
- Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher
  Komm. Leiter, thomas.hamacher@tum.de

# Anhang A: Abschlusspräsentation



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Motivation und Ziele des Projektes

Technische Universität München

**Motivation**

- Ausstieg aus der Kernenergie / Energiewende
- Schneller Ausbau von erneuerbaren Energien als wichtiger Baustein der Energiewende
- Notwendigkeit des Zusammenspiels von Energieeffizienzmaßnahmen mit dem Ausbau von erneuerbaren Energien

➔ Notwendigkeit einer koordinierten regionalen Energieplanung

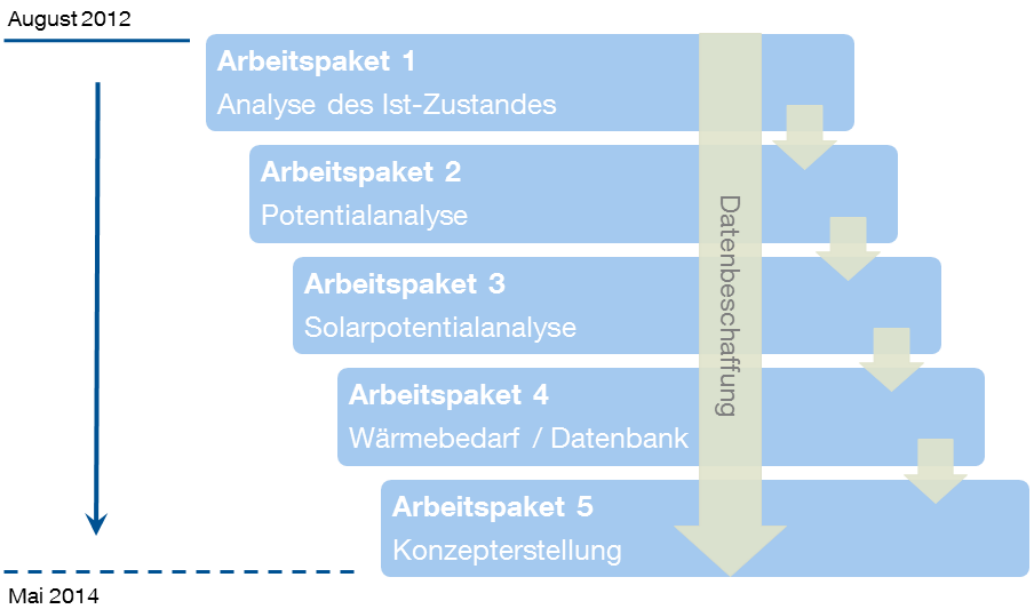
**Zielsetzung**

- Erstellung eines Energienutzungsplans für die Stadt Ingolstadt
- Verknüpfung komplexer Fragestellungen zum Thema Energie
  - Ermittlung der Potentiale erneuerbarer Energien
  - Untersuchung von Möglichkeiten der Einsparung von Wärmeenergie
  - Erstellung von Energiekonzepten
  - Ableitung von Handlungsempfehlungen für Ingolstadt



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Zeitlicher Ablauf

Technische Universität München



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
Arbeitspakete

Technische Universität München

### Arbeitspaket 1: Analyse des Ist-Zustandes, Energie- und $CO_2$-Bilanz

- Analyse des Ist-Zustandes, Aufbau einer Energie- und $CO_2$-Bilanz
- Aufbau einer einfachen Energiebilanz, aufgelöst nach Energieträgern und Verbrauchssektoren
- Erarbeitung einer $CO_2$-Bilanz

### Arbeitspaket 2: Potentialanalyse der erneuerbaren Energien

- Wind: Analyse aufbauend auf dem Bayerischen Windatlas und der Gebietskulisse der Landesregierung
- Biomasse: Untersuchung landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich genutzter Flächen, von biogenem Hausmüll und Grünschnitt
- Wasser: Analyse der Donaustaustufen in Ingolstadt, Diskussion des Repowering, Untersuchung der Kleinwasserkraftnutzung
- Geothermie: Analyse aufbauend auf dem Bayerischen Geothermieatlas, Untersuchung der Grundwasserverhältnisse in Ingolstadt



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
Arbeitspakete

Technische Universität München

### Arbeitspaket 3: Analyse des Solarpotentials auf Basis von Gebäudedaten

- Analyse des PV-Potentials aufbauend auf Laserscanningdaten oder anderen in der Stadt verfügbaren Quellen
- Berücksichtigung von Dachflächen, Dachneigungen und Ausrichtungen und in einer einfachen Weise auch Abschattungen
- Getrennte Ausweisung der Potentiale für Photovoltaik und Solarthermie

### Arbeitspaket 4: Aufbau einer Gebäudedatenbank zur Wärmebedarfsanalyse

- Aufbau einer Gebäudedatenbank ausgehend vom geometrischen Gebäudemodell
- Erfassung von Gebäudealter, Typ und Sanierungszustand
- Wärmekarten der Stadt als Grundlage für weitere Wärmenetzplanungen und Sanierungsplanungen

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
Arbeitspakete

Technische Universität München

**Arbeitspaket 5: Erstellung eines ersten Konzeptes**

- Skizzierung von Konzepten unter Einbeziehung der Stadt
- Einteilung der Stadt in Vorzugsgebiete für Heiztechnologien und Sanierungsmaßnahmen
- Definition von Pilotprojekten



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
Agenda

Technische Universität München

1. Motivation und Ziele des Projektes

2. **Vorstellung der Ergebnisse**
   - **AP 1: Bestandsanalyse**
   - AP 2: Potentiale erneuerbarer Energien
   - AP 3: Potential Photovoltaik
   - AP 4: Wärmebedarfsbestimmung
   - AP 5: Konzepterstellung

3. Zusammenfassung und Empfehlungen

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Energetische Bestandsaufnahme in Ingolstadt

**Analyse und Abschätzung der**

- Erzeugungsstruktur auf dem Stadtgebiet
- Verteilungsstruktur in den Sparten Strom, Gas und Fernwärme
- Verbrauchsstruktur für kommunale Liegenschaften, Haushalte, Industrie und GHD

**Energie- und $CO_2$-Bilanz auf Basis von ECORegion**

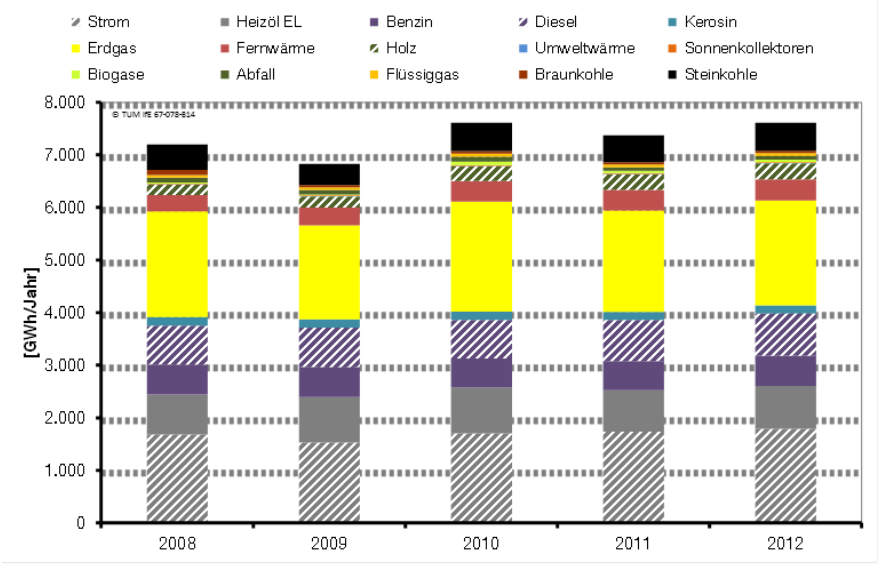
- Anwendung unterschiedlicher Methodiken (Endenergieverbrauch, Life Cycle Assessment)
- Ermittlung der Bilanz für die Jahre 2008 bis 2012
- Verwendung sowohl Ingolstadt-spezifischer als auch bundesdeutscher Daten



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

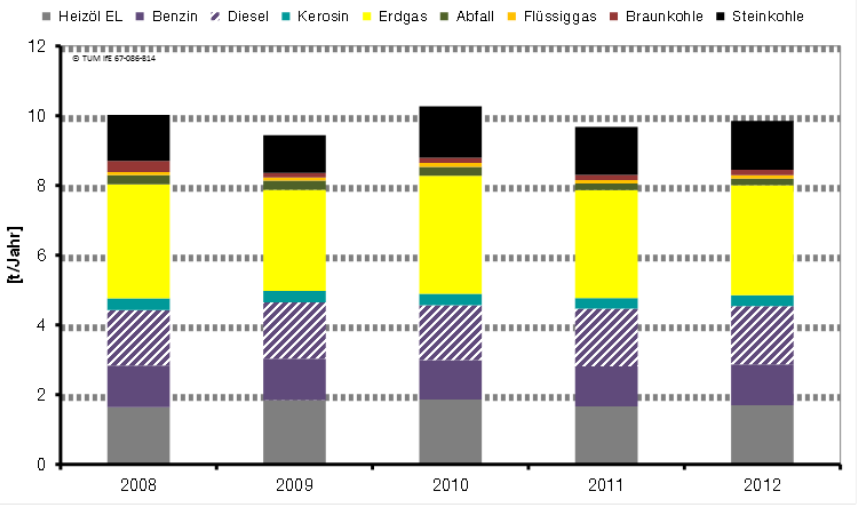
Endenergieverbrauch nach Energieträgern von 2008 bis 2012



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

$CO_2$-Emissionen pro Einwohner nach Energieträgern (IPCC)

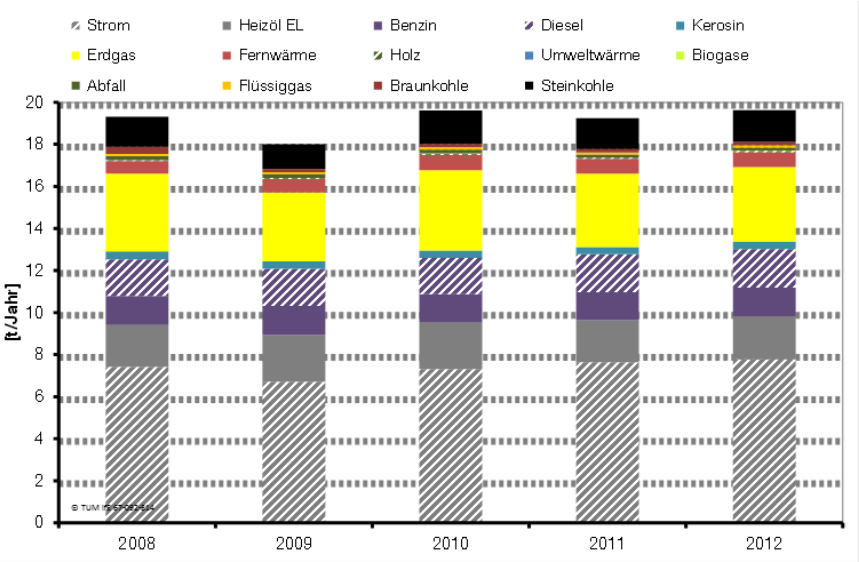





## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

$CO_2$-Emissionen pro Einwohner nach Energieträgern (LCA)



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Agenda

Technische Universität München

1. Motivation und Ziele des Projektes

2. **Vorstellung der Ergebnisse**
   - AP 1: Bestandsanalyse
   - **AP 2: Potentiale erneuerbarer Energien**
   - AP 3: Potential Photovoltaik
   - AP 4: Wärmebedarfsbestimmung
   - AP 5: Konzepterstellung

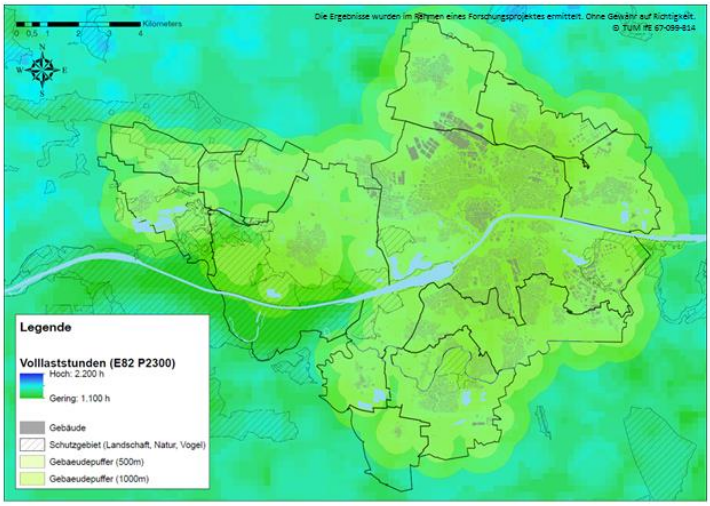
3. Zusammenfassung und Empfehlungen



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Wind

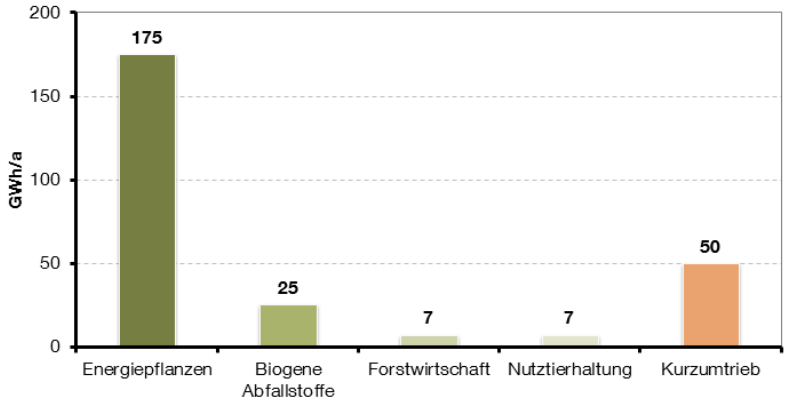



- Bewertung verfügbarer Flächen unter Anwendung verschiedener Gebäudeabstände
- Keine Eignung für Großwindanlagen unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Situation

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Biomasse



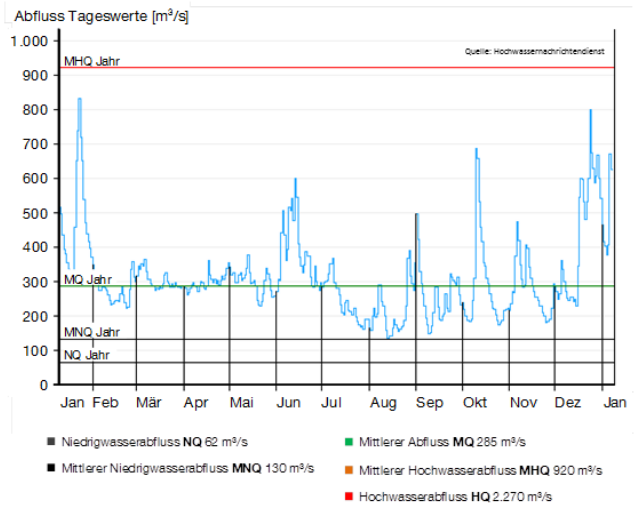

- Analyse des land- und forstwirtschaftlichen Potentials (Konzept: Kurzumtriebsplantagen)
- Geringes Potential im Vergleich zur Energienachfrage



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Wasser

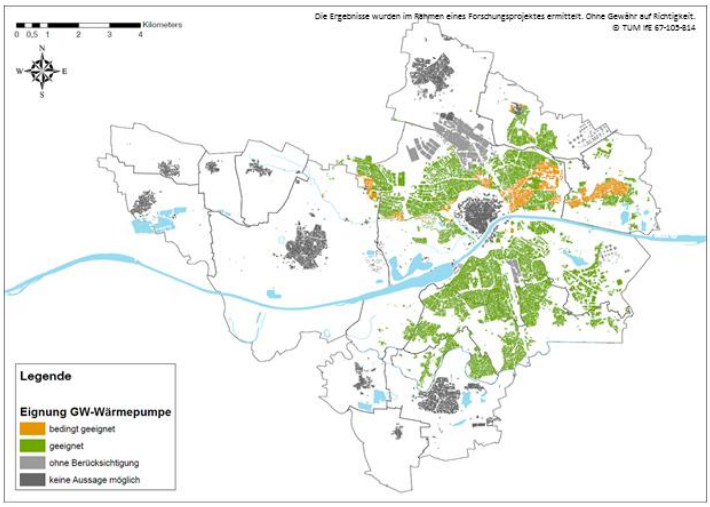



- Untersuchung verschiedener Maßnahmen zur Potentialerhöhung bei Wasserkraftwerken
- Potential ausgeschöpft, Erhöhung durch verbesserten Ausbaugrad und Stauzielerhöhung

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Geothermie




- Analyse der Eignung für Wärmepumpen auf Basis von Durchlässigkeiten und Mächtigkeiten
- Einzelfallprüfung bezüglich hydrochemischer Eigenschaften des Grundwassers



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
Agenda

Technische Universität München

1. Motivation und Ziele des Projektes

2. **Vorstellung der Ergebnisse**
   - AP 1: Bestandsanalyse
   - AP 2: Potentiale erneuerbarer Energien
   - **AP 3: Potential Photovoltaik**
   - AP 4: Wärmebedarfsbestimmung
   - AP 5: Konzepterstellung

3. Zusammenfassung und Empfehlungen

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Unterscheidung nach drei Genauigkeitsstufen

**Genauigkeitsstufe 1**

- Abschätzung der nutzbaren Dachfläche auf Basis von Gebäudegrundrissen
- Ermittlung von Peak-Leistung und Energie

**Genauigkeitsstufe 2**

- Berücksichtigung von Dachflächen, Dachneigung, Ausrichtung und Verschattung
- Ermittlung von Peak-Leistung und Energie

**Genauigkeitsstufe 3**

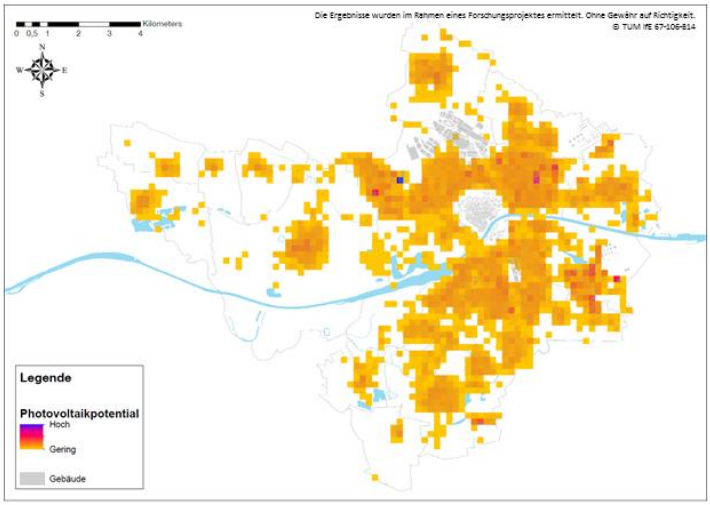
- Anwendung neuer Methodiken auf Basis von 3D-Modell und Laserscanningdaten
- Ermittlung exakter Einstrahlungsleistungen auf Dachflächen abhängig von Sonnenstand
- Identifizierung von möglichen Modulflächen durch Clusteralgorithmus



