

Integrierte Stadtmodellierung: Flächennutzung, Verkehr, Energie, Umwelt

Kristine Brosch¹, Felix Huber¹, Björn Schwarze², Klaus Spiekermann², Michael Wegener²

¹ Fachzentrum Verkehr, Bergische Universität Wuppertal

² Spiekermann & Wegener Stadt- und Regionalforschung (S&W)

Städte sind die größten Verbraucher von Energie und Erzeuger von Treibhausgasen durch Heizung, Klimatisierung, Produktion und Verkehr, und durch ihre hohe Dichte sind sie besonders verwundbar durch negative Folgen des Klimawandels wie Hochwasser, Dürren und Hitzewellen.

Deshalb hat die Stiftung Mercator ein umfangreiches Programm zur Förderung von Kenntnissen und Bewusstsein über die Notwendigkeit und Herausforderungen der Energiewende in den Gemeinden des Ruhrgebiets gestartet. Das in diesem Kapitel vorgestellte Projekt ist Teil dieses Programms. In ihm wird ein am Institut für Raumplanung der Universität Dortmund entwickeltes Modell zur Simulation von städtischer Flächennutzung, Verkehr und Umwelt erweitert, um die Auswirkungen von Flächennutzungs-, Verkehrs- und anderen Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und zum Übergang auf erneuerbare Energien auf Siedlungsstruktur, Mobilität, Lebensqualität und Umwelt im Ruhrgebiet abzuschätzen.

Es gibt eine lange Tradition der Modellierung einzelner Dimensionen der Stadtentwicklung. Die ersten Stadtmodelle der 1960er Jahre waren Verkehrsmodelle, in denen die Auswirkungen von Verkehrsinvestitionen auf Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Modal Split und Verkehrsstaus vorhergesagt wurden. Die Verkehrsmodelle wurden durch Flächennutzungsmodelle ergänzt, in denen die Wechselwirkungen zwischen Verkehr und Standortwahl modelliert wurden. In jüngerer Zeit reagieren Modelle von Umweltaspekten wie Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen, Luftverschmutzung und Verkehrslärm auf die zunehmende Aufmerksamkeit für die Umwelt. Es gibt jedoch bis heute nur wenige Ansätze, in denen alle diese Aspekte in einem integrierten Modell zusammen behandelt werden.

Dieses Kapitel berichtet über einen der ersten Versuche, ein solches Modell zu entwickeln. Dafür wurde ein vorhandenes Flächennutzungs- und Verkehrsmodell durch Teilmodelle des Energieverbrauchs von Gebäuden und Verkehr und deren Umweltauswirkungen ergänzt, mit denen die Auswirkungen möglicher Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs im Ruhrgebiet bis zum Jahr 2050 abgeschätzt werden können. Die Ergebnisse sollen Zivilgesellschaft, Planung und Politik Hinweise geben, welche Maßnahmen auf europäischer, nationaler, regionaler und lokaler Ebene durchgeführt werden müssen, um die Ziele der Energiewende zu erreichen. Das Projekt ist eine Zusammenarbeit zwischen dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, dem Fachzentrum Verkehr der Bergischen Universität Wuppertal und Spiekermann & Wegener Stadt- und Regionalforschung, Dortmund (S&W).

1. Siedlungsentwicklung und Verkehr

Die Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen, Einkaufs- und Ausbildungseinrichtungen und anderen Zielen bestimmt die Länge und Wahl des Verkehrsmittels und damit den Energieverbrauch der täglichen Wege. Eine Möglichkeit zur Reduzierung des Verkehrsaufwands ist die Rückkehr zu verdichteten, durchmischten Siedlungsformen durch Beschränkung der Zersiedlung des Umlands. Infolge seiner altindustriellen Vergangenheit und polyzentrischen Siedlungsstruktur könnte das Ruhrgebiet durch die Umwidmung ehemaliger Industrieflächen über ein besonderes Zukunftspotential für eine flächen-, verkehrs- und energie-sparende Stadtlandschaft verfügen (Abbildung 1).

In dem Projekt wurden deshalb verschiedene Konzepte zur Förderung verdichteter, durchmischter Stadtstrukturen wie umfassende Nachverdichtung (kompakte Stadt), die Stärkung von Klein- und Mittelzentren (polyzentrische Stadt) und die Förderung von Verdichtungen an den Haltestellen des Schienennahverkehrs (TOD) durchgespielt. Aber auch ohne neue Wohngebäude besteht ein großes Potential zur inneren Reorganisation der Stadt, indem Haushalte näher an ihre Arbeits- und Ausbildungsplätze ziehen, wenn die Kosten der Raumüberwindung steigen. Höhere Kraftstoffpreise sind deshalb ebenfalls ein Mittel zur Reduzierung täglicher Wegelängen durch Umzüge. Eine weitere Gruppe von Maßnahmen versucht, die Akzeptanz energetischer Sanierungen von Wohn- und Gewerbegebäuden zu erhöhen.

Im Bereich Verkehr verfügt das Ruhrgebiet über eine in zwei Jahrhunderten entwickelte ausgereifte Verkehrsinfrastruktur, die seine polyzentrischen Siedlungskerne miteinander verbindet (Abbildung 2). Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, den Energieverbrauch des Verkehrs zu verringern. Dabei kann man zwischen Pull- und Push-Maßnahmen unterscheiden: Pull-Maßnahmen arbeiten mit positiven Anreizen wie Verbesserung des Angebots oder Verbilligung der Fahrpreise im öffentlichen Personennahverkehr oder Ausbau des Rad- und Fußwegenetzes. Push-Maßnahmen machen den Autoverkehr durch höhere Kosten, geringere Geschwindigkeiten oder Parkraumbeschränkungen weniger attraktiv. Sowohl Pull- als auch Push-Maßnahmen wurden im Projekt untersucht.

