

# Szenarioanalysen für eine energieautarke Stadt 2050

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science (M.Sc.)“  
im Studiengang Wirtschaftsingenieur der Fakultät für Elektrotechnik und Informa-  
tik, der Fakultät für Maschinenbau und der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät  
der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Name: Schirmer



Vorname: Jan Philipp



Prüfer: Prof. Dr. M. H. Breitner

Ort, den\*: Hannover, 31.03.2014

\*(Datum der Beendigung der Arbeit)

# Inhalt

Abbildungsverzeichnis .....	V
Tabellenverzeichnis.....	VI
1 Einleitung.....	1
2 Endenergiebedarf von Städten .....	4
2.1 Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser.....	7
2.2 Endenergiebedarf für den Personennahverkehr .....	11
2.3 Endenergiebedarf für andere Verbrauchsbereiche.....	14
3 Endenergiebereitstellung.....	18
3.1 Windenergie-Anlagen .....	19
3.2 Photovoltaik-Anlagen.....	22
3.3 Solarthermie-Anlagen.....	24
3.4 Biogas-Anlagen.....	27
3.5 Wärmepumpen.....	29
3.6 Energiespeicher.....	31
3.6.1 Power-to-Gas-Anlagen .....	31
3.6.2 Flussbatterien.....	33
3.6.3 Wärmespeicher.....	34
4 Szenarioanalysen.....	37
4.1 Definition der zu untersuchenden Szenarien .....	37
4.2 Methodisches Vorgehen.....	41
4.2.1 Modellierung der benötigten Endenergie.....	47
4.2.1.1 Raumwärme und Warmwasser.....	49

4.2.1.2	Personennahverkehr.....	52
4.2.1.3	Andere Verbrauchsbereiche.....	55
4.2.2	Modellierung der bereitstellbaren Endenergie .....	57
4.2.2.1	Eingeschränkt verfügbare Anlagen.....	58
4.2.2.2	Uneingeschränkt verfügbare Anlagen .....	60
4.3	Auswertung.....	61
4.3.1	Szenarien für die Endenergiebereitstellung.....	61
4.3.1.1	Strom .....	62
4.3.1.2	Warmwasser.....	70
4.3.1.3	Gas.....	72
4.3.2	Szenarien für die Deckung des Endenergiebedarfs .....	73
4.3.2.1	Raumwärme und Warmwasser.....	73
4.3.2.2	Personennahverkehr.....	79
4.3.2.3	Andere Verbrauchsbereiche.....	83
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	87
Anhang .....		91
	VBA-Quelltext für die Simulation der von einer Windenergie-Anlage täglich bereitstellbaren Strommenge .....	91
	VBA-Quelltext für die Simulation der täglich einfallenden Globalstrahlung .....	93
	VBA-Quelltext für die Erzeugung normalverteilter Zufallszahlen.....	94
	Literaturverzeichnis .....	95
	Ehrenwörtliche Erklärung.....	100

# 1 Einleitung

Eine Stadt wird energieautark bis zum Jahre 2050. Konzepte der Energieautarkie verfolgen das Ziel, die von einer Stadt benötigte Energie mit Anlagen innerhalb der Stadt bereitzustellen. Als Energiequellen könnten Sonne, Wind und Biomasse dienen. Natürliche Fluktuationen von Solar- und Windenergie können durch Energiespeicher ausgeglichen werden. Sind diese ausgeschöpft, dann könnten Gaskraftwerke zum Einsatz kommen, die beispielsweise mit den Produkten der Biogasanlagen laufen.

Die Art und Weise, wie Energie genutzt und bereitgestellt wird, befindet sich im Umbruch. Gegenwärtig wird eine Vielzahl von Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung neben den konventionellen Anlagen für die Bereitstellung von Strom genutzt. Zu diesen konventionellen Anlagen für die Bereitstellung von Strom zählen zum Beispiel Atomkraftwerke, Kohlekraftwerke und Gaskraftwerke. Windenergie-Anlagen, Photovoltaik-Anlagen und Biogas-Anlagen hingegen sind den neuartigen Anlagen für die Bereitstellung von Strom zuzuordnen. Der Anteil der mit regenerativen Anlagen bereitgestellten Strommenge an der insgesamt bereitgestellten Strommenge ist in den letzten Jahren stark gestiegen und wird tendenziell weiter ansteigen. Folglich beginnen die neuartigen Anlagen, die konventionellen Anlagen für die Bereitstellung von Strom zu verdrängen. Ähnliche Entwicklungen können für andere energiebereitstellende Anlagen, zum Beispiel wärmebereitstellende Anlagen, derzeit in ihren Anfängen beobachtet werden. Dazu gehört etwa die vermehrte Nutzung von Solarthermie-Anlagen für die Bereitstellung von Wärme für die Warmwasserbereitung.