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Genauigkeitsstufe 1

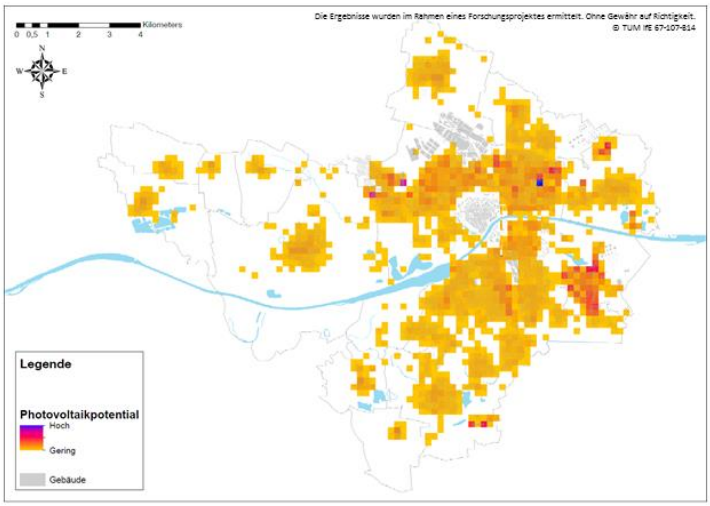



- Potential 100 % Photovoltaik-Szenario: 154 GWh/a
- Hohes Potential in Gebieten mit hoher Gebäudedichte und hoher Gesamtdachfläche

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Genauigkeitsstufe 2



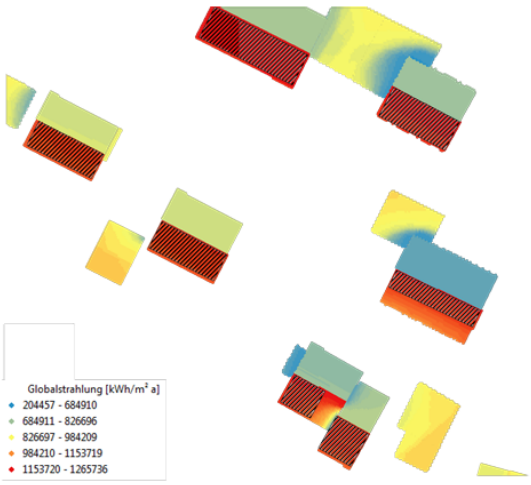

- 100 % Photovoltaik-Szenario unter Berücksichtigung von Verschattung: 170 GWh/a
- Hohes Potential in Gebieten mit hoher Gebäudedichte und hoher Gesamtdachfläche



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Genauigkeitsstufe 3



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Agenda

Technische Universität München

1. Motivation und Ziele des Projektes

2. **Vorstellung der Ergebnisse**
   - AP 1: Bestandsanalyse
   - AP 2: Potentiale erneuerbarer Energien
   - AP 3: Potential Photovoltaik
   - **AP 4: Wärmebedarfsbestimmung**
   - AP 5: Konzepterstellung

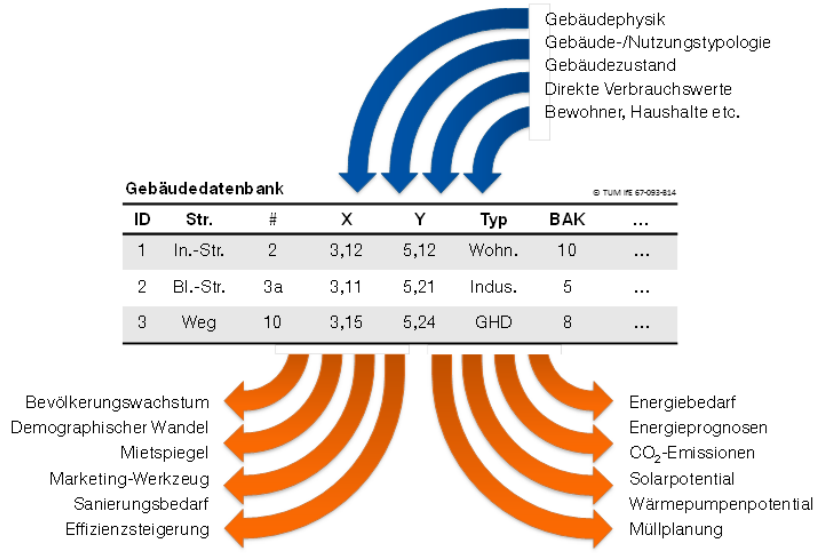
3. Zusammenfassung und Empfehlungen



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

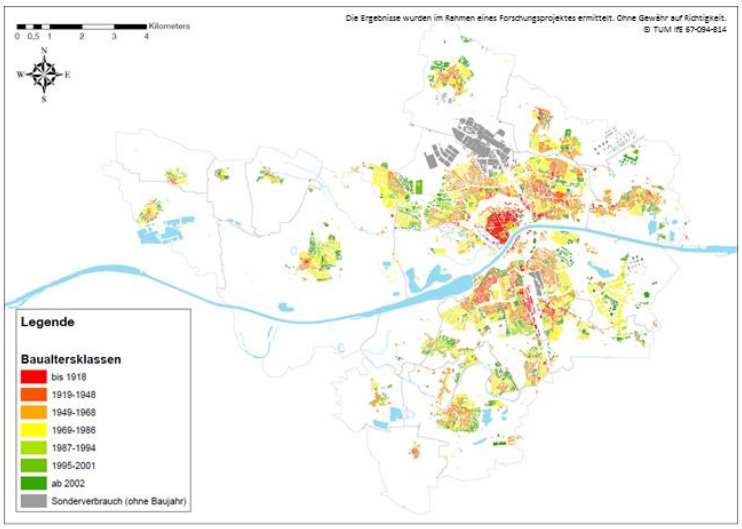
Möglichkeiten der Nutzung eines Gebäudedatensatzes



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Basis Baualter und Nutzung

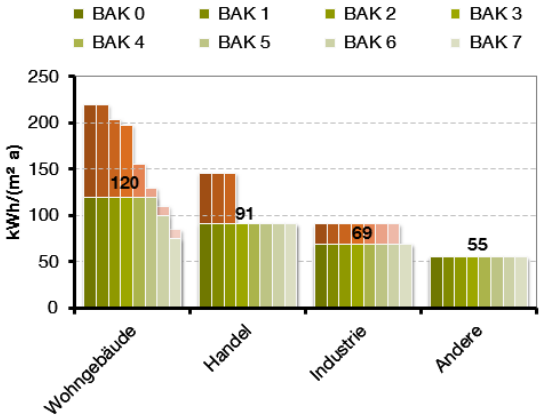


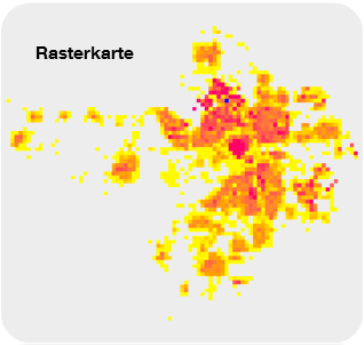



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Ermittlung Wärmebedarf



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

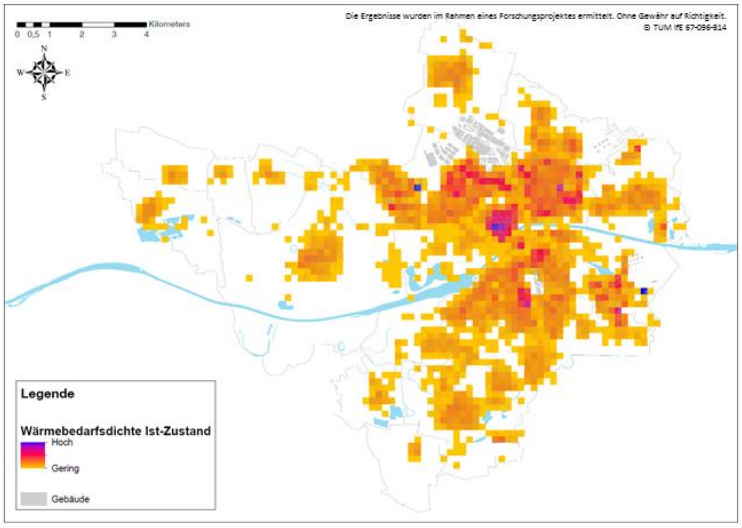
Ermittlung Sanierungspotential

Ermittlung des Sanierungspotentials von Gebäuden durch Vergleich des Wärmebedarfs für unsanierte und vollsanierte Gebäude

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Resultierende Wärmebedarfsdichte



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Agenda

Technische Universität München

1. Motivation und Ziele des Projektes

2. **Vorstellung der Ergebnisse**
   - AP 1: Bestandsanalyse
   - AP 2: Potentiale erneuerbarer Energien
   - AP 3: Potential Photovoltaik
   - AP 4: Wärmebedarfsbestimmung
   - **AP 5: Konzepterstellung**

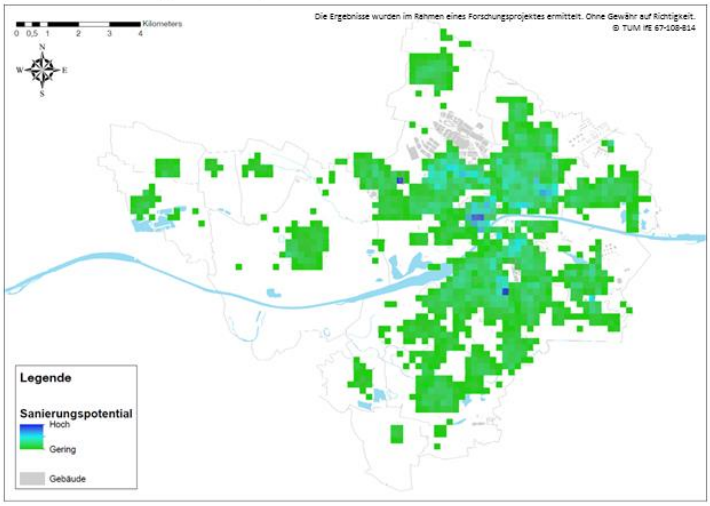
3. Zusammenfassung und Empfehlungen



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Identifizierung von Sanierungsschwerpunkten

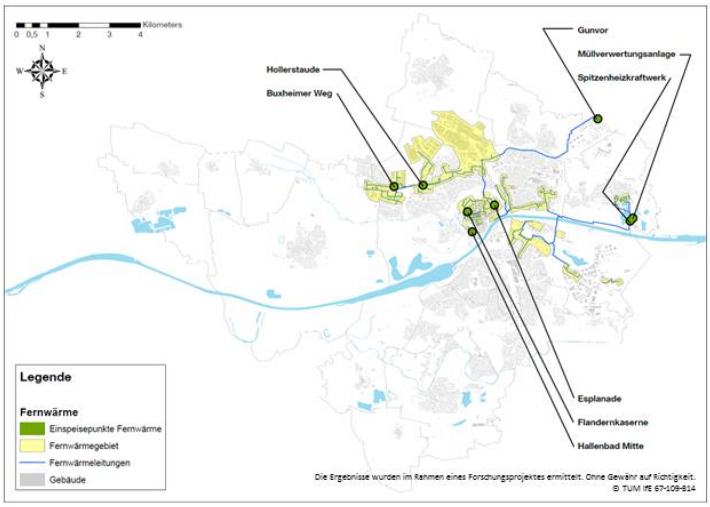



- Ermitteltes maximales Sanierungspotential im Untersuchungsgebiet: 400 GWh
- $CO_2$-Einsparung bei vollständiger Ausnutzung: 110 kt
- Hohes Potential in Gebieten mit hoher Bebauungsdichte und älterem Gebäudebestand
- Definition Pilotprojekt 1: Kosteneffiziente Sanierung

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Ausbau der existierenden Fernwärme



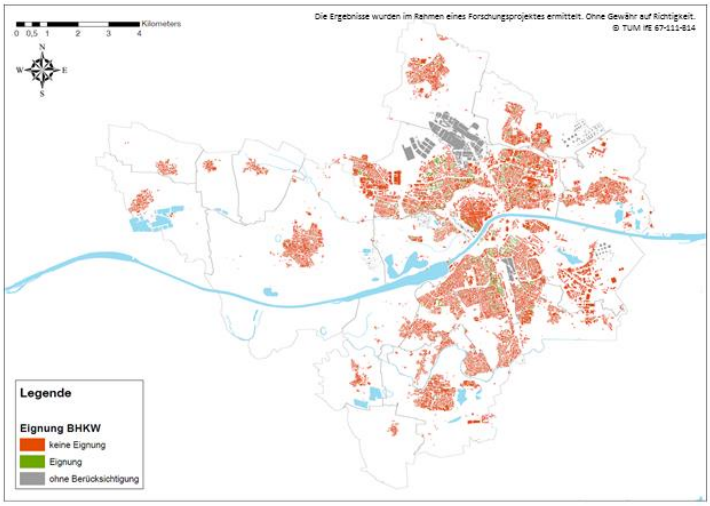

- Ermitteltes Fernwärmepotential nach Vollsanierung: 220 GWh/a
- Prüfung einer Erhöhung des Anschlussgrades in vorhandenen Gebieten vor Neuerschließung
- Mögliche Potentialgebiete in unmittelbarer Nähe zu vorhandenen Gebieten (hohe Wärmenachfrage)
- Prüfung der Fernwärmeeignung bei Erschließung von Neubaugebieten



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Klein-Blockheizkraftwerke

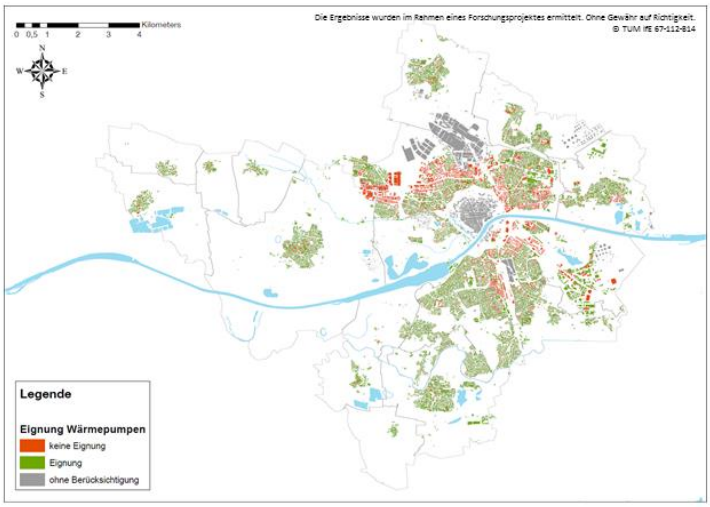



- Maximales Potential zur Deckung des Wärmebedarfs im sanierten Zustand: 220 GWh/a
- Hohes Potential in Gebieten mit hohem Wärmebedarf, auch nach Sanierung
- Klein-BHKWs führen zu höherem Gasverbrauch und $CO_2$-Ausstoß: 75 kt/a auf 86 kt/a
- Kombination einzelner Standorte zu „virtuellem Kraftwerk“

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Wärmepumpen



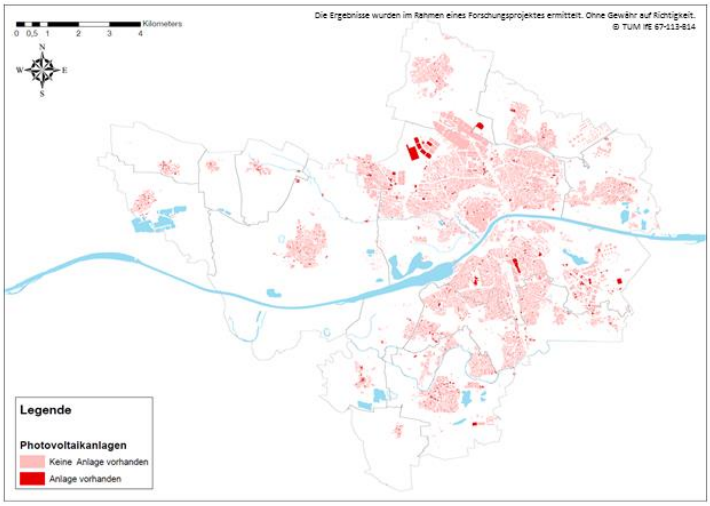

- Hohes Potential für Ein- und Zweifamilienhäuser im ländlichen Bereich/Stadtrand
- Potential zur Deckung des Wärmebedarfs im sanierten Zustand: 670 GWh/a
- Zusätzlicher Strombedarf bei voller Nutzung: 192 GWh/a
- Keine lokalen Emissionen, $CO_2$-Einsparung bei Substitution von Gasheizungen: 163 kt/a



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Versorgungsausblick Photovoltaik – BHKW – Elektromobilität

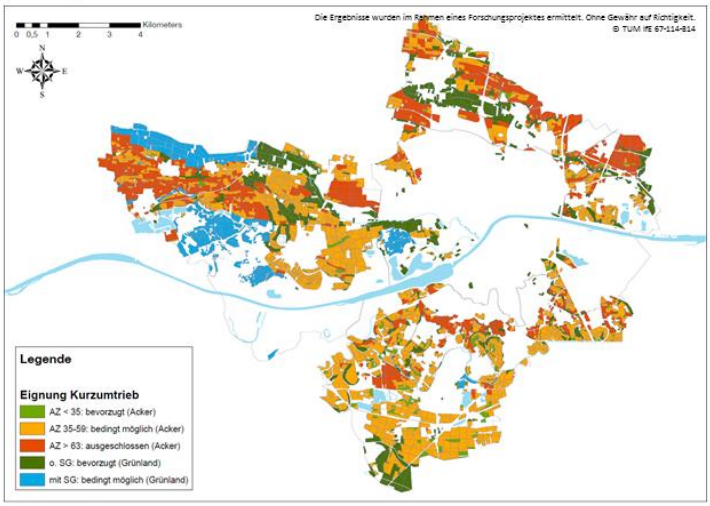



- Bereits hohe installierte PV-Leistung und hohes vorhandenes PV-Potential
- Kopplung von Photovoltaik mit BHKW- oder Wärmepumpenanlagen (virtuelles Kraftwerk)
- Pilotprojekt 2: Erneuerbare Erzeugung und Elektromobilität
- Pilotprojekt 3: Intelligente Stromtankstellen und Elektrofahrzeuge