2. Das IRPUD-Modell

Das am Institut für Raumplanung der Universität Dortmund entwickelte und bisher für das östliche Ruhrgebiet angewendete Modell von Flächennutzung, Verkehr und Umwelt in Stadtregionen wurde auf das ganze Ruhrgebiet erweitert und zur Abschätzung der Auswirkungen von Flächennutzungs- und Verkehrsmaßnahmen zur Reduzierung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen auf Mobilität, Lebensqualität und Umwelt im Ruhrgebiet angewendet. Das Modell prognostiziert für jede Simulationsperiode intraregionale *Standortentscheidungen* von Unternehmen, Wohnungsbauinvestoren und Haushalten, die aus ihnen resultierenden *Wanderungen* und *Verkehrsströme*, die Entwicklung der *Bautätigkeit* und *Flächennutzung* und die Wirkung öffentlicher *Planungseingriffe* in den Bereichen Wirtschaftsförderung, Wohnen, Infrastruktur und Verkehr (Wegener 2011).

Abbildung 3 ist eine schematische Darstellung der wichtigsten im Modell abgebildeten Teilsysteme und Wechselwirkungen zwischen ihnen.

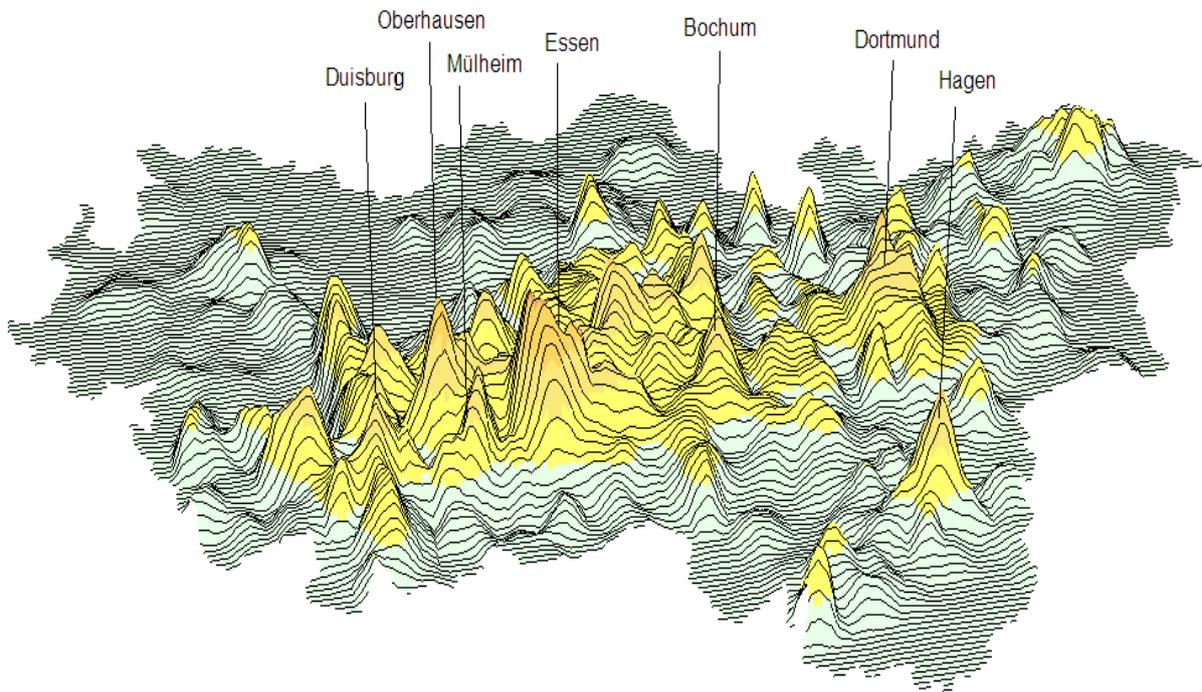


Abbildung 1. Das polyzentrische Ruhrgebiet: Einwohnerdichte

