

DISS. ETH NO. 16886

# **SCENARIO AND POLICY ANALYSIS OF SUSTAINABLE ENERGY SYSTEMS AND AUTOMOBILE TRANSPORTATION**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

HAL TURTON

Master of Public Policy, Australian National University, Australia  
Bachelor of Advanced Science (Honours), University of New South Wales, Australia

born 22.09.1974

citizen of Australia

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. Wokaun, examiner  
Prof. Dr. K. Boulouchos, co-examiner  
Dr. L. Barreto, co-examiner

2006

## Abstract

Realising sustainable development over the long term is a profound challenge confronting policy and decision makers across the globe, encompassing a broad range of potentially competing goals. Within the energy sector, these competing objectives include providing access to the energy supplies needed for economic and social development while avoiding the impacts of anthropogenic climate change arising from the combustion of fossil fuels and reducing the risks of disruptions to the energy supply, among others.

Understanding these objectives and developing appropriate long-term strategies represents a significant challenge for decision makers, given both complex interactions within the energy system and major socioeconomic, political, technological and scientific uncertainties. Addressing this challenge requires appropriate policy analysis tools for studying sustainable development. With this in mind, one main theme of this dissertation is the construction and development of an integrated assessment tool for energy and climate policy and scenario analysis. The second main theme of this dissertation is the application of this analysis tool to explore sustainable development and the possible emergence of sustainable automobile transport over the 21<sup>st</sup> century.

The construction of the policy analysis tool to address the first theme is delineated into different submodules. The first of these comprises developing an extended version of the “bottom-up” energy-systems ERIS (Energy Research and Ivestment Strategies) model, which was originally developed during the EC-sponsored TEEM and SAPIENT projects, where it was mainly used to examine issues related to the endogenisation of mechanisms of technological change. The importance of technological change as both a threat to sustainable development and a source of potential solutions guided the choice of ERIS for the work described in this dissertation, and the substantial extensions to the model. These extensions include: the implementation of a clusters approach to technology learning; the incorporation of a transportation sector with emphasis on the passenger car sub-sector; the inclusion of fuel production technologies (e.g. hydrogen, alcohols, Fischer-Tropsch liquids, etc); and the addition of emissions and marginal abatement cost curves for two main non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases (methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O)), emissions of sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), and geological and terrestrial CO<sub>2</sub> storage. The comprehensive coverage of almost all greenhouse gas emissions and many abatement opportunities in this extended model facilitates its linkage to the MAGICC climate model (developed by the Climate Research Unit at Norwich University), thereby ensuring that in addition to energy system detail the ERIS model is also able to represent climate change impacts and mitigation—one critical element of sustainable development.

The extended energy-system ERIS model represents one key component of the policy analysis tool developed in this dissertation. However, alone this model is somewhat limited in terms of its suitability for analysing sustainable development because, although it represents the engineering, physical and technological features of the energy system and climate in detail, it does not represent the underlying forces of economic production and consumption (nor feedbacks between the economy and energy system). Accordingly, to complement the technology-rich bottom-up energy and transport system model ERIS, a macroeconomic energy demand model and a consumer-budget transport demand model are incorporated into the policy analysis framework, with all the models linked and solved iteratively. The resulting tool—the ECLIPSE (Energy and Climate Policy and Scenario Evaluation) model—provides a detailed and flexible framework that includes many new features compared to other hybrid top-down economic and bottom-up engineering models, such as: a more disaggregated economic production function; improved calibration and parameterisation; and disaggregated modelling of passenger transport technologies and demands. The detailed modelling of transport means that ECLIPSE is particularly well-suited to analysing interactions within this sector and with the broader energy market and economy, making this framework ideal for addressing the second theme of this dissertation—to explore sustainable automobile transport.

Transport represents a significant threat to long-term sustainable development, and is one of the fastest-growing consumers of final energy and sources of greenhouse gas emissions. Moreover,

transport is heavily reliant on petroleum, a limited resource that is also associated with geopolitical risks to security of supply. The threat posed by transport (particularly road and automobile transport) to two central concerns for policy makers and elements in sustainable development—energy security and climate change—warrants a closer examination of possible pathways to a sustainable transport system.

Importantly, possible transitions in the global automobile sector over the 21<sup>st</sup> century are uncertain in terms of both technologies and energy carriers, and policy and other drivers. The uncertainty is explored in this dissertation by examining the potential role of various automobile technologies in GHG mitigation across a range of increasingly stringent abatement policies. The results provide some preliminary policy insights by illustrating the potential for advanced vehicle technologies and hydrogen to contribute to climate change mitigation, but show that fuel cell cars may be a longer-term option.