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Kurzumtriebsplantagen



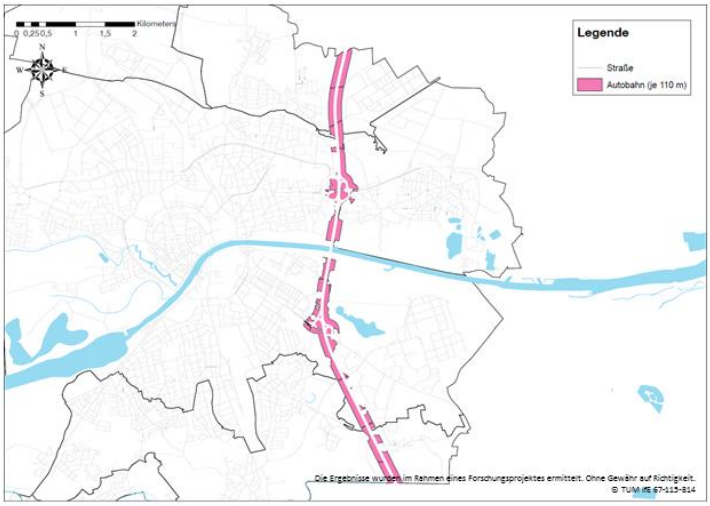

- Untersuchung der Eignung von Acker- und Grünlandflächen
- Bewertung der Standorte anhand ihrer natürlichen Bodenbeschaffenheit (Ackerzahl)
- Bevorzugte Flächen: maximales theoretisches Potential von ca. 50 GWh/a
- Prüfung der technischen Realisierbarkeit des ermittelten Potentials



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Photovoltaik entlang der Autobahn

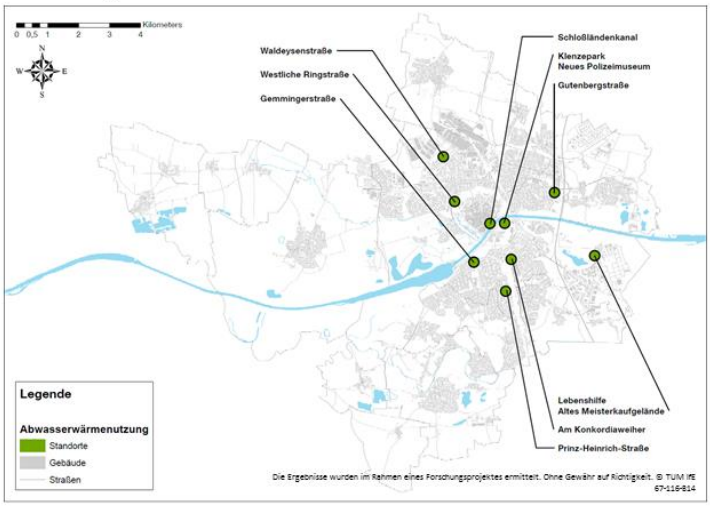



- Ausdehnung des Untersuchungsraumes: 110 m
- Ausschlussflächen: Ortschaften, Wald, Schutzgebiete, Straßen, Wege, Bahnstrecken, Gewässer
- Maximale Potentialfläche: 1,27 km², maximales theoretische Potential: 42 MW
- Ermitteltes Einsparpotential bei Ingolstädter Strommix: 16,6 kt/a

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Abwasserwärmenutzung



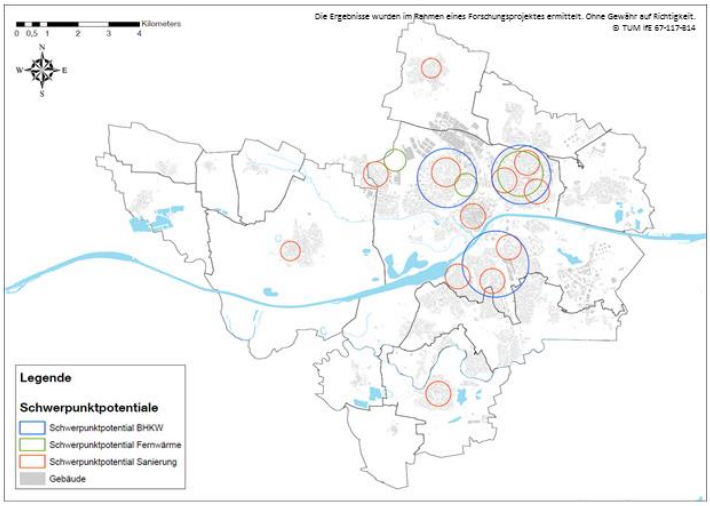

- Abwasserwärmerückgewinnung durch Wärmepumpenprozesse
- Ermitteltes Abwasserpotential für Deutschland: 3.665 GWh/a
- Berücksichtigung verbraucherseitiger und kanal- bzw. abwasserseitiger Bedingungen
- Theoretisches Abwasserpotential in Ingolstadt: 5,8 GWh/a



## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Vorstellung der Ergebnisse

Technische Universität München

Zusammenfassung der Konzepte und Schwerpunktpotential




- Fernwärmepotentiale in unmittelbarer Umgebung der bereits existierenden Gebiete
- Potentiale für BHKW-Anlagen in den Stadtteilen Nordost, Nordwest und südlich der Donau
- Überlagerung von Sanierungspotentialen mit Potentialen für Fernwärme und BHKWs
- Eignung Wärmepumpen für Ein- und Zweifamilienhäuser, ohne Konkurrenz zu anderen Maßnahmen

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Agenda

Technische Universität München

1. Motivation und Ziele des Projektes

2. Vorstellung der Ergebnisse
   - AP 1: Bestandsanalyse
   - AP 2: Potentiale erneuerbarer Energien
   - AP 3: Potential Photovoltaik
   - AP 4: Wärmebedarfsbestimmung
   - AP 5: Konzepterstellung

3. **Zusammenfassung und Empfehlungen**

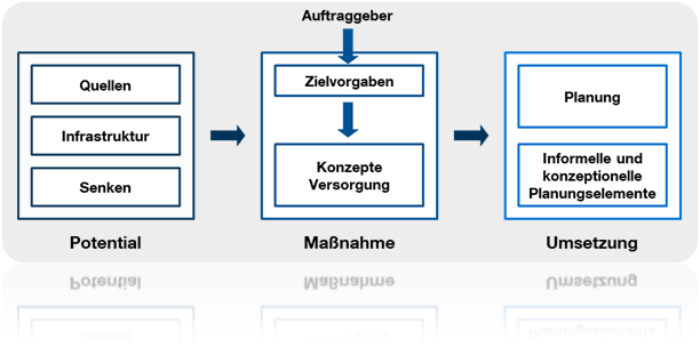


## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Zusammenfassung und Empfehlungen

Technische Universität München

**Allgemein**

- Wichtigkeit der Energieplanung für die Stadtplanung
- Nächster Schritt: Überführung des Energienutzungsplans in konkrete Maßnahmen
- Integration des ENP in die Energie- und Flächenplanung
- ENP als Konzeptrahmen für Stadtplanung, Energieversorger und Politik

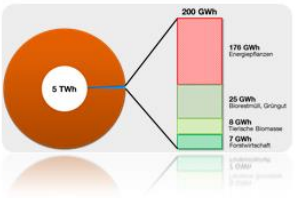


## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Zusammenfassung und Empfehlungen

Technische Universität München

**Wind**

- Unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen, politischen und umweltrechtlichen Rahmenbedingungen keine geeigneten Flächen für Großwindanlagen vorhanden
- Einzelfallprüfung der Eignung für Kleinwindanlagen




**Biomasse**

- Im Vergleich mit Energienachfrage relativ geringes Potential
- Zusätzliches Potential durch Kurzumtriebsplantagen in Ingolstadt vorhanden

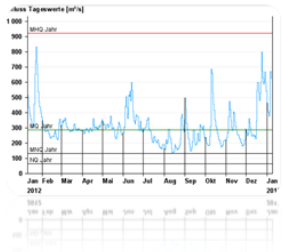


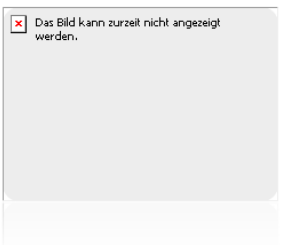
## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Zusammenfassung und Empfehlungen

Technische Universität München

**Wasser**

- Nahezu vollständig ausgeschöpftes Potential
- Potentialerhöhung durch verbesserten Ausbaugrad und kurzfristige Stauzielerhöhung
- Prüfung der Anwendbarkeit der Maßnahmen




**Photovoltaik und Solarthermie**

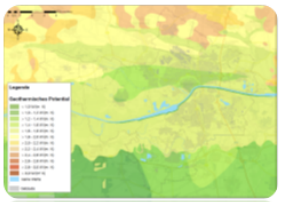
- Hohes auszuschöpfendes Potential auf Dachflächen
- Zur Vermeidung von Nutzungskonflikten vorrangige Nutzung dieses Potentials
- Zweitrangige Nutzung von Konversionsflächen und Flächen entlang von Autobahnen

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Zusammenfassung und Empfehlungen

Technische Universität München

**Geothermie und Wärmepumpen**

- Aufgrund geologischer Voraussetzungen keine Anlagen zur Nutzung von Tiefengeothermie vorhanden
- Bedingte Eignung von Flächen zur Nutzung von Erdwärmesonden (Empfehlenswerte Einzelfallprüfung in der Südstadt)
- Grundsätzliche Eignung des Untergrundes zur Nutzung von Grundwasserwärmepumpen hinsichtlich Durchlässigkeiten und Grundwassermächtigkeiten
- Hohes Potential für Wärmepumpennutzung mit Flächenkollektoren
- Prüfung der Technologien in Neubaugebieten



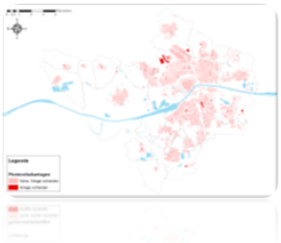


## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
### Zusammenfassung und Empfehlungen

Technische Universität München

**Fernwärme**

- Ausgezeichnete Möglichkeit zur Reduzierung der Emissionen im Stadtgebiet (Primärenergiefaktor Null)
- Prüfung der Nachverdichtung sowie Anschluss von Neubaugebieten
- Abgestimmtes Vorgehen nötig (Nutzungskonflikte)



**Klein-BHKWs und intelligente Versorgung**

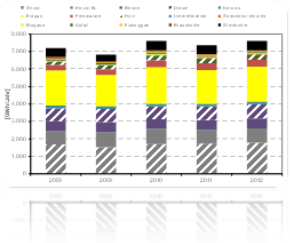
- Hohes Potential für Wärme- und Stromerzeugung
- Beachtung von Wechselwirkungen mit Sanierung und Fernwärme
- Positive Wirkung von virtuellen Kraftwerken
- Kopplung erneuerbarer Energien mit Elektromobilität

## Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt
Zusammenfassung und Empfehlungen

Technische Universität München

### Sanierung

- Energie- und Emissionsreduktion durch energetische Sanierung
- Einflüsse von Sanierungsmaßnahmen auf Wärmebereitstellung
- Pilothafte Untersuchung von Sanierungsmaßnahmen

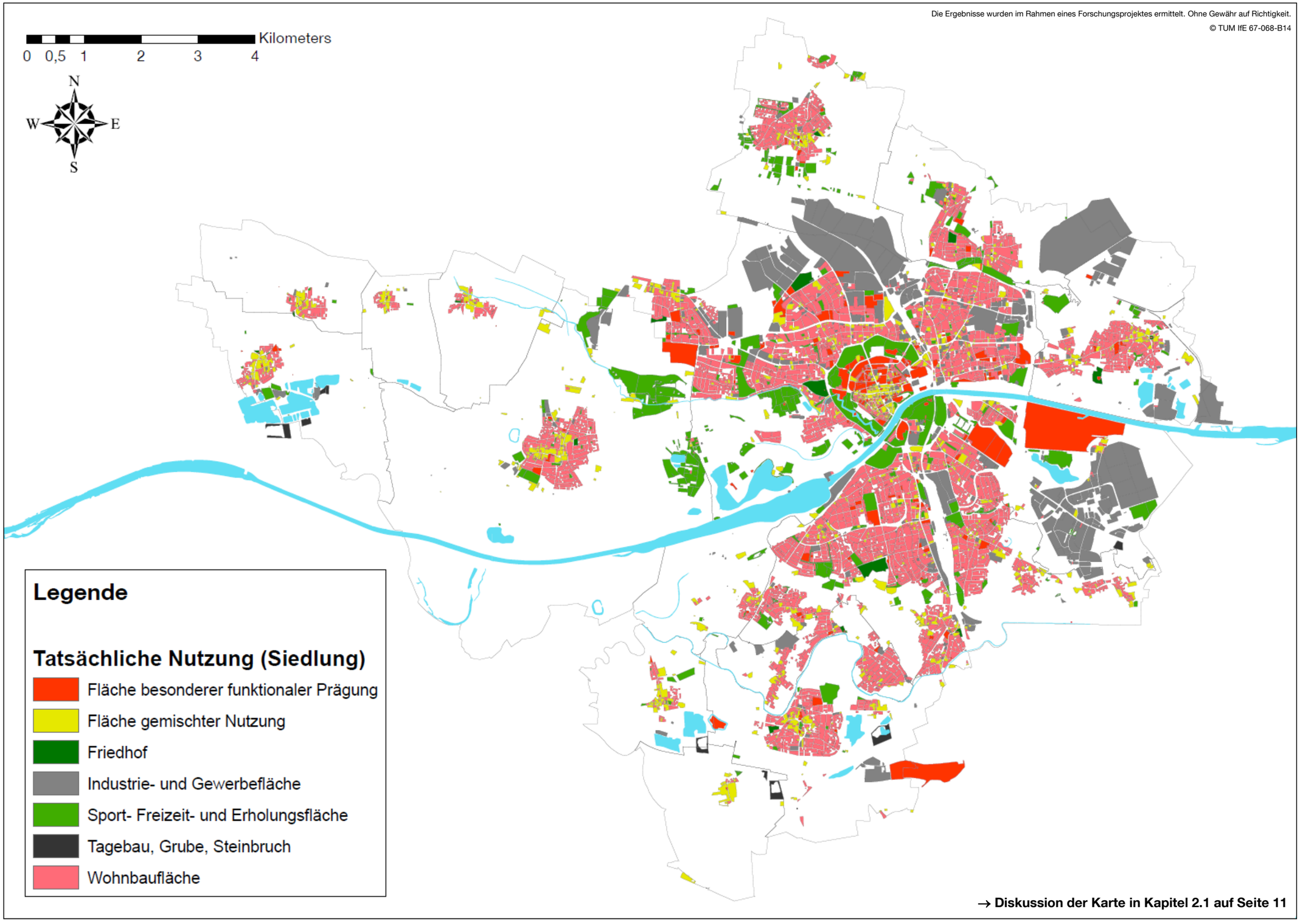


### Bilanz ECO-Region/Klimabündnis

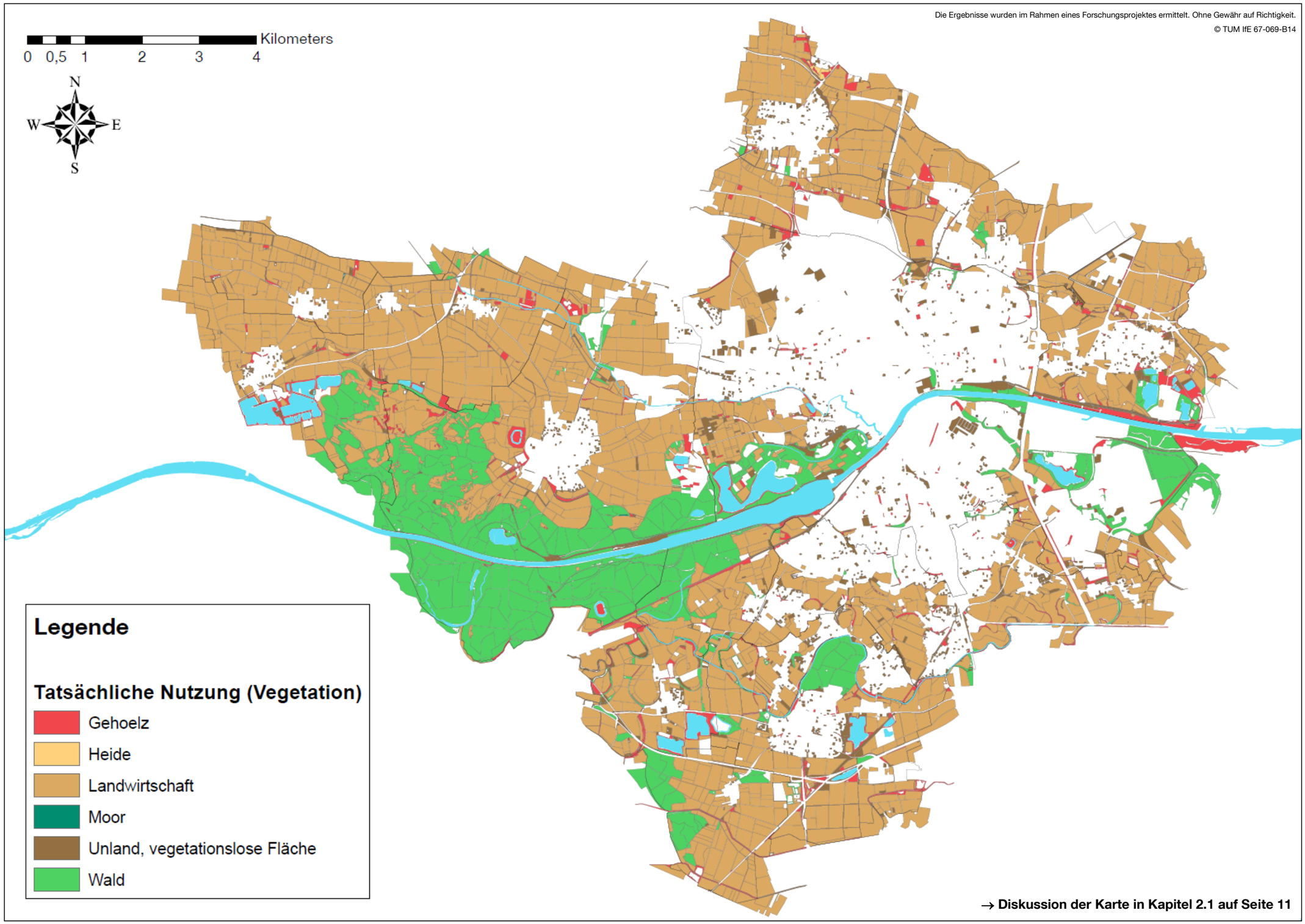
- Starke Abhängigkeit ECORegion von Eingangsdaten und Bilanzierungsmethodik
- Veröffentlichung auf Grundlage einheitlicher Daten empfehlenswert
- Fortführung der Bilanz gemäß verwendeter Methodik