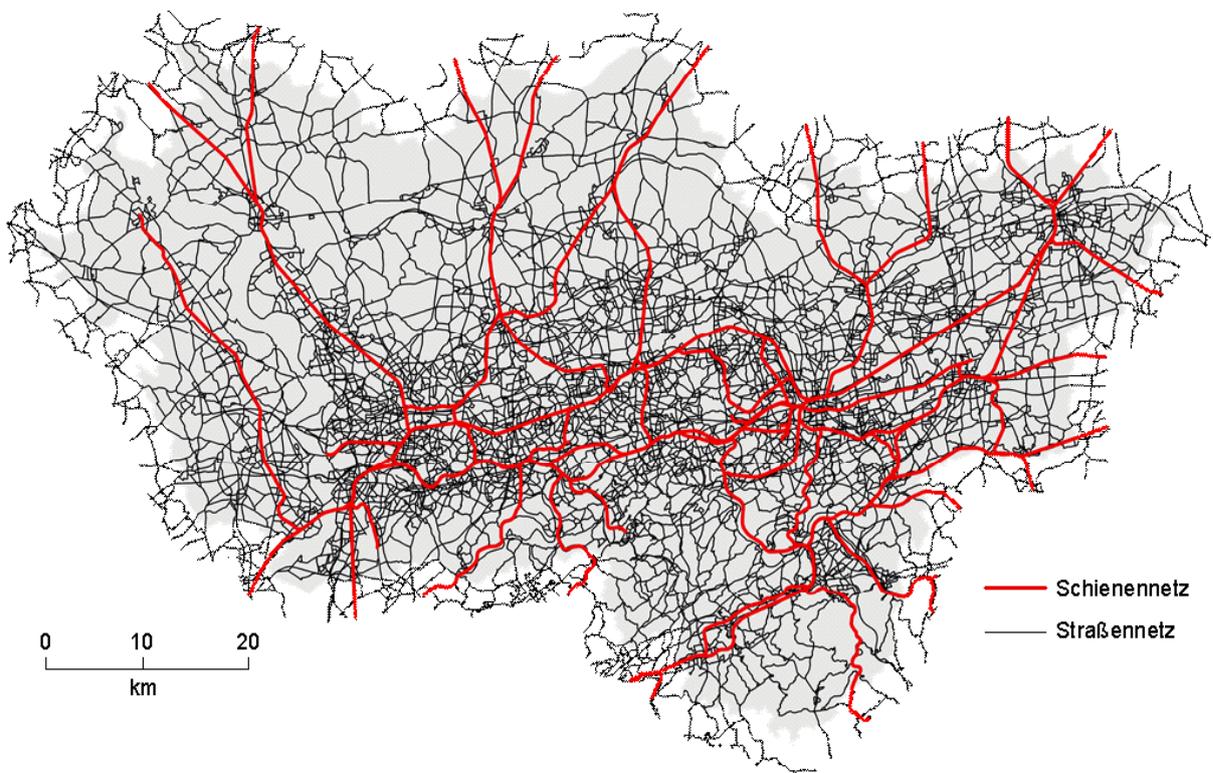


Abbildung 2. Das polyzentrische Ruhrgebiet: Verkehrsnetz

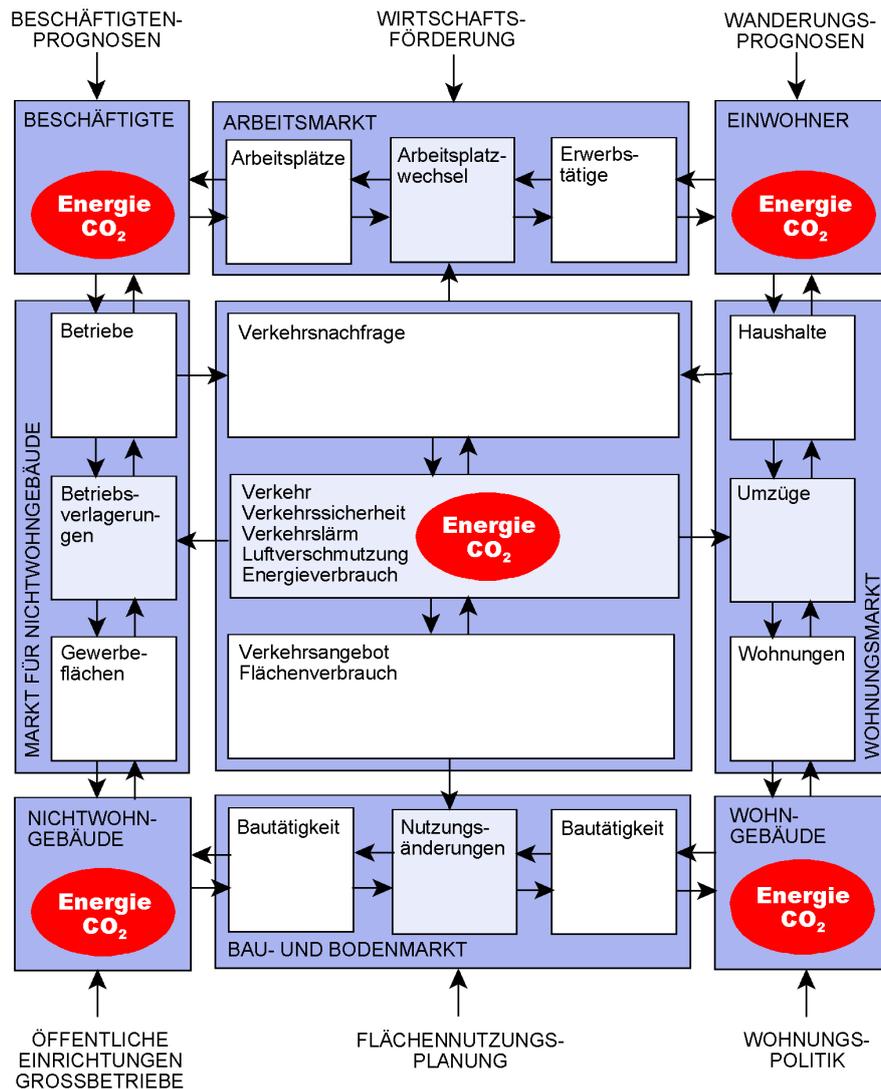


Abbildung 3. Das IRPUD-Modell

Die vier Quadrate in den Ecken des Diagramms zeigen die hauptsächlichsten Bestandgrößen des Modells: Bevölkerung, Arbeitsplätze, Wohnungen und Nichtwohngebäude (Industrie- und Gewerbegebäude und öffentliche Einrichtungen). Die Akteure, die diesen Bestandgrößen entsprechen, sind Individuen, Haushalte, Beschäftigte, Unternehmen und Bauinvestoren. Diese Akteure interagieren auf fünf Teilmärkten der Stadtentwicklung. Die fünf Teilmärkte und die auf ihnen ablaufenden Transaktionen sind:

- der Arbeitsmarkt: Einstellungen und Entlassungen,
- der Markt für Nichtwohngebäude: Betriebsansiedlungen und -schließungen,
- der Markt für Wohngebäude: Neubau, Modernisierung und Abriss,
- der Wohnungsmarkt: Zuwanderung, Abwanderung, Einzüge und Umzüge,
- der Verkehrsmarkt: Ortsveränderungen und ihre Folgen Erreichbarkeit, Staus, Unfälle, Lärm und Energieverbrauch und CO₂-Emissionen,