However, efforts seeking to address other elements of sustainable development are also potentially important for determining the suitability of alternative energy and transport technologies. This is explored in this dissertation in an analysis of potential synergies and trade-offs relating to security of supply and climate change. In particular, the role of a number of policy instruments in managing energy security and climate risks and stimulating technological change are examined, and the potential for policies aimed towards maintaining security of supply to promote the uptake of new technologies, reduce the cost of pursuing climate change mitigation policies, and facilitate a possible transition to a hydrogen economy are explored in detail.

Finally, the complete policy analysis framework (ECLIPSE) is applied to describe and analyse technology transitions in a scenario combining multiple sustainable development objectives over the long term, including: i) continuing economic growth, with a moderate reduction in disparities in income between different world regions; ii) maintaining a buffer of oil and gas resources to enhance security of energy supply, both globally and in vulnerable regions; iii) abating greenhouse gas emissions to ensure atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations do not exceed double pre-industrial levels; and iv) ensuring global mobility demands are met, without resorting to assumptions about a large counter-trend shift to public transport or lower travel demand. The results of this analysis illustrate the technological, economic, fuel production and infrastructure implications of realising this scenario over the long term. This provides a number of policy insights by identifying critical developments required for the emergence of a sustainable global passenger transport and energy system, in terms of vehicle technologies, fuel production and broader energy system developments.

**Keywords:** sustainable development; climate change; energy security; technological change; hydrogen; transport; automobiles

## Zusammenfassung

Nachhaltige Entwicklung über lange Zeiträume zu erreichen ist global eine große Herausforderung für Entscheidungsträger, da Nachhaltige Entwicklung eine Reihe von potentiell konkurrenzierenden Zielen umfasst. Innerhalb des Energiesektors sind dies, zum Beispiel, den Zugang zu Energieversorgung für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung zu sichern und Risiken in der Energieversorgung zu minimieren und dabei die Auswirkungen der globalen Erwärmung, verursacht durch Verbrennung fossiler Brennstoffe, zu vermeiden.

Unter den gegebenen komplexen Zusammenhängen innerhalb eines Energiesystems und angesichts der großen sozioökonomischen, politischen, technologischen und wissenschaftlichen Ungewissheiten diese Ziele zu verstehen und eine langfristige Strategie zu entwickeln ist eine Herausforderung für Entscheidungsträger. Um diese Herausforderung der Nachhaltigen Entwicklung annehmen zu können, braucht man geeignete Analysewerkzeuge. Daher ist ein Hauptthema dieser Dissertation die Entwicklung eines integrierten Bewertungswerkzeuges für die Formulierung von Energie- und Klimastrategien und die Szenarioanalyse. Das zweite Hauptthema ist die Anwendung dieses Bewertungswerkzeuges um Nachhaltige Entwicklung und die Bedingungen für die Entstehung eines nachhaltigen Automobiltransportsystems während des 21. Jahrhunderts zu untersuchen.

Die Entwicklung des integrierten Bewertungswerkzeuges ist in verschiedenen Module gegliedert. Das erste Modul ist die Entwicklung einer erweiterten Version des „bottom-up“ Energiesystemmodells ERIS (Energy Research and Interaction Strategies). Das Modell wurde ursprünglich im Rahmen der EU-Projekte TEEM und SAPIENT entwickelt, um die Endogenisierung von Mechanismen des technologischen Fortschritts zu untersuchen. Die Bedeutung von technischem Fortschritt sowohl als Bedrohung der Nachhaltigen Entwicklung als auch als Quelle von möglichen Lösungen führte zur Auswahl von ERIS als Bewertungswerkzeug für diese Dissertation und zu dessen substantieller Erweiterung. Diese Erweiterung inkludiert: Implementierung des „Cluster“-Zugangs für technologisches Lernen; die Inkorporation des Transportsektors mit Betonung des Automobiltransportsektors; die Einbeziehung von Treibstoffproduktionstechnologien (Wasserstoff, Alkohole, Fischer-Tropsch Treibstoffe, usw.); und die Einfügung von Emissionswerten und marginalen Minderungskosten für die zwei wichtigsten Treibhausgase (Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O)) neben dem CO<sub>2</sub>, von Emissionswerten für Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), und die Abbildung von geologischen und terrestrischen CO<sub>2</sub>-Speichern. Die Abdeckung von fast allen Treibhausgasen und vielen Minderungs-Optionen im erweiterten ERIS-Modell ermöglicht seine Verknüpfung mit dem Klima-Modell MAGICC (entwickelt an der Climate Research Unit der Norwich University). Dies ermöglicht, dass ERIS neben der detaillierten Beschreibung des Energiesystems auch Minderungsstrategien zur Reduktion des Schadens durch Klimaveränderung beschreiben kann — ein kritisches Element von Nachhaltiger Entwicklung.