# Anhang B: Karten

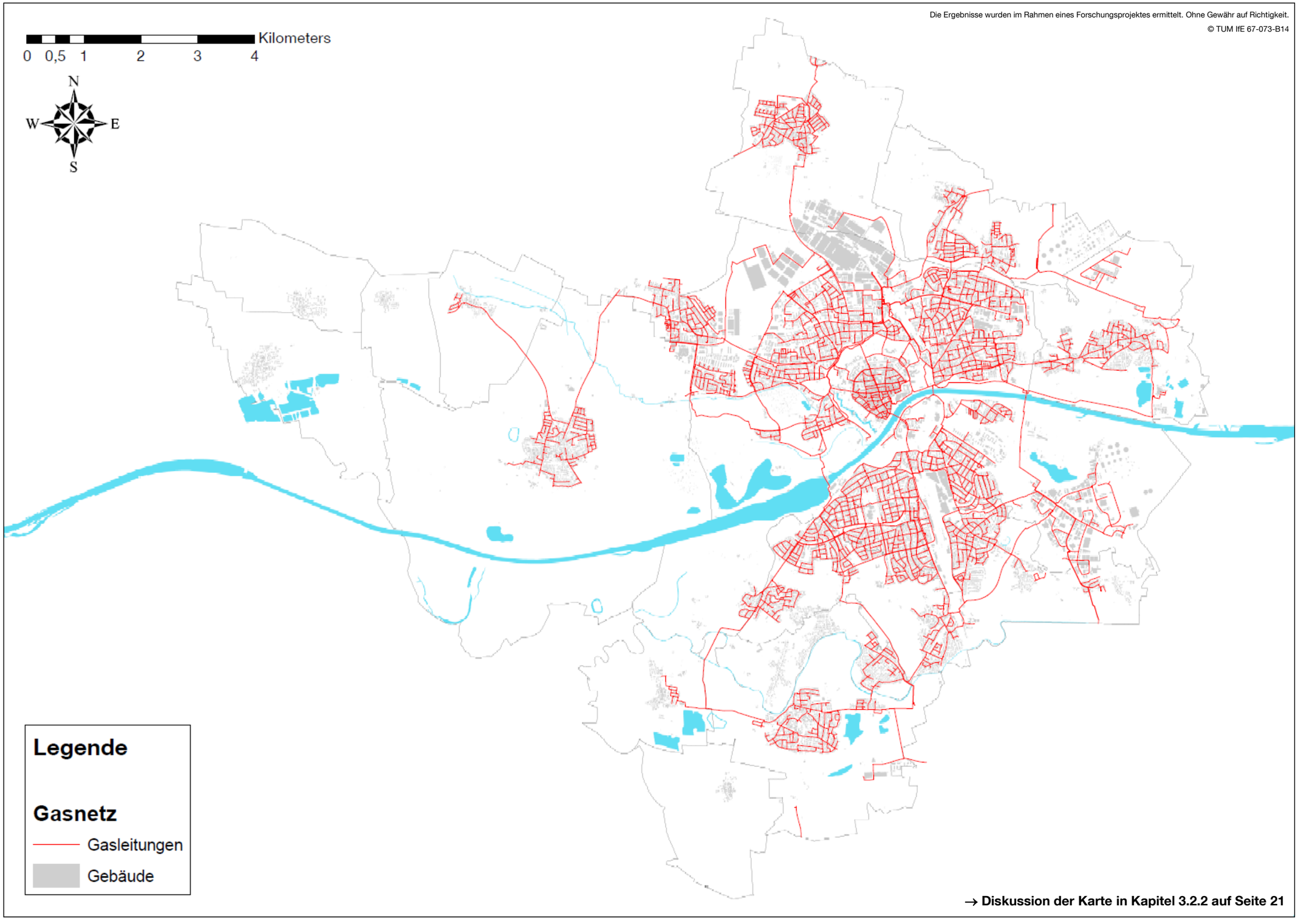
Die im Bericht dargestellten Karten befinden sich als großformatige und ausklappbare Karten im Anhang.