Für jeden Teilmarkt zeigt das Diagramm Angebot und Nachfrage und die sich daraus ergebenden Markttransaktionen. Das Angebot in den Teilmärkten ist eine Funktion der Nachfrage; die Nachfrage in der Gesamtregion eine Funktion exogener Vorgaben. Die Nachfrage in den Teilräumen der Stadtregion ist eine Funktion der Gesamtnachfrage; ihre räumliche Verteilung wird durch das Angebot an Arbeitsplätzen, Gebäuden und Flächen in den Teilräumen und dessen Attraktivität bestimmt. Die Attraktivität des Angebots ist allgemein eine benutzergruppenspezifische Funktion von Lage (Erreichbarkeit), Qualität und Preis. Die großen Pfeile in der Abbildung bezeichnen exogene Vorgaben: entweder Prognosen der Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung der Gesamtregion auf der Grundlage langfristiger ökonomischer und demographischer Trends oder Politikmaßnahmen in den Bereichen Wirtschaftsförderung, Wohnungsbau, öffentliche Einrichtungen und Verkehr. Die fünf Ellipsen zeigen zusätzlich, in welchen Bereichen des im Modell abgebildeten Systems Energieverbrauch und CO₂-Emissionen berechnet werden sollen.

Im Folgenden werden zwei neue Teilmodelle des Stadtmodells, *Gebäudeenergie* und *Elektromobilität*, beschrieben und erste mit ihnen erzeugte Ergebnisse vorgestellt:

3. Gebäudeenergie

Es gibt verschiedene Gründe, Wohngebäude zu modernisieren. Neben persönlichen Gründen möchten die Gebäudeeigentümer vor allem die Qualität und den Wohnkomfort ihrer Gebäude verbessern. Grundstückseigentümer investieren in ihre Gebäude, wenn sie erwarten, dass sie ihren Gewinn vermehren können, wenn sie diese verkaufen oder vermieten. Der Anteil, der in jeder Zeitperiode modernisiert wird, wird für jeden Gebäudetyp in jeder Zone als eine Funktion der erwarteten Mieterhöhung in dem Teilmarkt nach der Modernisierung geschätzt. Dazu verwenden die Grundstückseigentümer ein Mieterwartungsmodell auf der Grundlage der Leerstandsquote: Abgesehen vielleicht von überhitzten Wohnungsmärkten in Innenstädten sind Eigentümer eher geneigt, ihre Wohnungen zu modernisieren, wenn der Anteil der leeren Wohnungen gering ist.

Bei steigenden Energiepreisen ist die mögliche Energieeinsparung durch energetische Sanierung eine zusätzliche Motivation. Bei der energetischen Sanierung berücksichtigen die Eigentümer darüber hinaus, ob sich die Investitionen in Energieeffizienz rentieren. Das Maß hierfür ist die Amortisationszeit, d.h. die Anzahl Jahre, nach denen sich die energetische Sanierung durch Energieeinsparungen rentiert (Fuerst und Wegener 2016, Bringezu et al. 2010). Diese hängt wesentlich von der zugrunde gelegten Annahme über die zukünftige Entwicklung der Heizkosten ab. Bei Vermietern tritt zusätzlich die Einschränkung hinzu, dass die Vermieter nur einen Teil der zu erwartenden Energieeinsparungen durch Mieterhöhungen wieder hereinbekommen, was die Amortisationszeit verlängert.

Die folgenden Abbildungen 4 und 5 zeigen die Wirkungen einer Strategie zur Beschleunigung der energetischen Sanierung von Wohngebäuden. Szenario A00 ist das Basisszenario, in dem wie bisher nur geringe öffentliche Fördergelder zur Subventionierung energetische Sanierungen eingesetzt werden. Man sieht, dass trotzdem Wohnungen modernisiert werden, wenn auch je nach Gebäudetyp und Eigentumsverhältnissen mit unterschiedlicher Energieeffizienz. Im exemplarischen Szenario A31 wird dagegen angenommen, dass energetische Sanierungen ab dem Jahre 2015 mit der Hälfte der Investitionssumme subventioniert werden, hierdurch verringert sich nach Abzinsung die Amortisationszeit um ein Drittel, und der Anteil der energetisch sanierten Wohnflächen steigt auf rund die Hälfte.