Die Verdrängung konventioneller Anlagen durch neuartige Anlagen ist einerseits mit positiven Auswirkungen verbunden. Die partielle Nutzung erneuerbarer Energieträger verringert die Abhängigkeit von nur begrenzt verfügbaren fossilen Energieträgern. Die Verdrängung konventioneller Anlagen durch neuartige Anlagen birgt aber andererseits langfristige Herausforderungen. Solange die neuartigen Anlagen in ein funktionierendes Energiesystem eingebunden werden können, ist es kein Problem, dass mit ihnen allein kein funktionierendes und wirtschaftliches Energiesystem aufgebaut werden kann. Dies wird jedoch

langfristig bei einer zunehmenden Verdrängung der konventionellen Anlagen notwendig werden. Es ist sinnvoll, sich bereits frühzeitig mit den Möglichkeiten zur Umsetzung eines solchen Energiesystems zu beschäftigen. Dies geschieht im Rahmen dieser Arbeit, indem untersucht wird, welche Möglichkeiten im Jahr 2050 bestehen, eine Stadt durch den Einsatz neuartiger und erneuerbare Energien nutzender Anlagen autark mit Energie zu versorgen.

Diese Ausgangslage verdeutlicht einerseits die eminente Bedeutung des Umbaus der Energieversorgung in deutschen Städten und Gemeinden. Andererseits lässt sich ein Forschungsdefizit in Bezug auf die Art und Weise feststellen, wie dieses intelligente Energiemanagement aufgebaut sein soll. Die folgenden Forschungsfragen verdeutlichen, welche Aspekte in dieser Arbeit von besonderer Bedeutung sind:

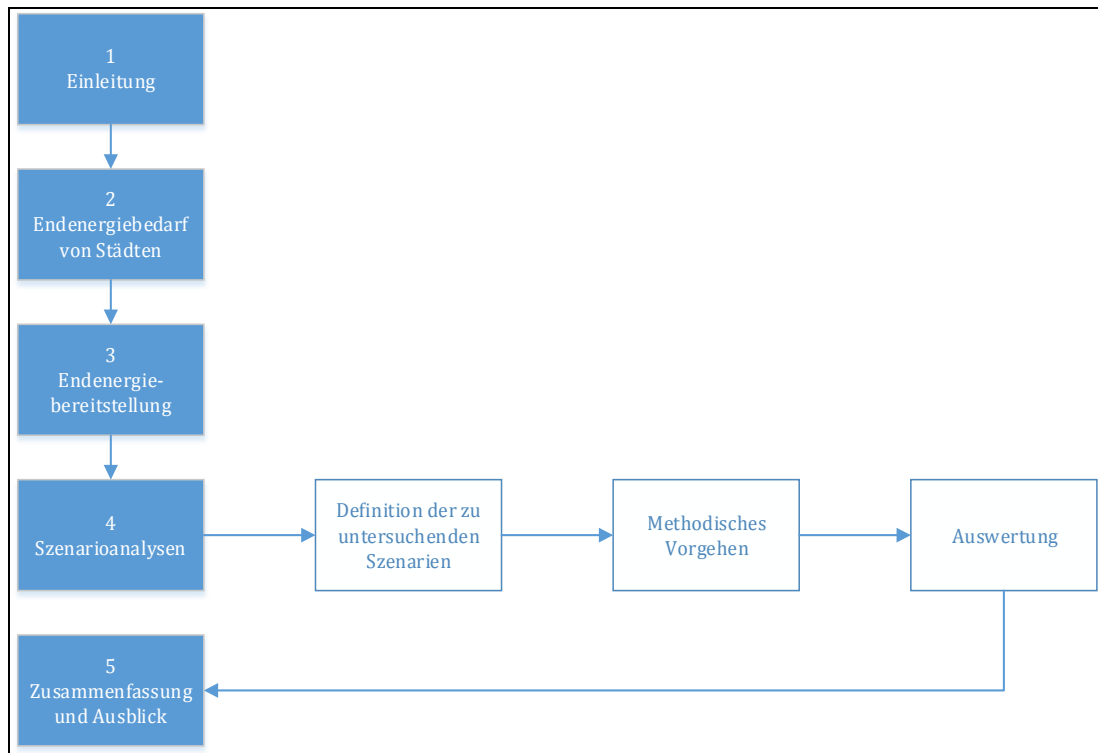
- Wann wird in einer Stadt welche Menge an Energie benötigt?
- Wann kann in einer Stadt durch die neuartigen Anlagen wie viel Energie bereitgestellt werden?
- Welche Möglichkeiten bestehen, um die neuartigen Anlagen zu kombinieren, und welche sind sinnvoll?