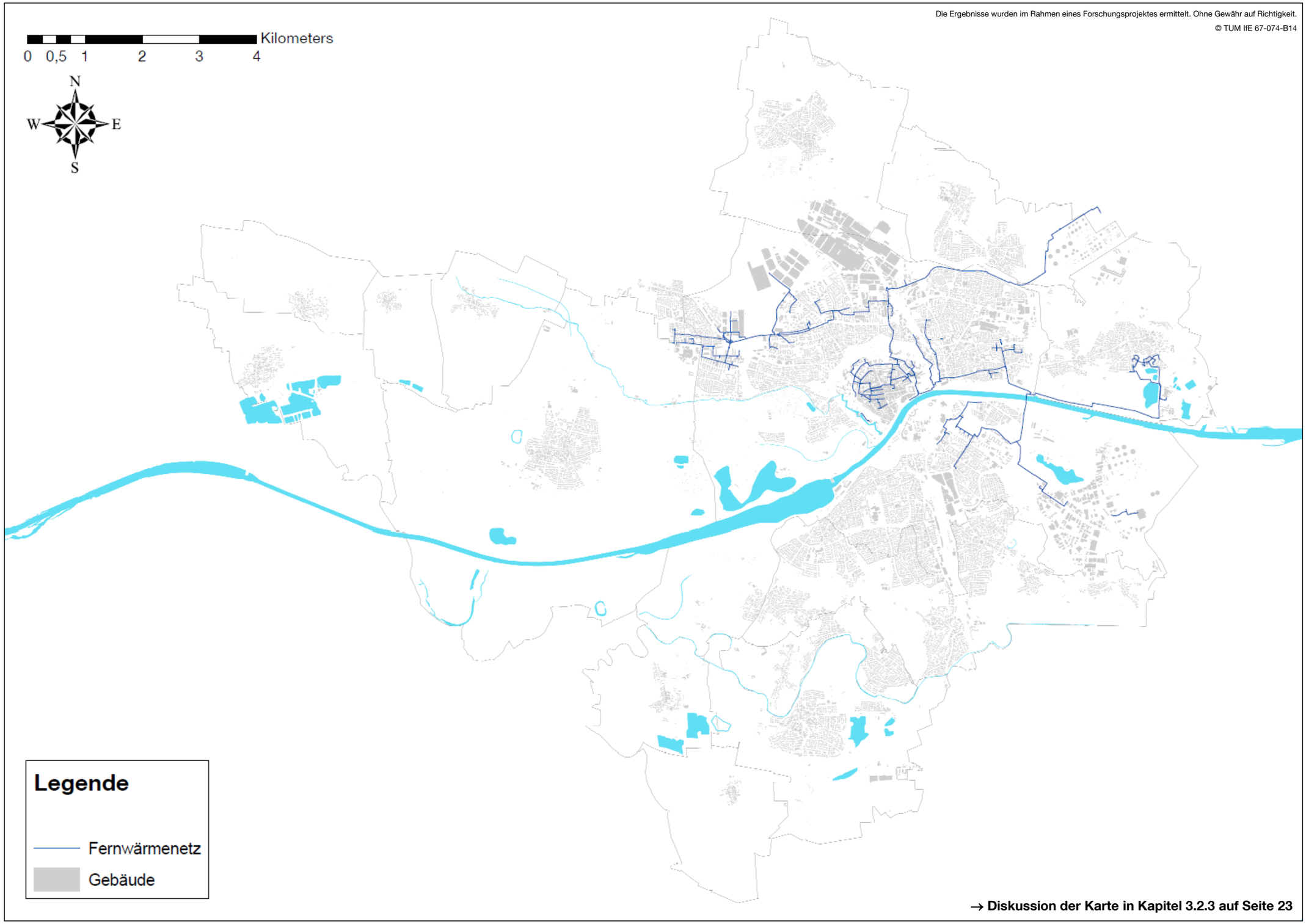

Tatsächliche Nutzung für Siedlung in Ingolstadt



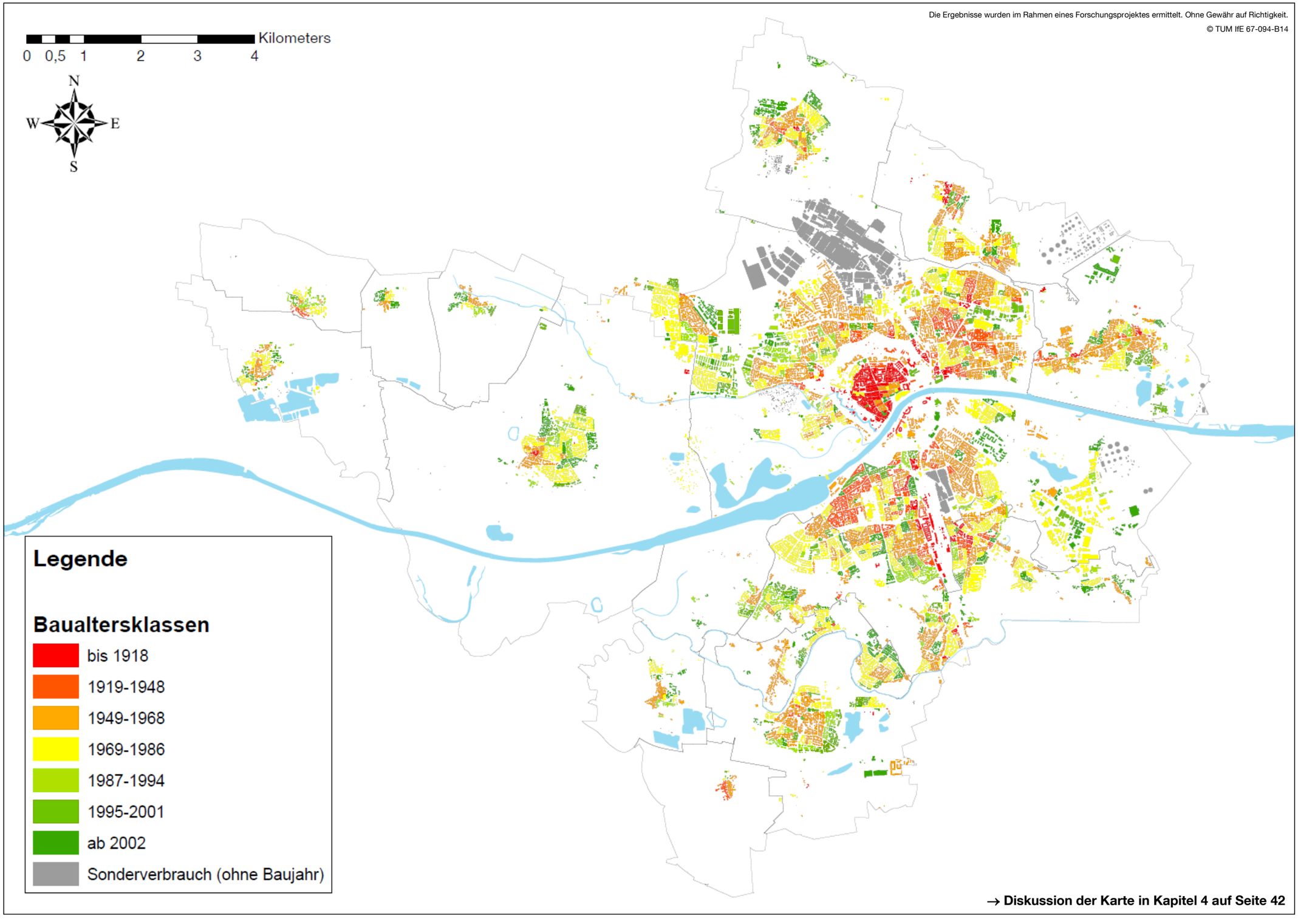

Tatsächliche Nutzung für Vegetation in Ingolstadt




Gasleitungen im Versorgungsgebiet Ingolstadt

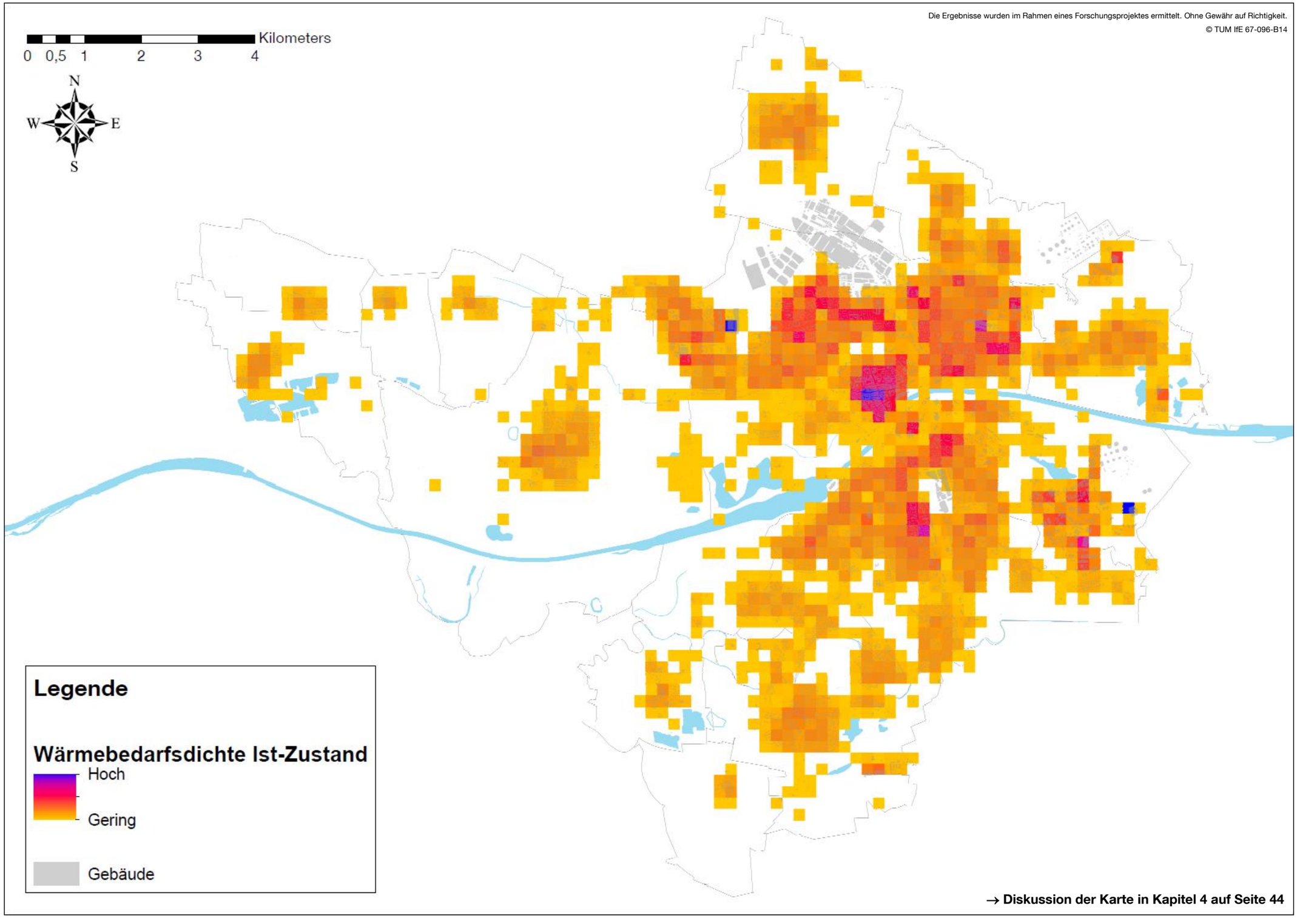



Fernwärmeleitungen im Versorgungsgebiet Ingolstadt

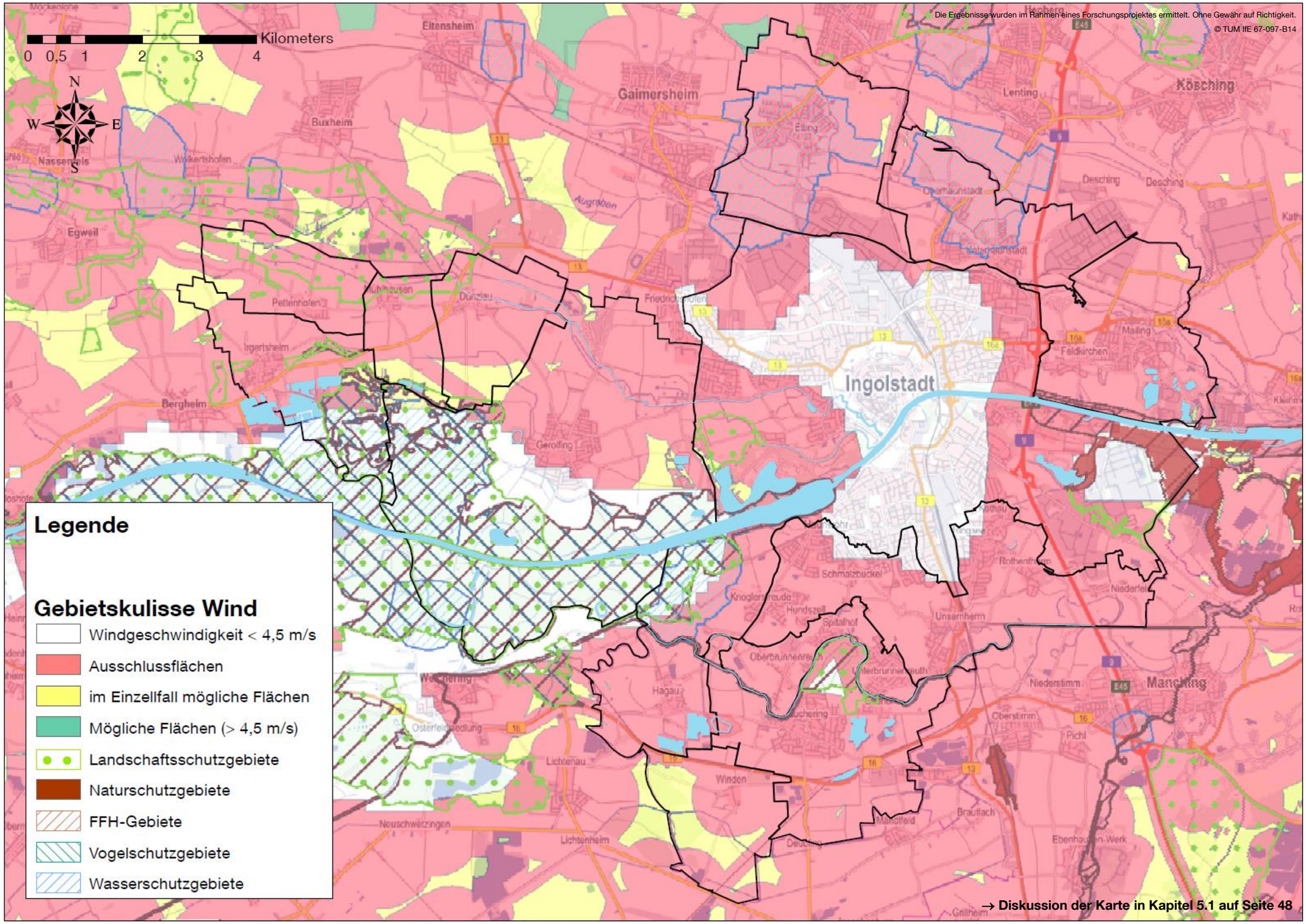



→ **Diskussion der Karte in Kapitel 4 auf Seite 42**

Klassifizierung der Ingolstädter Gebäude nach Baualtersklassen

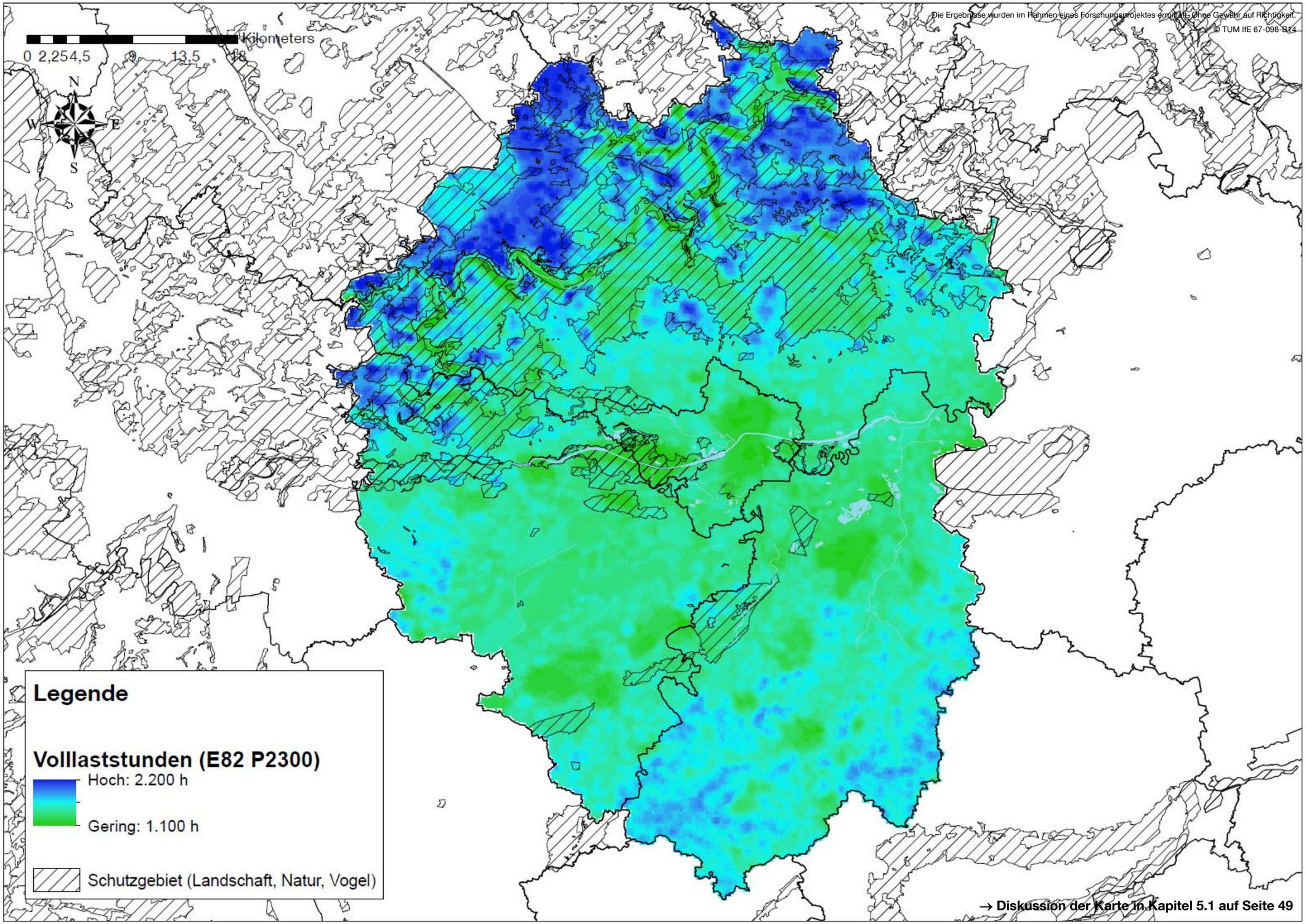