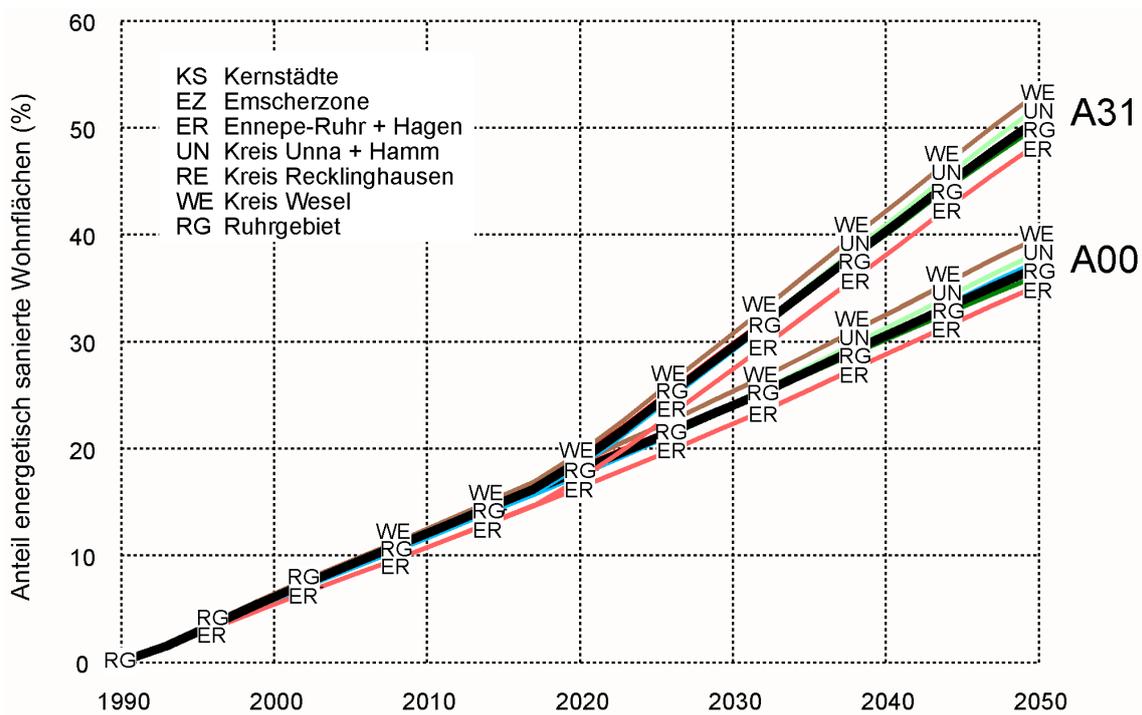


Abbildung 4. Teilmodell Gebäudeenergie: Anteil 1990-2050 energetisch sanierte und neu-gebaute Wohnflächen im Basisszenario A00 und Förderszenario A31

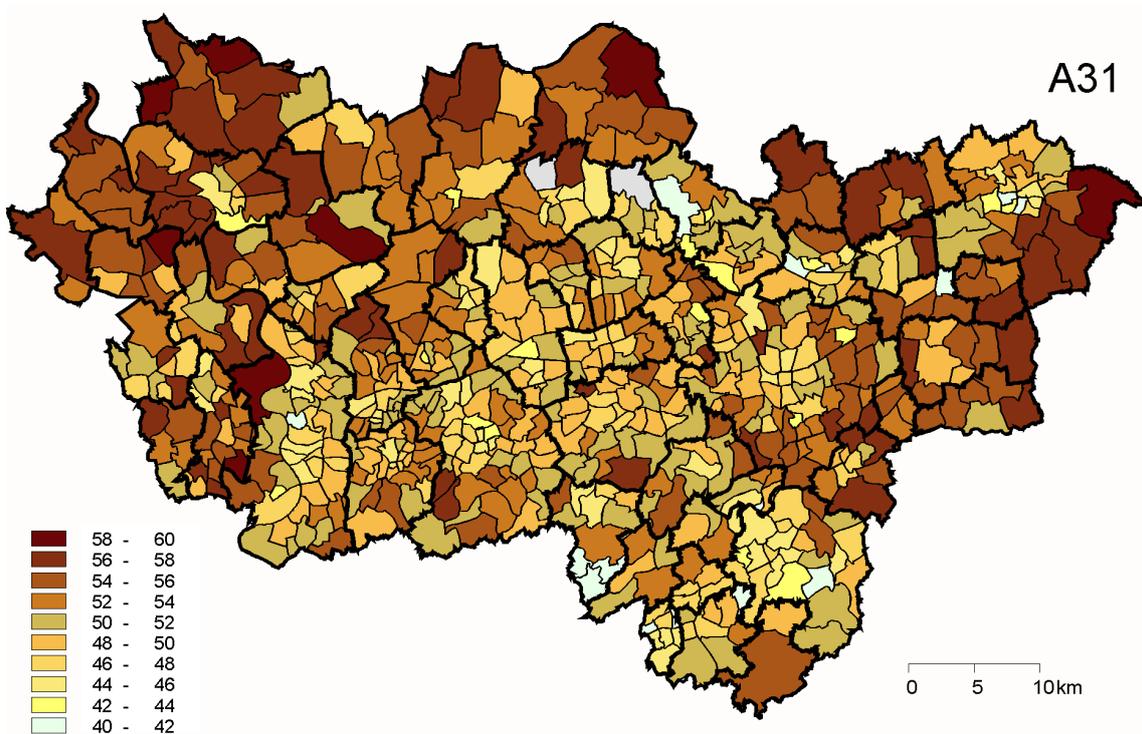


Abbildung 5. Teilmodell Gebäudeenergie: Anteil 1990-2050 energetisch sanierte und neu-gebaute Wohnflächen im Förderszenario A31.

Die mit dem Gebäudeenergiemodell untersuchten Szenarien unterscheiden sich von den Energieszenarien des Wuppertal Instituts (Bringezu et al. 2010), des Klimaschutzplans NRW (WI 2014) und des Bundesumweltministeriums (BMU 2013) dadurch, dass in ihnen nicht gefragt wird, wie die Energiewendeziele der Landes- und Bundesregierung erreicht werden können, sondern, ob die Gebäudeeigentümer sich bei gegebenen Sanierungskosten, Energiepreisen und Förderbedingungen für energetische Sanierungen entscheiden und in welchem Umfang. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass bei realistischen Annahmen über Fördermöglichkeiten und Amortisationszeiten diese Ziele nicht erreicht werden.

Die räumliche Verteilung der energetischen Sanierungen ist von Gebäudetyp und Eigentumsform bestimmt. Einerseits sind die Sanierungskosten je Quadratmeter Wohnfläche bei Mehrfamilienhäusern niedriger als bei Einfamilienhäusern. Andererseits ist der Anteil der Mietwohnungen bei Mehrfamilienhäusern größer, was wie bereits erläutert zu geringerer Sanierungsbereitschaft der Eigentümer führt. Das Ergebnis ist, dass wie auch bei Schüle et al. (2015) die Sanierungsrate im Stadtumland wegen des dortigen größeren Anteils an Einfamilienhäusern und Wohneigentum höher ist als in den Innenstädten.