Die auf die erste und zweite Forschungsfrage bezogenen Untersuchungsergebnisse werden verwendet, um der dritten Forschungsfrage nachzugehen. Folglich besteht jeweils eine Abhängigkeit zwischen den ersten beiden Forschungsfragen und der dritten Forschungsfrage.

Der Aufbau dieser Arbeit wird in Abbildung 1-1 anhand der obersten Gliederungsebene dargestellt. Der Aufbau der Szenario-Analysen wird als Schwerpunkt dieser Arbeit in der Abbildung detailliert dargestellt.

Im Anschluss an die Einleitung in Abschnitt 1 wird in Abschnitt 2 der Endenergiebedarf von Städten untersucht. Die neuartigen und erneuerbare Energien nutzenden Anlagen für die Endenergiebereitstellung werden anschließend in Abschnitt 3 untersucht. Die in Abschnitt 2 und Abschnitt 3 gewonnenen Erkenntnisse über den Endenergiebedarf und die Endenergiebereitstellung werden schließlich in Abschnitt 4 dazu verwendet, Antworten auf die Forschungsfragen zu finden.

Dafür werden innerhalb von Abschnitt 4 zunächst die zu untersuchenden Szenarien für eine autark mit Energie versorgte Stadt festgelegt. Darauf folgend wird das methodische Vorgehen entwickelt und abschließend die Auswertung der entsprechend untersuchten Szenarien präsentiert. Abschnitt 5 folgt mit einer Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse dieser Arbeit und einem Ausblick auf mögliche Folgeuntersuchungen.



**Abbildung 1-1:** Aufbau dieser Arbeit

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zu Szenarien für den Ausbau erneuerbarer Energien, so dass eine Stadt im Jahr 2050 energieautark sein kann, beschäftigte sich mit folgenden Forschungsfragen:

- Wann wird in einer Stadt welche Menge an Energie benötigt?
- Wann kann in einer Stadt durch die neuartigen Anlagen wie viel Energie bereitgestellt werden?
- Welche Möglichkeiten bestehen, um die neuartigen Anlagen zu kombinieren, und welche sind sinnvoll?

Im Anschluss werden die Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit im Bezug auf die drei zuvor genannten Forschungsfragen zusammengefasst.

Mit der ersten Forschungsfrage wird der zeitliche Verlauf des Energiebedarfs einer Stadt thematisiert. Die nötigen Kenntnisse für die Quantifizierung des zeitlichen Verlaufs des Energiebedarfs einer Stadt werden in Abschnitt 2 vermittelt. Dort wird zunächst aufgezeigt, dass für die Analyse des Energiebedarfs einer Stadt die Betrachtung des Endenergiebedarfs, welcher die dem Verbraucher übergebene Energiemenge beschreibt, sinnvoll ist. Zudem wird deutlich, dass Endenergie in Städten für viele unterschiedliche Anwendungszwecke benötigt wird. Dort werden die drei folgenden Verbrauchsbereiche identifiziert:

- Raumwärme und Warmwasser,
- Personennahverkehr und
- andere Verbrauchsbereiche.

Die Einflussgrößen auf den Endenergiebedarf wurden für diese drei Kategorien separat untersucht.

Der Endenergiebedarf, welcher der Kategorie Raumwärme und Warmwasser zuzuordnen ist, wird maßgeblich von der benötigten Wärme für die Beheizung der Räume beeinflusst. Der zeitliche Verlauf der benötigten Endenergie ist grundsätzlich an den zeitlichen Verlauf der Außentemperatur gekoppelt. Eine

Entkopplung ist allerdings durch den Einsatz entsprechender Wärmespeicher möglich.

Der dem Personennahverkehr zuzuordnende Endenergiebedarf einer Stadt wird maßgeblich von den Strecken, welche die Einwohner zurücklegen, und den gewählten Verkehrsmitteln bestimmt. Der zeitliche Verlauf des Endenergiebedarfs ist kurzfristig nicht vom zeitlichen Verlauf der zurückgelegten Strecken abhängig, da die betrachteten Verkehrsmitteln im Betrieb integrierte Speicher nutzen.

Der zusammengefasste Endenergiebedarf für die anderen Verbrauchsbereiche kann anhand ihres heutigen Endenergieverbrauchs abgeschätzt werden. Außerdem wurde aufgezeigt, dass der zeitliche Verlauf des Endenergiebedarfs dem zeitlichen Verlauf des heutigen Stromverbrauchs ähneln wird.