Ermittelte Wärmebedarfsdichte im Ist-Zustand in Ingolstadt

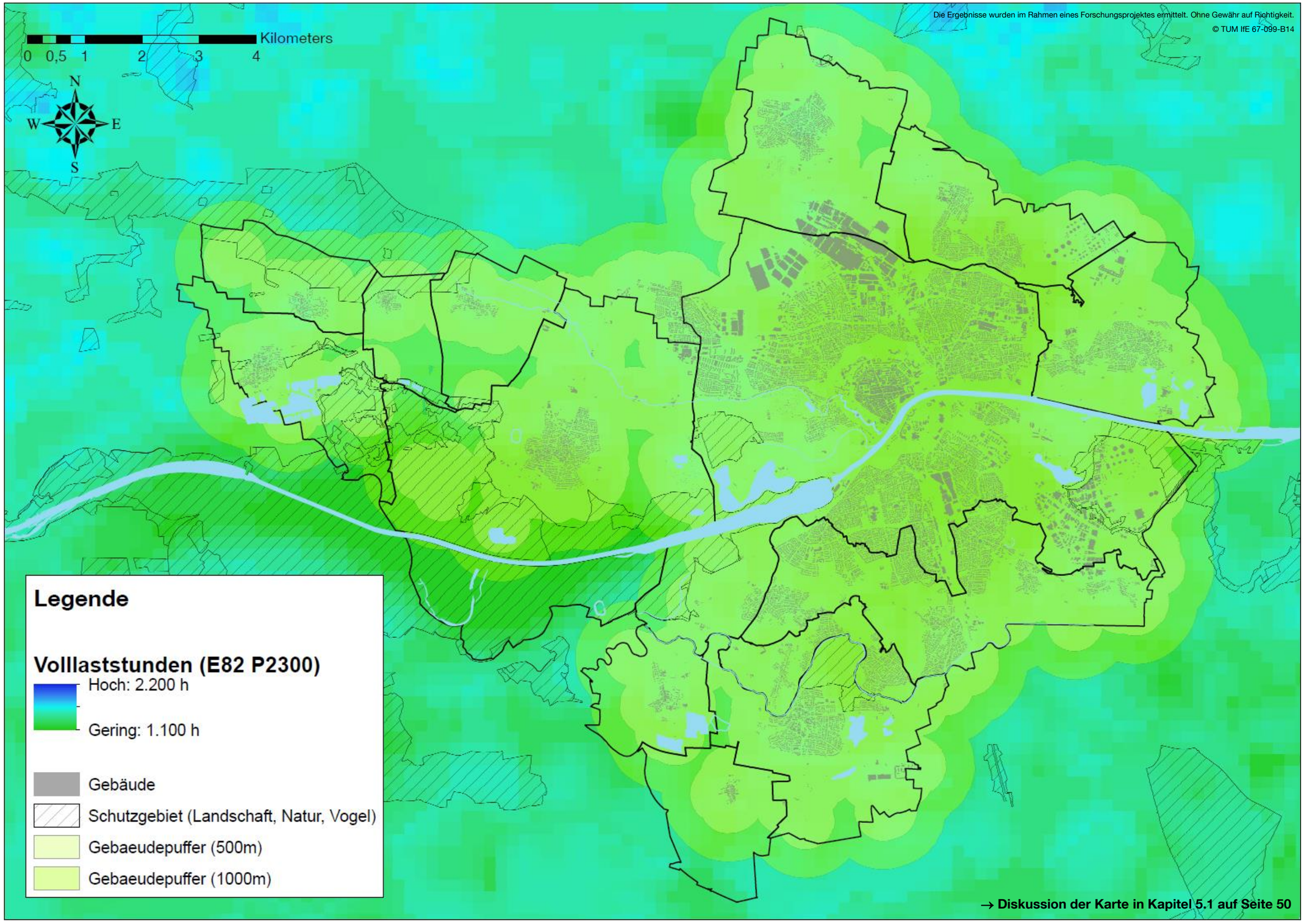



→ Diskussion der Karte in Kapitel 5.1 auf Seite 48

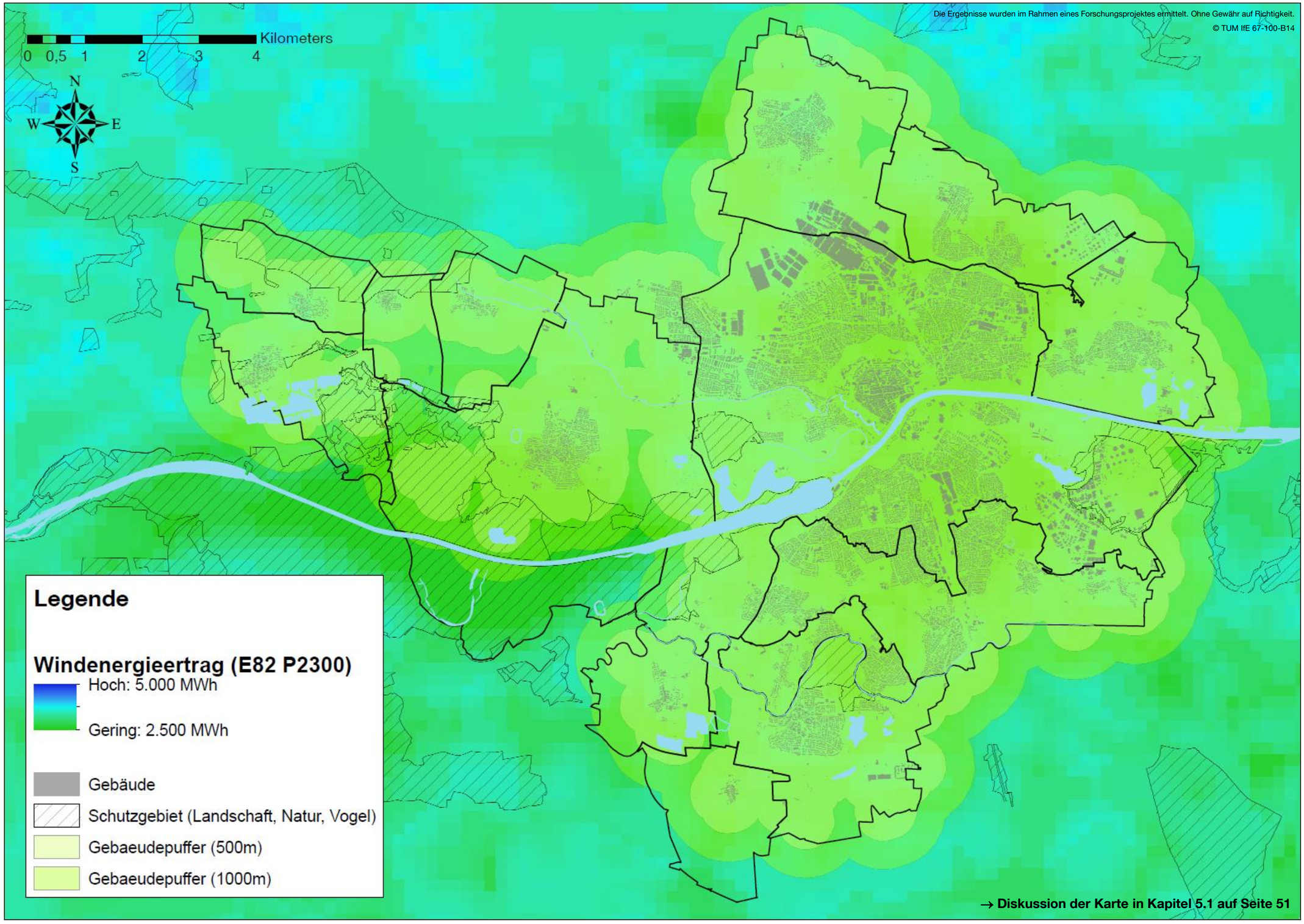
Gebietskulisse Windkraft für Ingolstadt



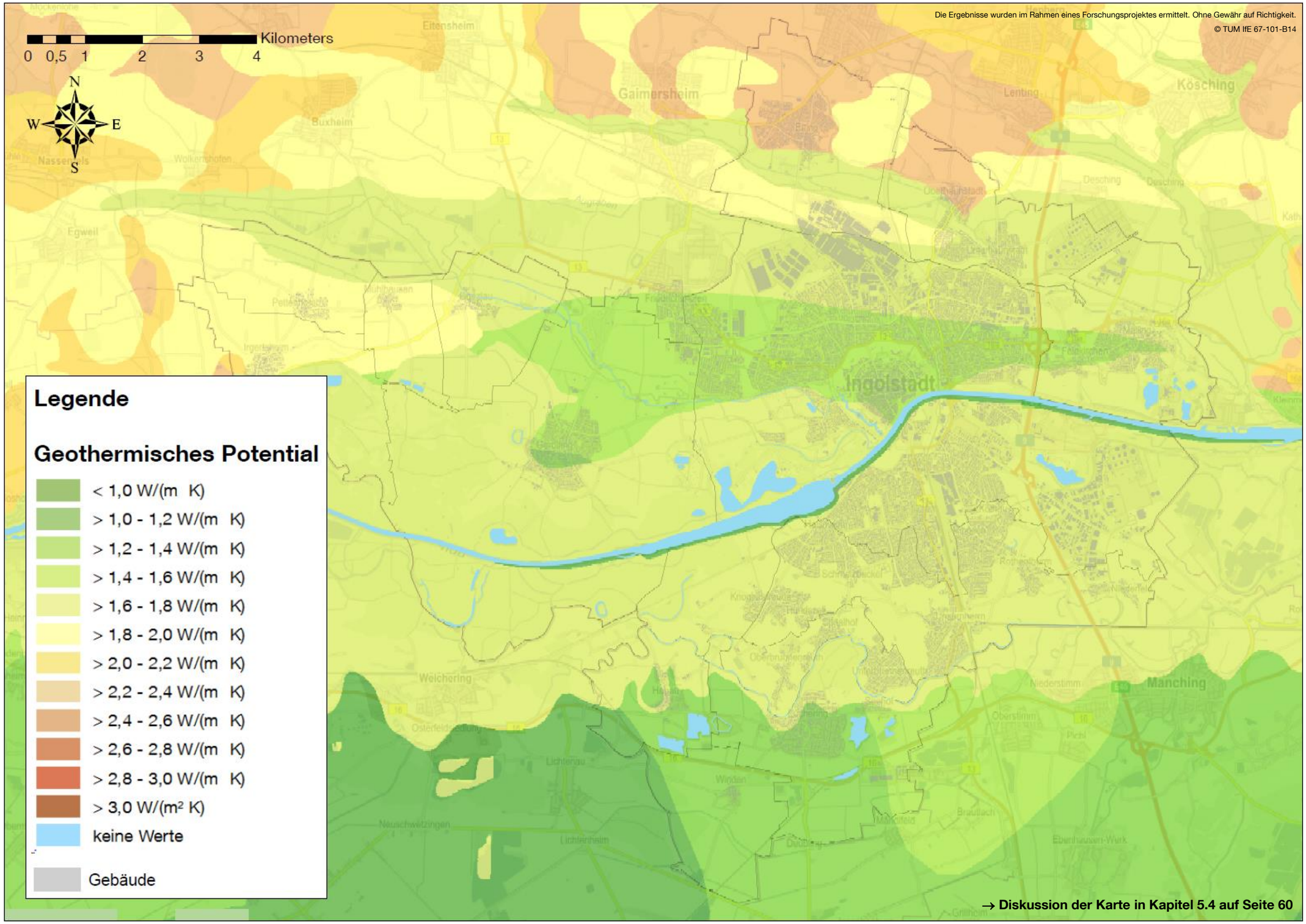

Volllaststunden bei Enercon-Anlage E-82



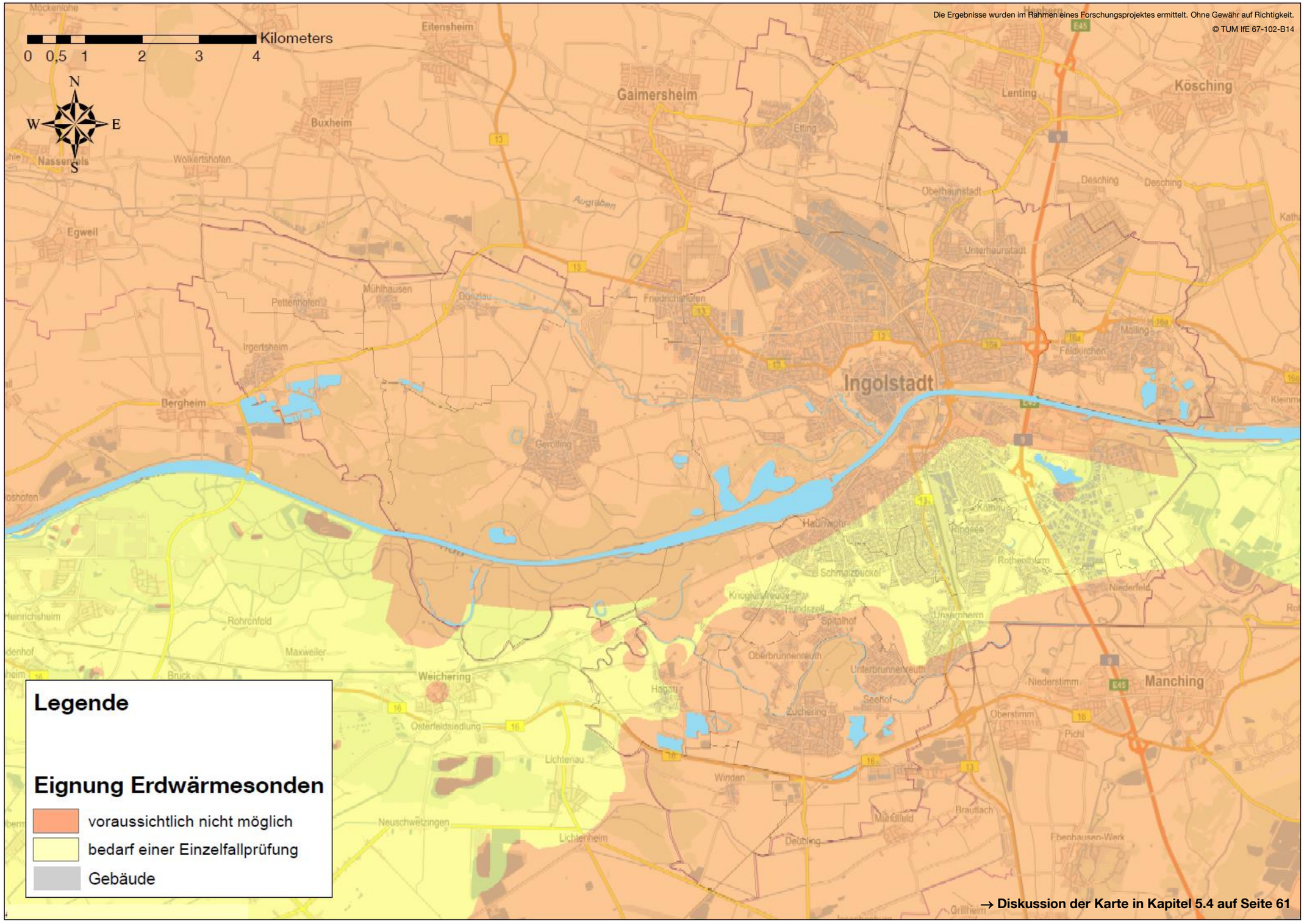

Volllaststunden bei Enercon-Anlage E-82



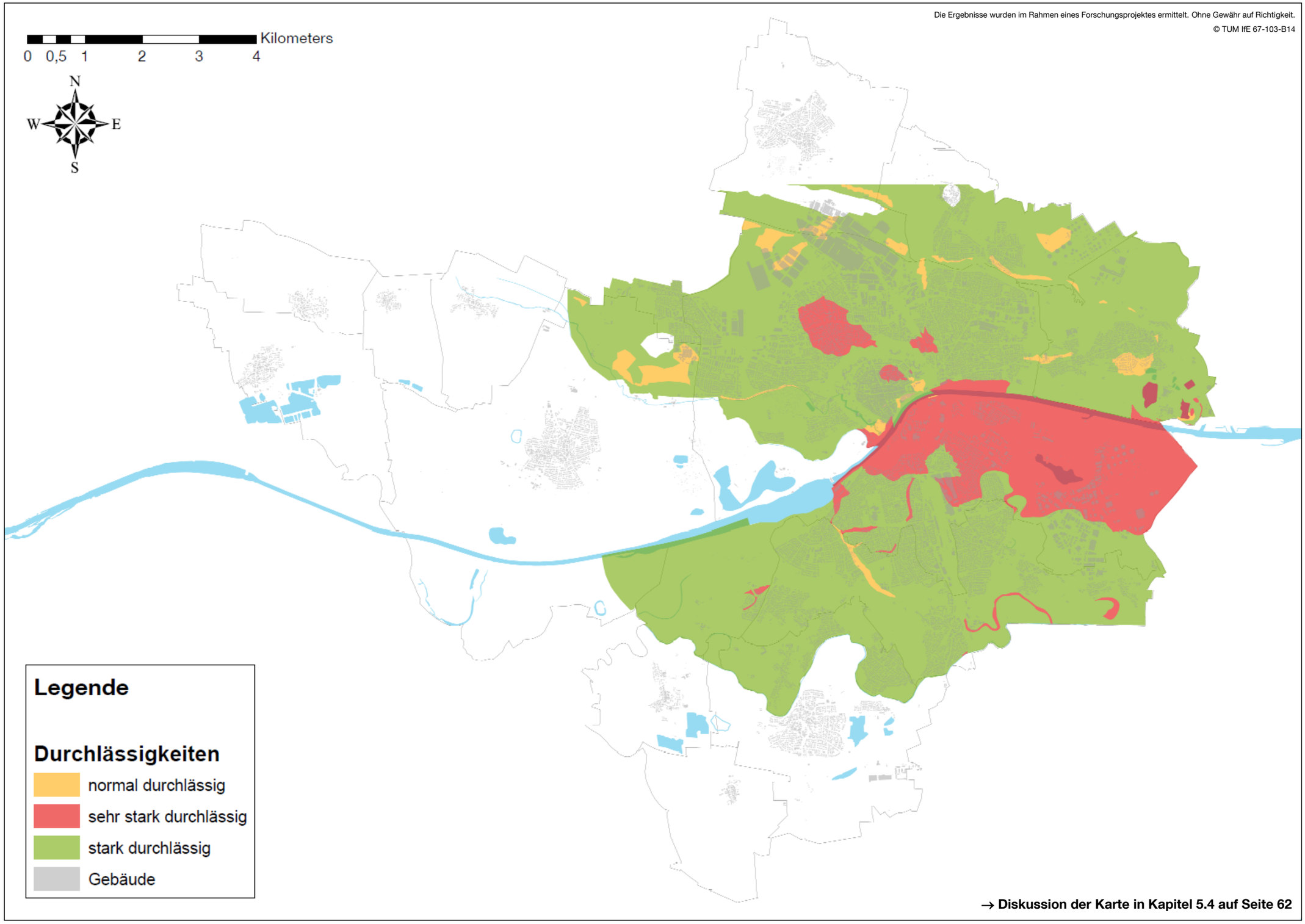

Windenergieertrag bei Enercon-Anlage E-82



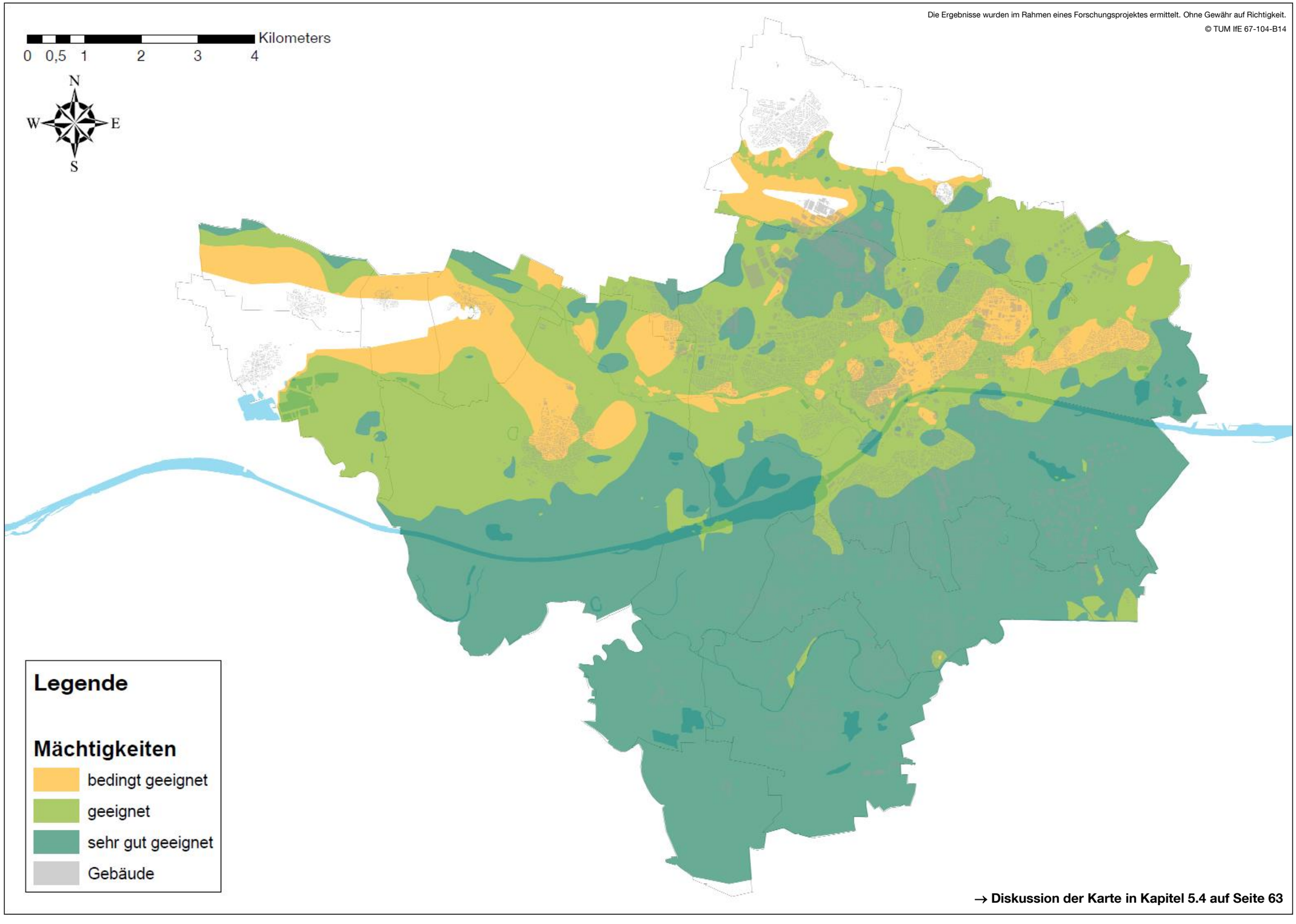

Geothermisches Potential in Ingolstadt