4. Elektromobilität

Die Simulation der zunehmenden Verbreitung von Elektro-Pkw und Elektrofahrrädern erfolgt im Untermodell *Fahrzeugverfügbarkeit* des Teilmodells *Verkehr*. Darin wird bisher die Anzahl Pkw je Haushalt jeder Einkommensgruppe in jeder Zone als Funktion von deren monatlichem Verkehrsbudget, den erwarteten Verkehrsausgaben und den Kosten, einen Pkw in der Zone zu halten, geschätzt. Dabei sind die monatlichen Pkw-Kosten die bei einer durchschnittlichen Lebensdauer auf einen Monat umgelegten Kosten von Kauf und Wartung des Pkw. Dies entspricht der Annahme, dass Haushalte ihre Verkehrsbudgets zwischen Ausgaben für Fahrzeuge und Wege aufteilen müssen. Die Verkehrsbudgets der Haushalte sind elastisch, um zu berücksichtigen, dass am Stadtrand oder im Stadtumland wohnende Haushalte mehr für Verkehr und weniger für Wohnen ausgeben als in der Innenstadt wohnende Haushalte. Die Länge der täglichen Wege nach Wegezweck und Verkehrsart sind von deren Kosten abhängig: bei freiwilligen Wegen (Einkaufs- und Freizeitwege) auch deren Zahl: bei steigenden Wegekosten werden weniger und bei sinkenden Wegekosten mehr freiwillige Wege unternommen.

Da das Teilmodell Verkehr aggregiert ist, kann in ihm, anders als in aktivitätsorientierten Verkehrsmodellen, die Zahl der berücksichtigten Verkehrsarten nicht beliebig vermehrt werden. Deshalb werden in jeder Periode die Anteile der Elektro-Pkw als Funktion ihrer fixen Kosten (Anschaffungs- und Haltungskosten) und variablen Kosten (Wegekosten) im Verhältnis zu denen konventioneller Pkw geschätzt. Die Anteile von Elektro-Pkw werden bei den Streckenbelastungen detailliert ausgewiesen, um eine realistische Berechnung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen zu ermöglichen.

Die nachfolgenden Abbildungen 6 und 7 zeigen die Wirkung einer Strategie zur Förderung der Elektromobilität im Stadtverkehr. Szenario A00 ist wiederum das Basisszenario, in dem keine öffentlichen Subventionen zur Förderung der Elektromobilität angenommen werden. Im exemplarischen Szenario A42 hingegen wird ab 2015 der Kauf von Elektro-Pkw mit einem Drittel ihres Kaufpreises subventioniert. Außerdem werden öffentliche Ladestationen in Innenstadtbereichen aus Steuermitteln finanziert.

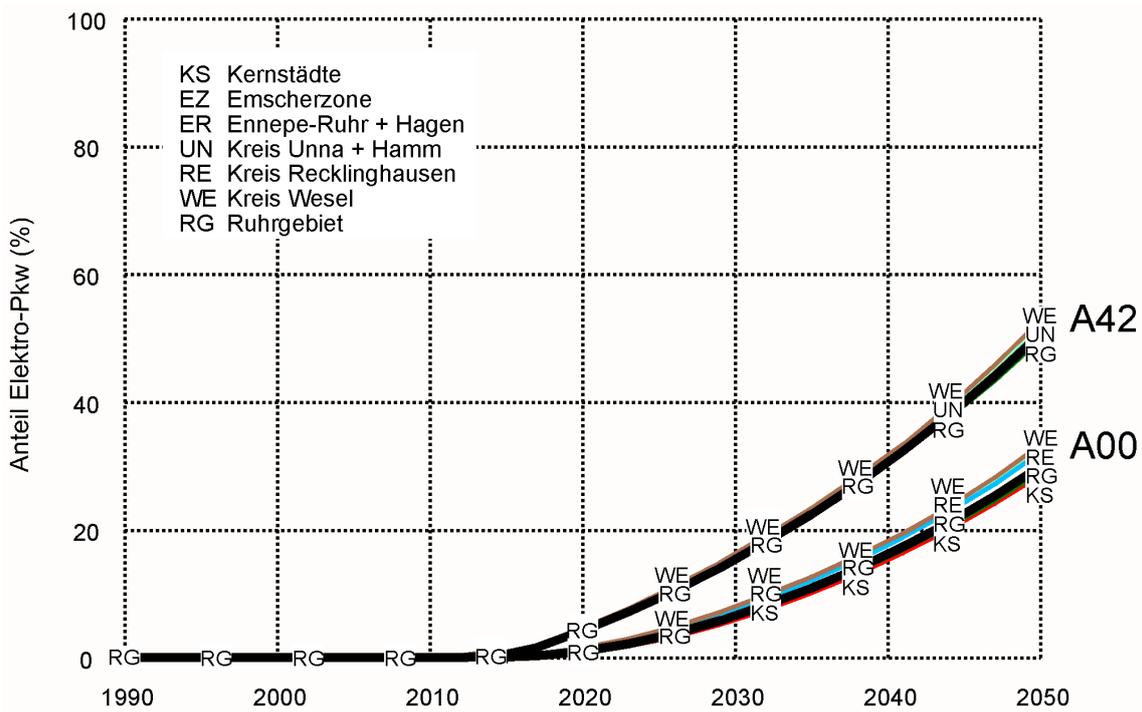


Abbildung 6. Teilmodell Elektromobilität: Anteil Elektro-Pkw (%) 1990-2050 im Basisszenario A00 und Förderszenario A42