In Abschnitt 4.2.1 werden die in Abschnitt 2 vermittelten Kenntnisse für die Entwicklung eines Modells verwendet, das den zeitlichen Verlauf des Endenergiebedarfs je Kategorie simuliert. Mit Hilfe der simulierten Verläufe kann die erste Forschungsfrage beantwortet werden. Die simulierten Verläufe entsprechen den zeitlichen Verläufen, die darstellen, wann in einer Stadt welche Menge an Endenergie benötigt wird.

Anhand der zweiten Forschungsfrage wird untersucht, wann mit den neuartigen Anlagen wie viel Energie bereitgestellt werden kann. Dafür werden in Abschnitt 3 die für eine autarke Energieversorgung einer Stadt in Deutschland aktuell verfügbaren neuartigen Anlagen identifiziert und vorgestellt. Die geeigneten neuartigen Anlagen sind Windenergie-Anlagen, Photovoltaik-Anlagen, Solarthermie-Anlagen, Biogas-Anlagen, Wärmepumpen, Power-to-Gas-Anlagen, Flussbatterien und Wärmespeicher. Diese Anlagen werden unterteilt in Anlagen, deren Verfügbarkeit eingeschränkt ist, und in Anlagen, die abgesehen von Störfällen immer bereitstehen. Für die Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der bereitstellbaren Endenergie wird schließlich in Abschnitt 4.2.2 ausgehend von den in Abschnitt 3 vermittelten Kenntnissen ein Modell entwickelt. Der zeitliche Verlauf der von uneingeschränkt verfügbaren Anlagen bereitstellbaren Endenergie wird erwartungsgemäß maßgeblich von den verwendeten Anlagenparametern bestimmt. Windenergie-Anlagen, Photovoltaik-Anlagen und Solarthermie sind die



betrachteten eingeschränkt verfügbaren Anlagen. Der zeitliche Verlauf der von Windenergie-Anlagen bereitstellbaren Endenergie sinkt im Sommer etwas ab. Der zeitliche Verlauf der von Photovoltaik-Anlagen und Solarthermie-Anlagen bereitstellbaren Endenergie steigt hingegen im Sommer stark an.

Für die Beantwortung der dritten Forschungsfrage werden verschiedene Möglichkeiten verglichen, um den Endenergiebedarf einer Stadt mit den neuartigen Anlagen durchgehend zu decken. Die Deckung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser mit einer Kombination aus Windenergie-Anlagen, Power-to-Gas-Anlagen und Wärmepumpen ist im Vergleich zu den anderen untersuchten Szenarien vorteilhaft, weil die jährlich benötigte Endenergiemenge in diesem Szenario vergleichsweise klein ist. In der Kategorie Personennahverkehr erscheint die Nutzung von Strom, der mit einer Kombination aus Windenergie-, Photovoltaik- und Power-to-Gas-Anlagen bereitgestellt wird, als vorteilhaft. Dieses Szenario ermöglicht es, den größten Anteil der von Windenergie-Anlagen und Photovoltaik-Anlagen bereitstellbaren Endenergie direkt zu nutzen. Für die Deckung des Endenergiebedarfs der anderen Verbrauchsbereiche ist diese Kombination im Vergleich zu den anderen untersuchten Szenarien ebenfalls vorteilhaft, da diese Kombination es auch hier ermöglicht, einen großen Anteil der bereitstellbaren Endenergiemengen direkt zu nutzen.

Abschließend folgt ein Ausblick auf mögliche Folgeuntersuchungen. In dieser Arbeit wird aufgezeigt, wie eine Stadt ihren lokalen Bedarf an Strom und Wärme aus eigenen regionalen Quellen abdecken kann. Für die Zukunft ist es dennoch unerlässlich, auf eine weitere Erhöhung der Energieeffizienz hinzuwirken, damit die vollständige Abdeckung des Energiebedarfs gewährleistet bleibt. Energieautarkie als Zukunftsvision setzt außerdem voraus, dass Bewohner ihre Verhaltens- und Verbrauchsgewohnheiten ändern. Hier bestehen Ansatzpunkte für eine sozialwissenschaftliche Forschung. Beispielsweise könnte untersucht werden, welche Möglichkeiten bestehen, den Endenergiebedarf einer Stadt durch Verhaltensänderungen aufseiten der Bewohner zu reduzieren. Offen geblieben ist schließlich die Frage, inwieweit die hier gewonnenen Erkenntnisse auf die Energieversorgung von Industrieunternehmen übertragbar sind. Es könnte eine

Untersuchung folgen, welche die Möglichkeit der Deckung des Energiebedarfs von Industrieunternehmen mit den hier betrachteten neuartigen Anlagen thematisiert. Davon hängt es ab, ob auch die Vision einer energieautarken Fabrik Wirklichkeit werden kann.