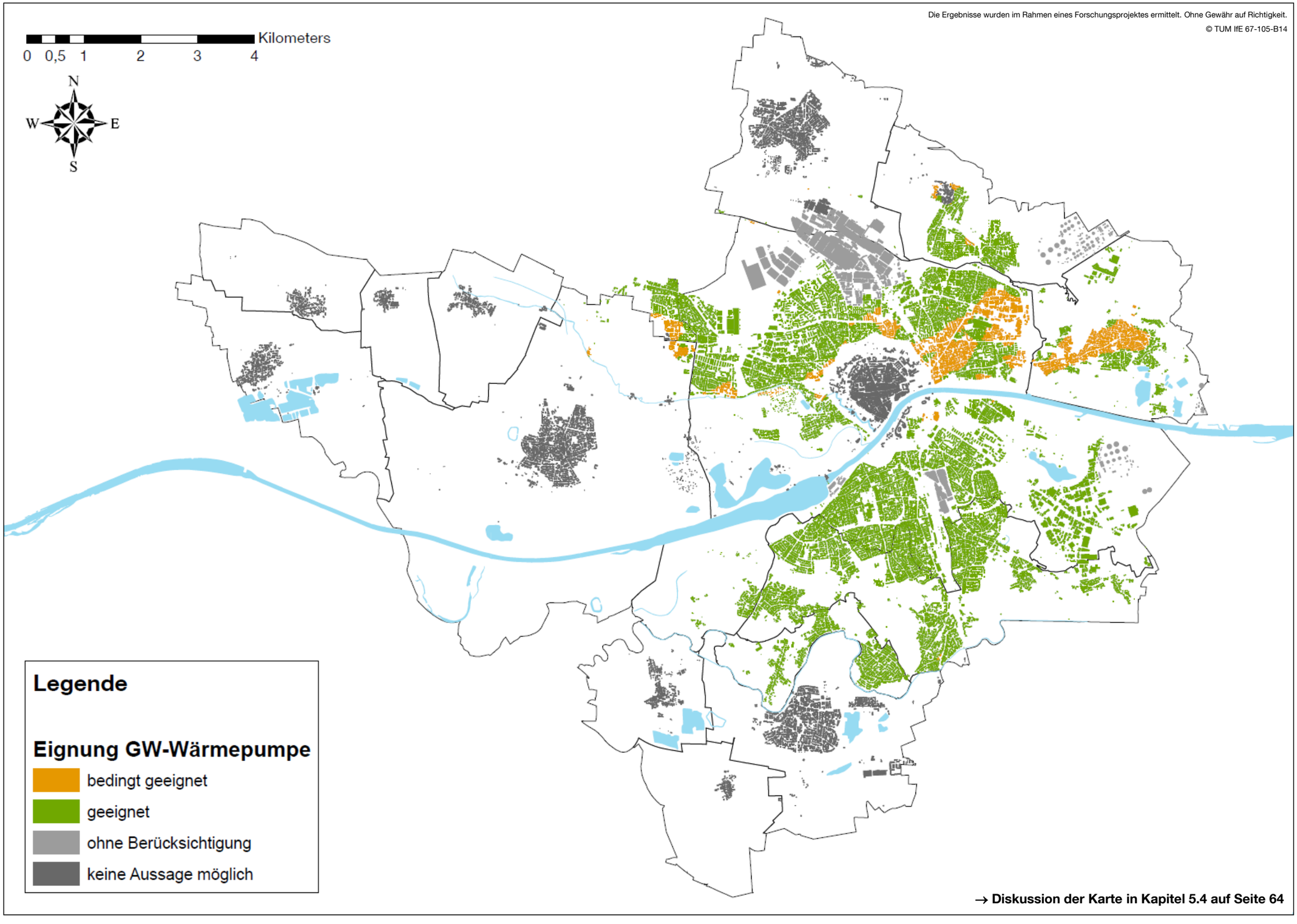

Günstige Gebiete für Erdwärmesonden in Ingolstadt



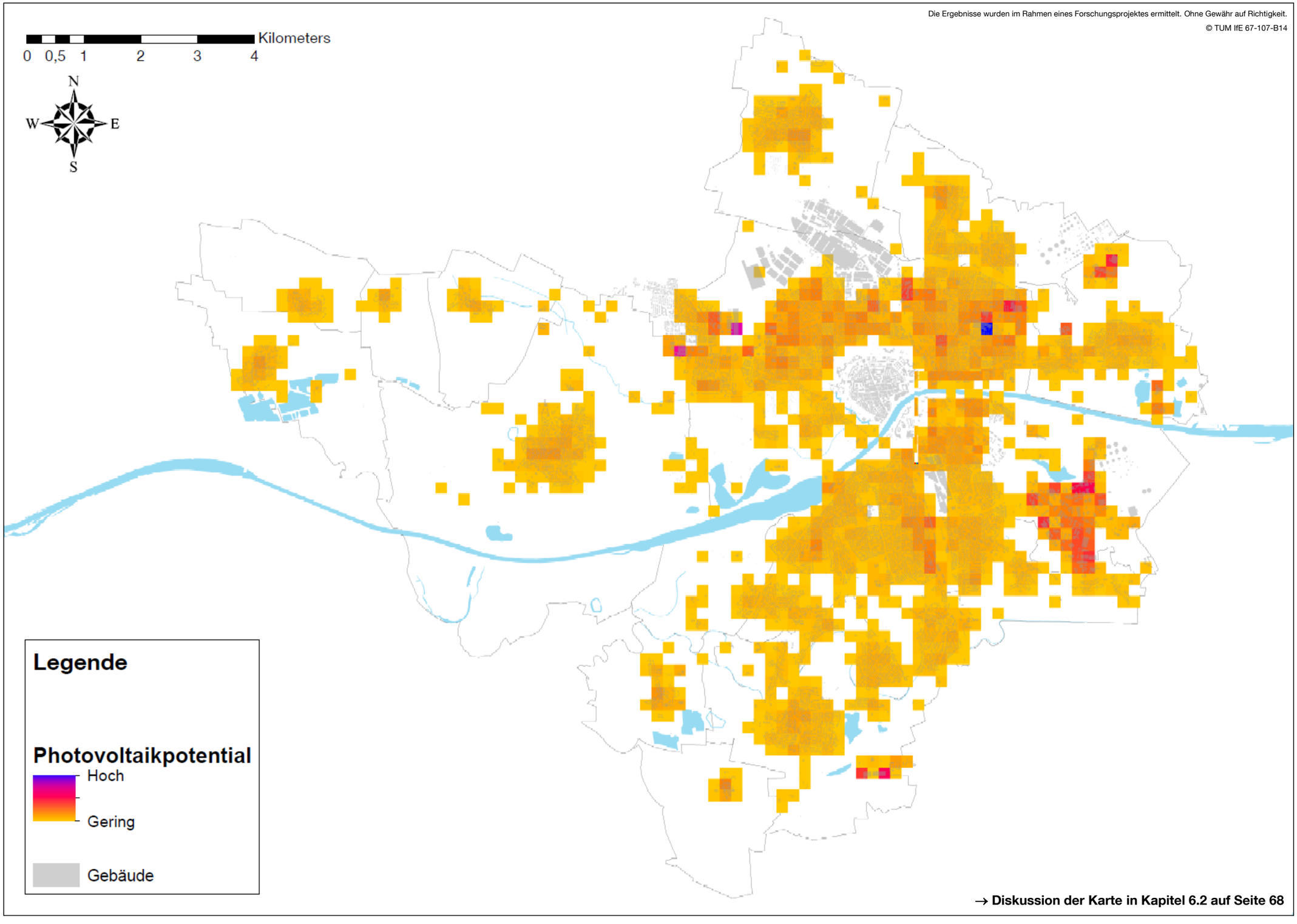

Grundwasserdurchlässigkeiten in Ingolstadt



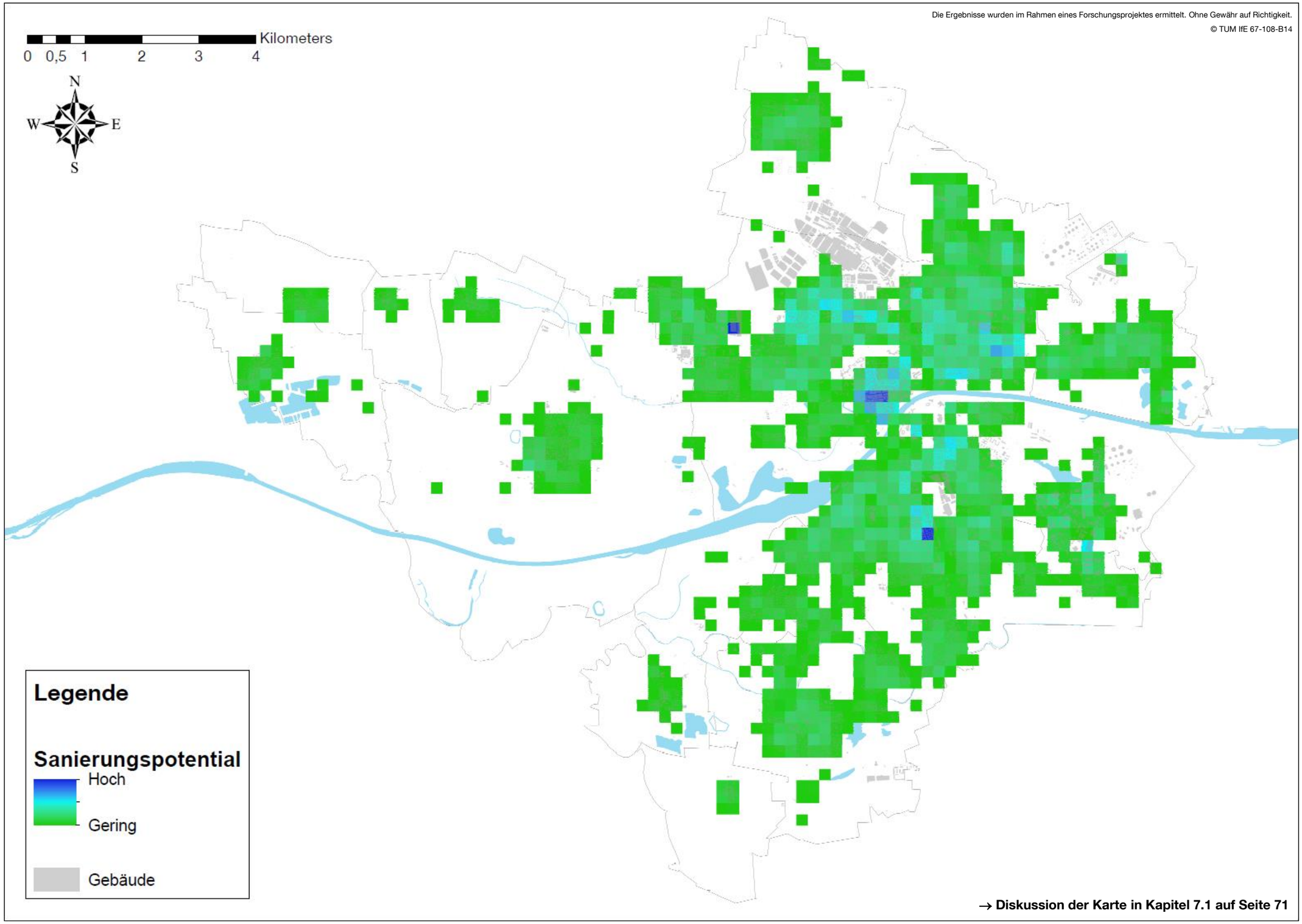

Grundwassermächtigkeiten in Ingolstadt



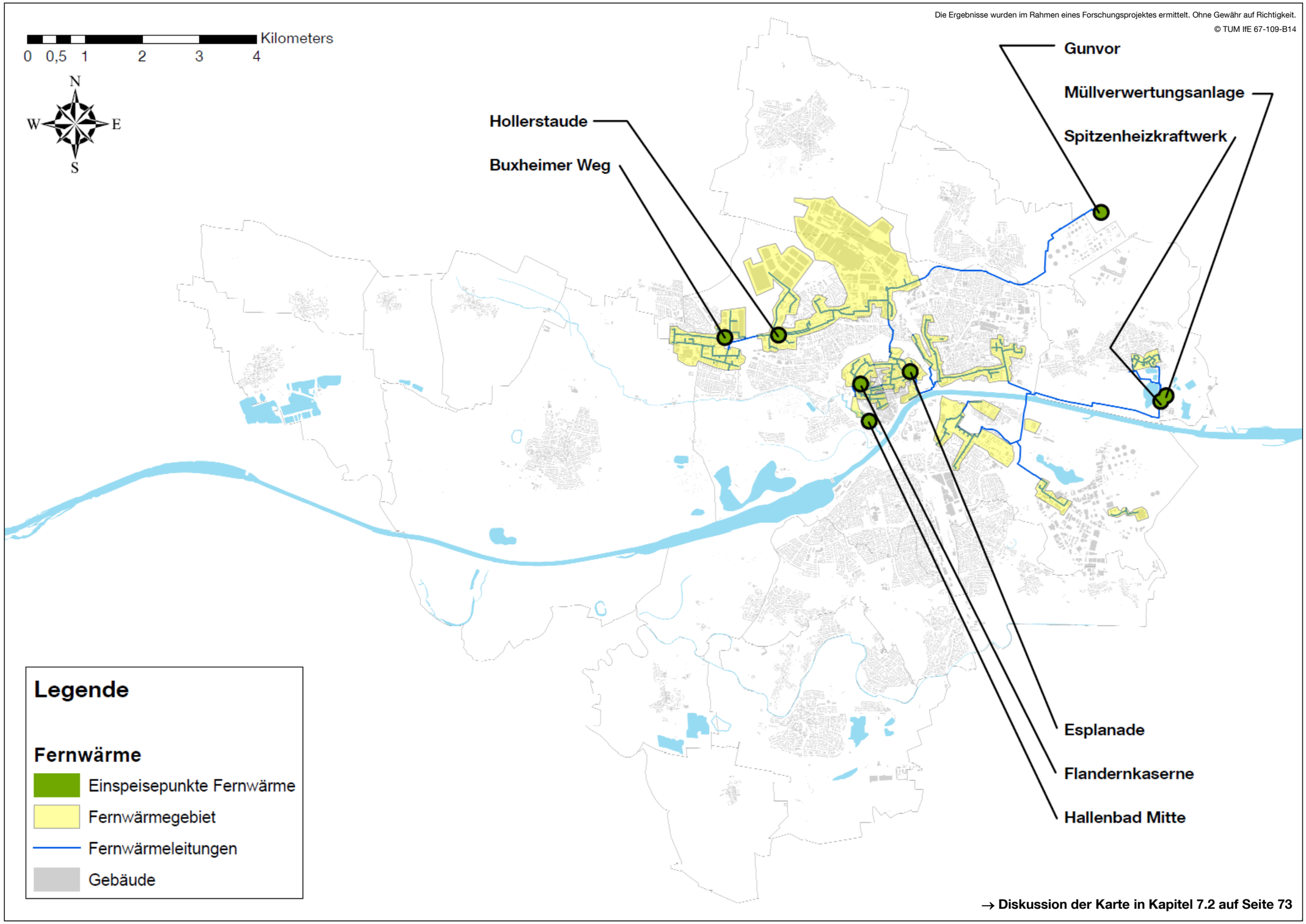

Theoretische Eignung für Wärmepumpen (Grundwasser) in Ingolstadt auf Basis von Durchlässigkeiten und Mächtigkeiten



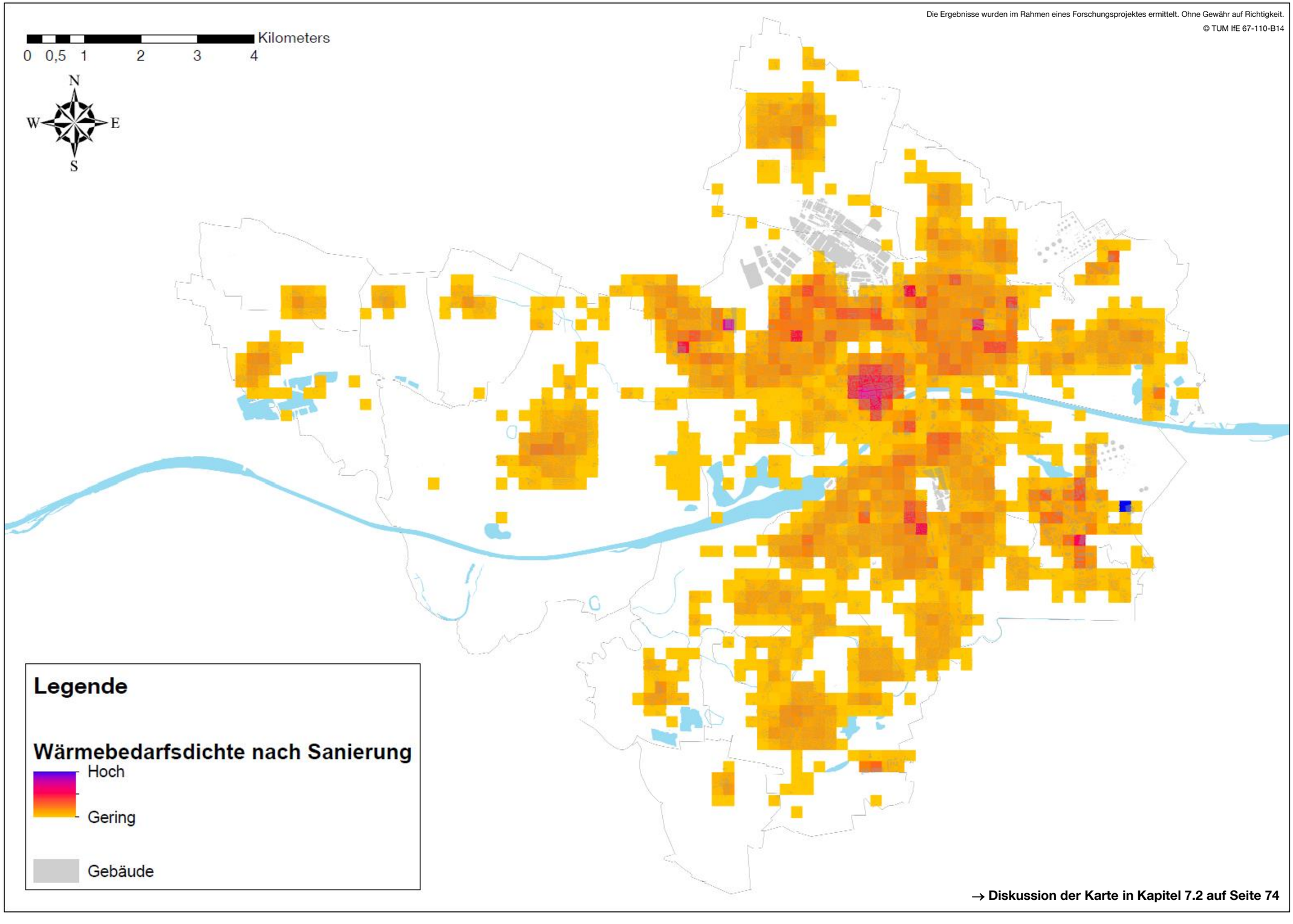

Photovoltaikpotential: 200 x 200 m Raster (Genauigkeitsstufe 2)