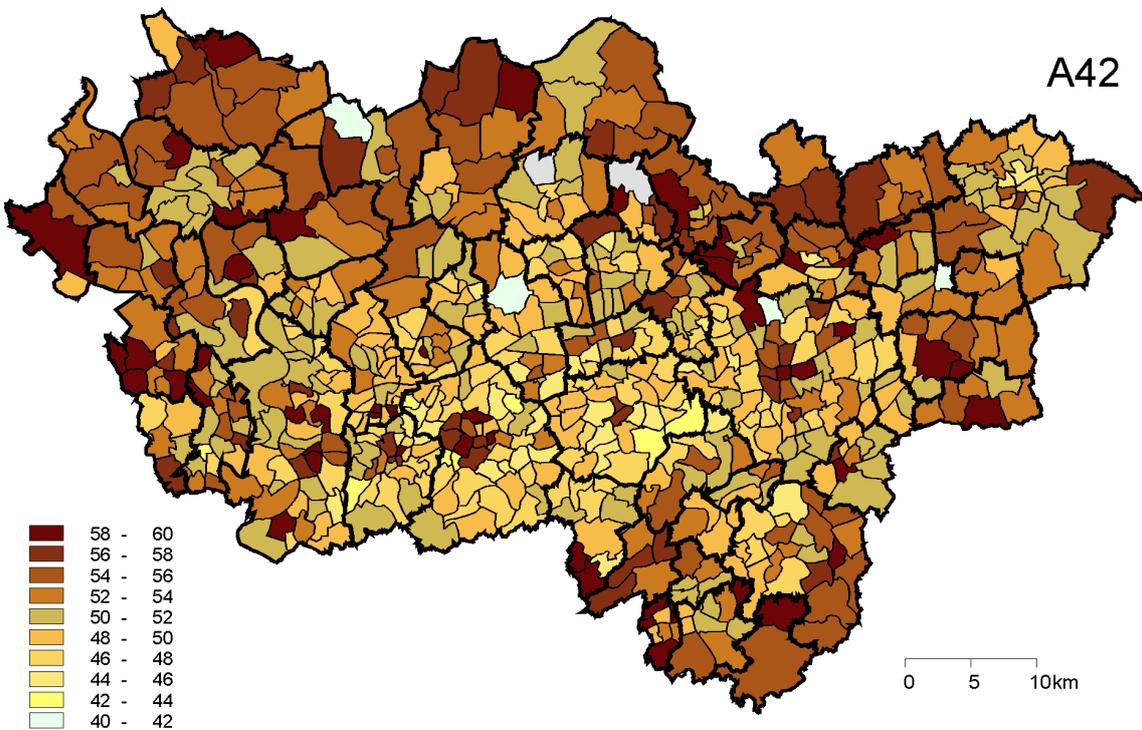


Abbildung 7. Teilmodell Elektromobilität: Anteil Elektro-Pkw 2050 im Förderszenario A42

Abbildung 6 zeigt, dass auch im Basisszenario A00 ohne zusätzliche Anreize bis zum Jahre 2050 rund 30 Prozent aller Pkw elektrisch betrieben werden, wenn auch das Ziel der Bundesregierung, bis zum Jahre 2020 eine Million Elektro-Pkw in Deutschland zu sehen, nicht erreicht wird. Wenn dagegen sowohl der Kauf von Elektro-Pkw als auch die Ladeinfrastruktur subventioniert wird, schätzt das Modell eine Steigerung des Anteils von Elektro-Pkw auf die Hälfte aller Pkw. Zu beachten ist aber, dass in diesem Szenario keine Verbesserung der Ladeinfrastruktur auf Fernstraßen und Autobahnen angenommen wurde, was die Analyse auf Kurzfahrten in Stadtgebieten beschränkt.

Die vom Modell vorausgesagte räumliche Verteilung der Marktdurchdringung der Elektromobilität spiegelt wider, dass mittelfristig der Großteil der Elektro-Pkw in Einfamilienhausgebieten im Stadtumland angeschafft werden, weil nur hier preiswerte Landemöglichkeiten in der Garage oder auf dem eigenen Grundstück zur Verfügung stehen. Erst wenn auch in den dichtbebauten Innenstädten ausreichend Ladestationen zur Verfügung stehen, dürften auch dort mehr Elektro-Pkw angeschafft werden. Da das im Förderszenario A42 der Fall ist, ist die Marktdurchdringung der Elektromobilität ausgeglichener als im Basisszenario, aber dennoch nach wie vor geringfügig stärker im Stadtumland.

5. Umweltauswirkungen

Als ein Beispiel für die ganzheitliche Betrachtungsweise, die dem integrierten Stadtmodell zugrunde liegt, wird zum Abschluss die gemeinsame Auswirkung der beiden gezeigten Szenarien auf die Umwelt analysiert (Abbildung 8).