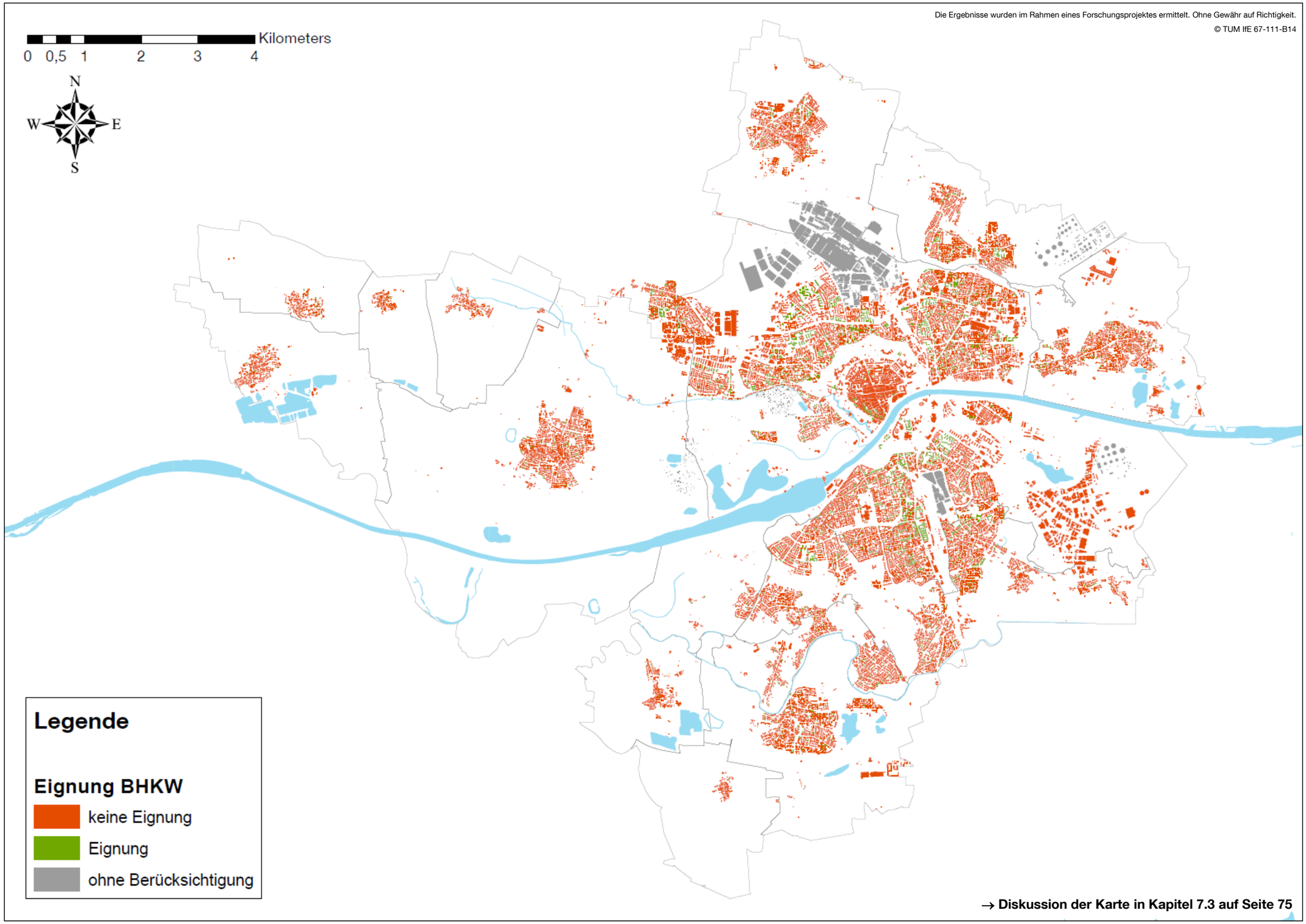

Vorhandenes Sanierungspotential der Ingolstädter Gebäude



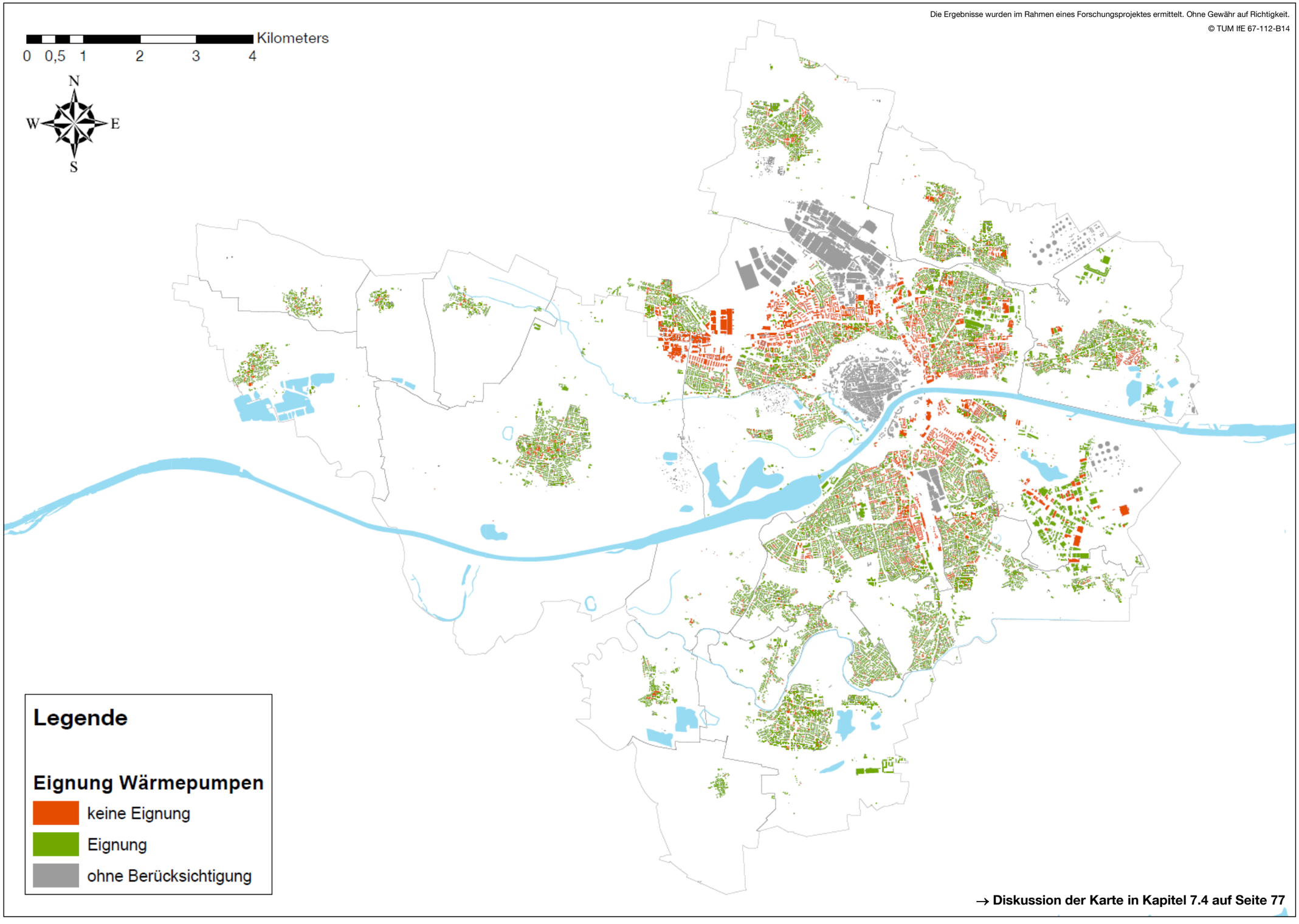

Vorhandene Fernwärmegebiete in Ingolstadt



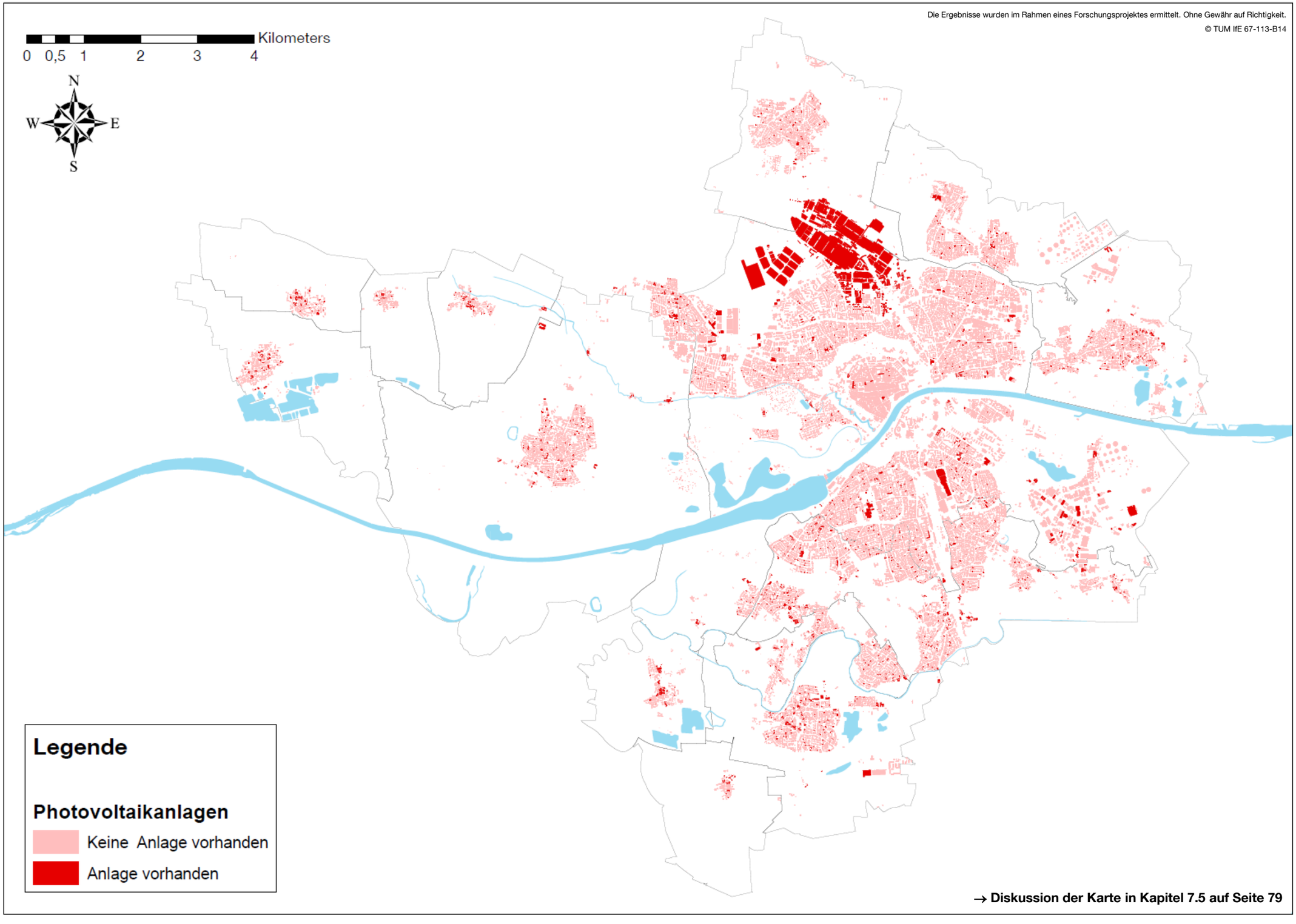

Wärmebedarfsdichte nach Sanierung in Ingolstadt



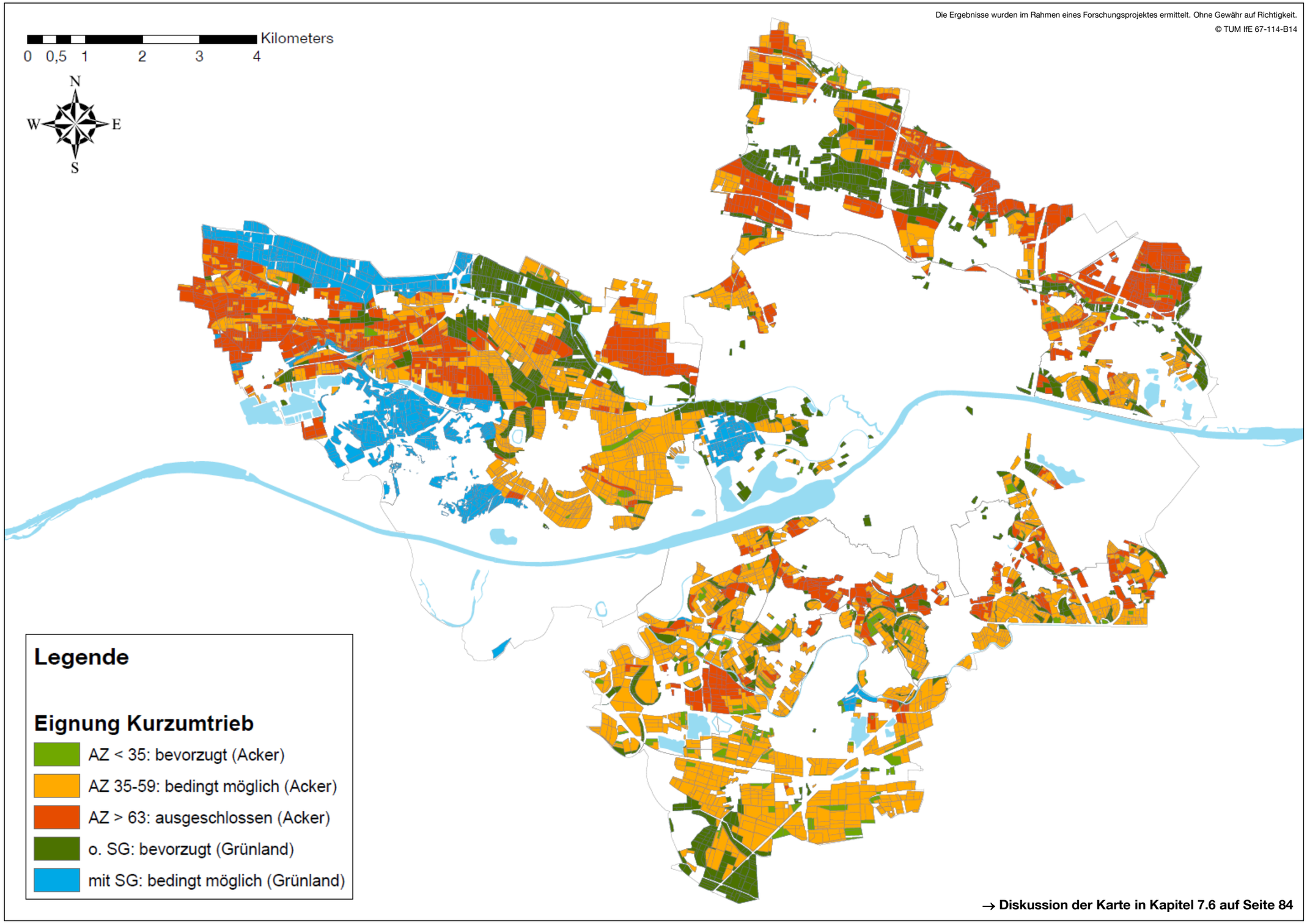

Eignung für Klein-BHKWs in Ingolstadt



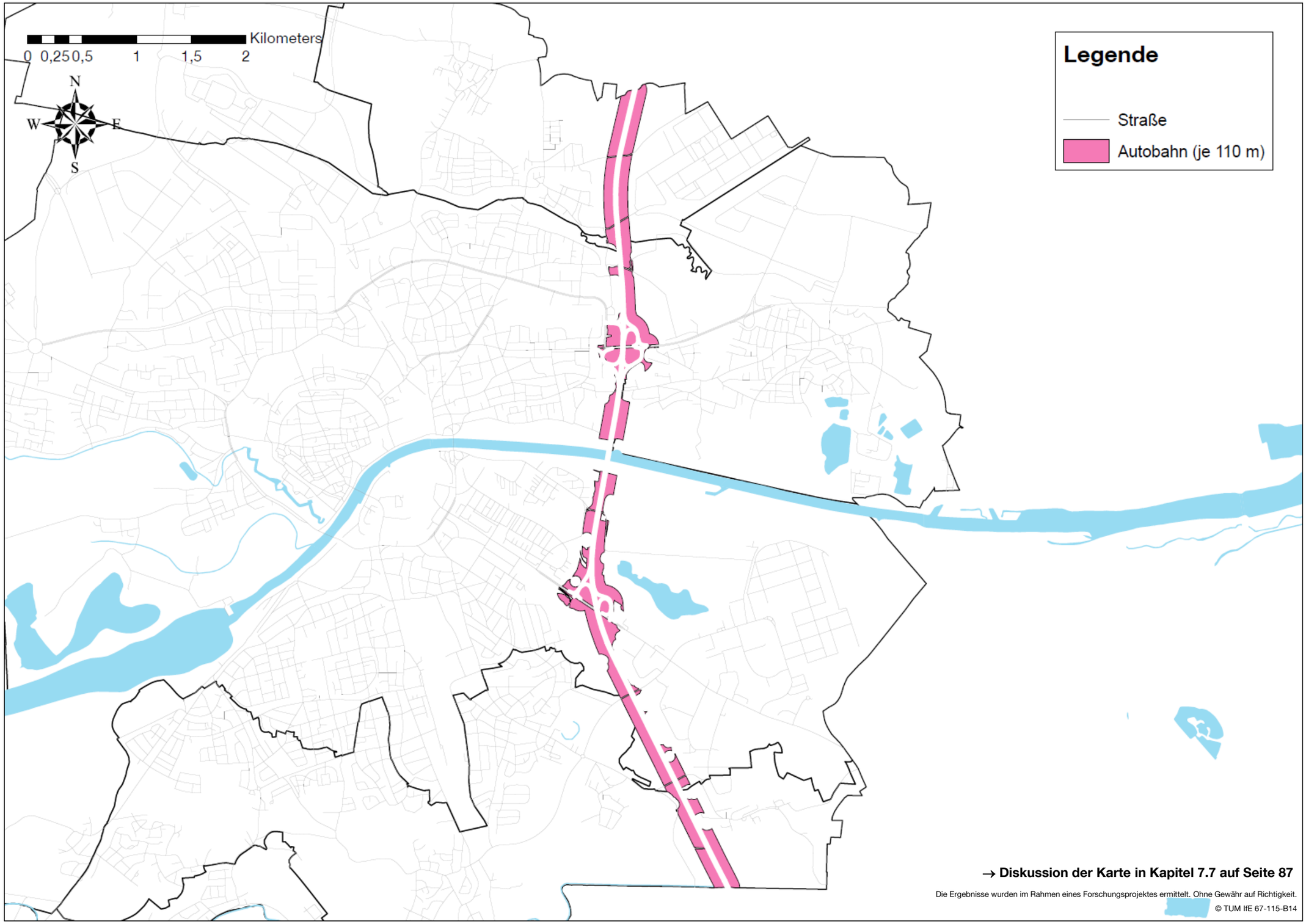

Eignung für Wärmepumpen Kollektoren in Ingolstadt



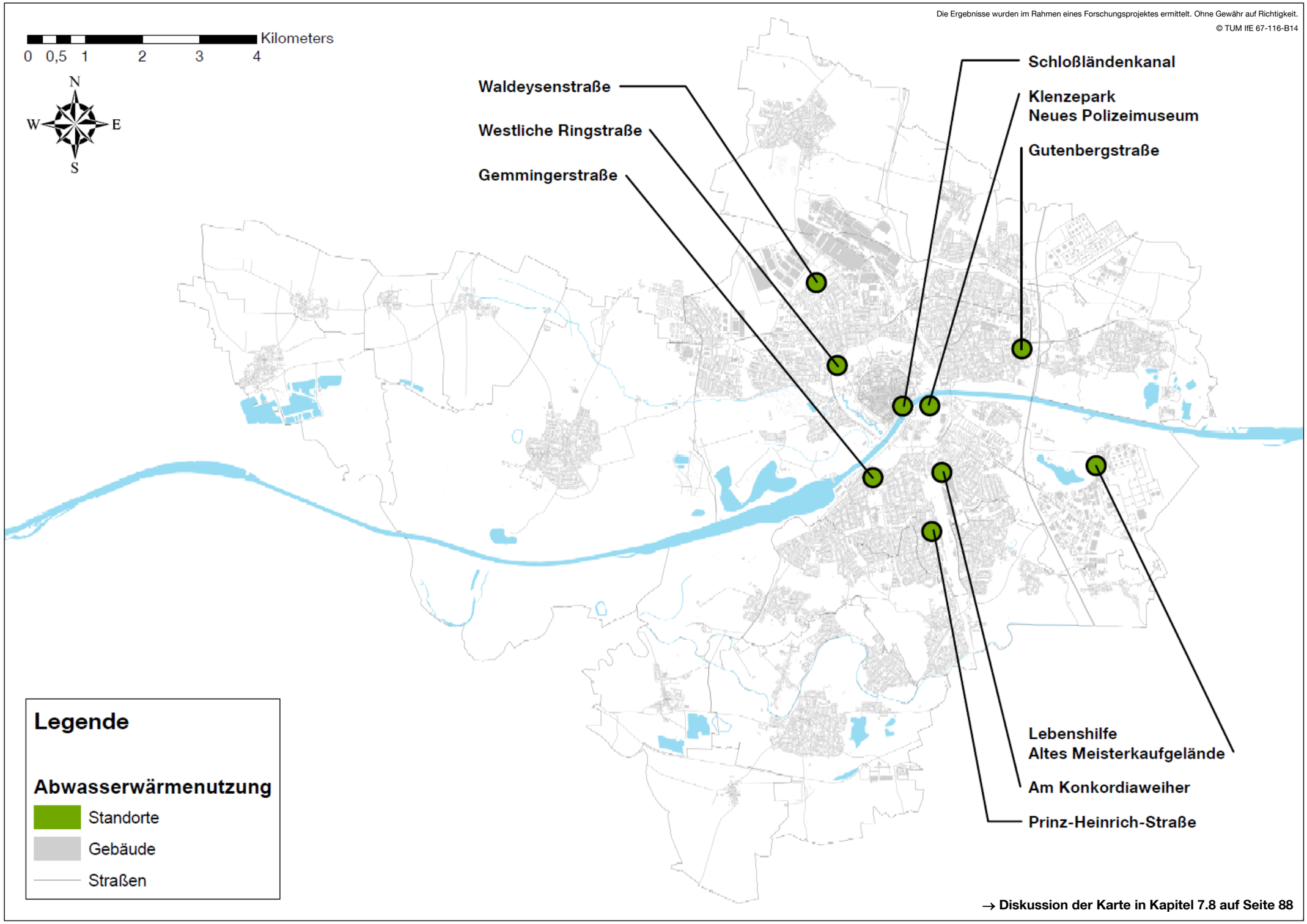

Vorhandene PV-Anlagen in Ingolstadt



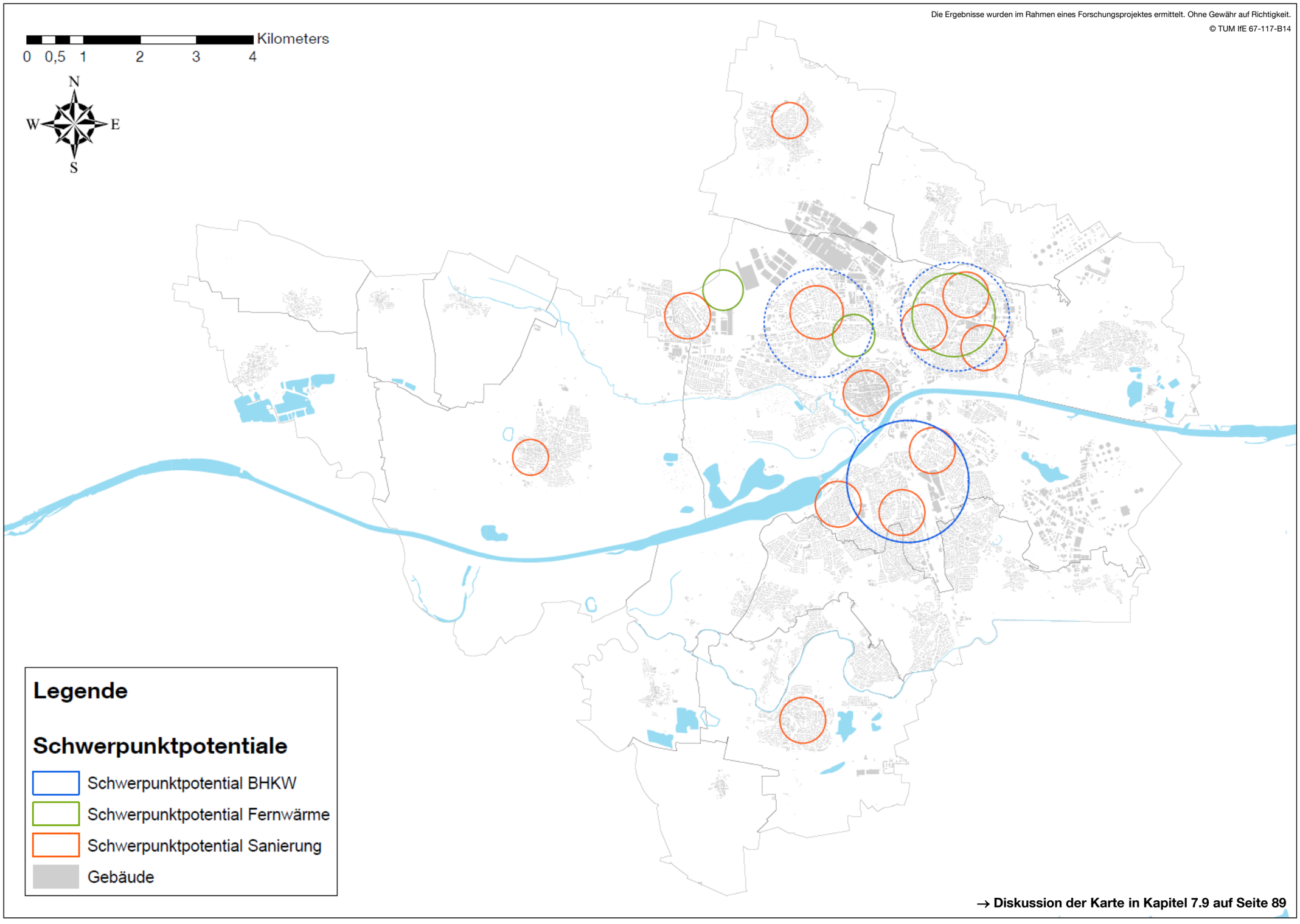

Eignung von Acker- und Dauergrünlandflächen für Kurzumtriebsplantagen




Untersuchungsraum nach Abzug aller Ausschlussflächen




Mögliche Standorte zur Nutzung von Abwasserwärme in Ingolstadt




Vergleich der abgeleiteten Schwerpunktpotentiale aus Konzepten