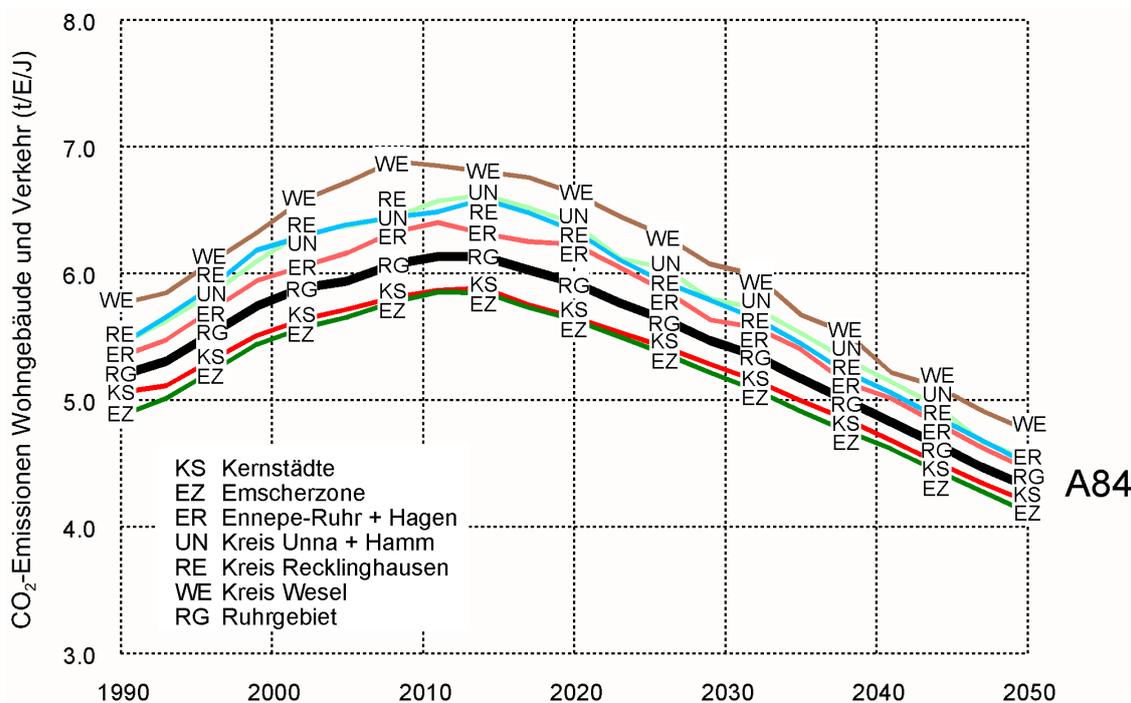


Abbildung 8. CO₂-Emissionen Wohnen/Verkehr 1990-2050 im Kombinationsszenario A84

Abbildung 8 zeigt die CO₂-Emissionen der Förderung der energetischen Gebäudesanierung in Szenario A31 und der Elektromobilität in Szenario A42 unter Berücksichtigung der zu erwartenden Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung im Kombinationsszenario A84.

Man sieht, dass durch die Kombination von Maßnahmen aus unterschiedlichen Planungsbereichen beachtliche Treibhausgasreduktionen erzielt werden können. Man erkennt auch, dass die CO₂-Emissionen in den Umlandgemeinden in den Kreisen Wesel, Unna und Recklinghausen wegen ihres größeren Anteils an Einfamilienhäusern und den von ihnen ausgehenden längeren Autofahrten trotz der Fördermaßnahmen nach wie vor erheblich größer sind als in den höher verdichteten Kernstädten oder der Emscherzone.

6. Zusammenfassung

Die Simulationsergebnisse lassen erkennen, dass zur Erreichung der ambitionierten Klimaschutzziele der Landes- und Bundesregierung die bisherigen Fördermaßnahmen bei weitem nicht ausreichen, und dass es daher notwendig sein wird, sie durch ergänzende Planungsmaßnahmen zu unterstützen. Das könnten einerseits Pull-Maßnahmen sein wie Verbesserung des Angebots im öffentlichen Personennahverkehr oder Ausbau des Radverkehrsnetzes, die mehr Autofahrer dazu motivieren, umweltfreundlichere Verkehrsmittel zu benutzen, oder Push-Maßnahmen in Form höherer Preise für fossile Energien, etwa durch eine Erhöhung der Mineralölsteuer, die mehr Autofahrer zum Umsteigen auf Elektromobilität bewegen und energetische Sanierungen attraktiver machen würde.

Diese Maßnahmen werden voraussichtlich von vielen als Beeinträchtigung ihrer Mobilität und Lebensqualität aufgenommen werden. Es ist deshalb notwendig, die "unbequemen Wahrheiten" mit Einfühlungsvermögen zu kommunizieren und deutlich zu machen, dass sie nicht nur Einschränkungen, sondern auch Vorteile wie verbesserte Umweltqualität und die Wiederbelebung nachbarschaftlicher Beziehungen mit sich bringen.

Literatur

Bringezu, Stefan; Hanke, Thomas; Schütz, Helmut; Soukup, Ole; Viebahn, Peter; Fischedick, Manfred. (2010): Indikatoren / Bottom-up Modelle und Szenarien. Abschlussbericht des Arbeitsschritts 6 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRess). Ressourceneffizienz-Paper 6.7. Wuppertal: Wuppertal Institut. http://ressourcen.wuppertalinst.org/downloads/MaRess_AP6_7_AbschlussBer.pdf (zugegriffen am 13.04.2016).

BMU (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht. Berlin: Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_anderer/12.03.29.BMU_Leitstudie2011/BMU_Leitstudie2011.pdf (zugegriffen am 13.04.2016).

Fuerst, Franz; Wegener, Michael (2016): Energy efficiency of buildings: a new challenge for urban models. In Jin, Y. (Hg.): *Applied Urban Modelling: Assessing Pathways towards Energy and Climate Wise Regions..* Cambridge: British Academy. http://www.spiekermann-wegener.de/pub/pdf/FFMW_British_Academy_081214.pdf (zugegriffen am 13.04.2016).

Schüle, Ralf; Kaselofsky, Jan; März, Steven (2015): *Inanspruchnahme von Klimaschutz- und Förderprogrammen in Kommunen des Ruhrgebietes*. Wuppertal: Wuppertal Institut. <http://www.energiewende-ruhr.de/index.php?id=39> (zugegriffen am 21.04.2016).

Wegener, Michael (2011): The IRPUD Model. Arbeitspapier 11/01. Dortmund: Spiekermann & Wegener Stadt- und Regionalforschung, Dortmund http://www.spiekermann-wegener.de/mod/pdf/AP_1101_IRPUD_Model.pdf Zugegriffen am 13.04.2016).

WI (2014): Zusammenfassung der Szenarioberechnungen des Beteiligungsprozesses. Anlage 5.4 zum Klimaschutzplan. Wuppertal: Wuppertal Institut. https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Dateien/Download-okumente/Sonstiges/5.4_Zusammenfassung_der_Szenarioberechnungen_Beteiligungsprozess_1.12.2014.pdf (zugegriffen am 13.04.2016).