Das erweiterte ERIS-Modell ist eine Schlüsselkomponente des Bewertungswerkzeuges, das in dieser Dissertation entwickelt wurde. Trotz dieser Erweiterung ist das Modell, für sich genommen, nur begrenzt zur Analyse Nachhaltiger Entwicklung nutzbar. Obwohl es nämlich die technischen und physikalischen Eigenschaften des Energiesystems und des Klimas im Detail abbildet, kann es weder die zugrunde liegenden Kräfte der ökonomischen Produktion und des Konsums beschreiben noch Rückkoppelungen zwischen der Gesamtwirtschaft und dem Energiesystem. Daher wird das Technologien betonende „bottom-up“ Energie- und Transport-Modell ERIS durch ein makroökonomisches Energienachfragemodell und ein Transportmodell (einschließlich Budget-Beschränkungen der Konsumenten) ergänzt. Das Ergebnis davon ist eine integriertes Bewertungswerkzeug, in dem alle erwähnten Modelle verknüpft sind und für das der Name ECLIPSE (Energy and Climate Policy and Scenario Evaluation) gewählt wurde. ECLIPSE stellt somit ein detailliertes und flexibles Gerüst dar, das -- im Vergleich zu anderen Kombinationen von „top-down“-Wirtschafts- mit „bottom-up“ technischen Modellen viele neue Fähigkeiten hat. Diese inkludieren: eine mehr disaggregierte ökonomische Produktionsfunktion; verbesserte Kalibrierung und Parametrisierung; und disaggregierte Modellierung von Personenverkehrstechnologien und der Nachfrage nach Transportleistung. Die detaillierte Modellierung des Transports bedeutet, dass ECLIPSE besonders gut geeignet ist, um Interaktionen zwischen diesem Sektor und dem restlichen

Energiemarkt und der Wirtschaft zu analysieren. Es ist daher ideal dazu geeignet, ein nachhaltiges automobiles Transportsystem zu erforschen.

Die Auswirkungen des Transportsystems stellen eine signifikante Bedrohung der langfristigen Nachhaltigen Entwicklung dar. Insbesondere ist der Verkehrssektor einer der am schnellsten wachsenden Energieverbraucher und Quellen von Treibhausgasemissionen. Darüber hinaus hängt das Transportsystem stark vom Erdöl ab, dessen Ressourcen nur beschränkt verfügbar und außerdem mit geopolitischen Risiken verknüpft sind. Die Gefährdung zweier zentraler Punkte der Nachhaltigen Entwicklung — Energiesicherheit und Klimawandel — durch das Transportsystem (im speziellen Straßenverkehr und Automobilverkehr) macht eine genauere Untersuchung von möglichen Wegen zu einem nachhaltigen Transportsystem lohnend.

Wichtig ist dabei, dass mögliche Übergänge im globalen Automobilssektor während des 21. Jahrhunderts sowohl betreffend der Technologien und Energieträger als auch bezüglich des politischen Umfelds und anderer Rahmenbedingungen mit signifikanten Unsicherheiten behaftet sind. Diese Unsicherheit wird in dieser Dissertation analysiert indem der Einfluss verschiedener Automobiltechnologien auf die Vermeidung von Treibhausgasemissionen unter einer Reihe von immer strengeren Emissionsbestimmungen untersucht wird. Erste Resultate der Untersuchung quantifizieren das Potential für fortgeschrittene Fahrzeugtechnologien und für Wasserstoff bei der Verminderung des Klimawandels. Es ergibt sich daher, dass Brennstoffzellenautos eine langfristige Option für die weltweite Klimapolitik sind.

Nichtsdestoweniger sind Bemühungen, die andere Elemente der Nachhaltigen Entwicklung untersuchen, auch für die Bestimmung alternativer Energie- und Verkehrstechnologien wichtig. Dem wird in dieser Dissertation Rechnung getragen indem der funktionelle Zusammenhang zwischen Versorgungssicherheit und Klimawandel analysiert werden. Im speziellen werden im Detail eine Reihe von Maßnahmen untersucht, die gleichzeitig auf Versorgungssicherheit, Reduzierung der Klimarisiken und Kosten der Klimapolitik, auf die Stimulierung von technologischem Wandel und auf den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft abzielen.

Schließlich, wird das komplette integrierte Bewertungswerkzeug ECLIPSE angewandt, um einen technologischen Wandel zu beschreiben und mit Hilfe eines Szenarios zu analysieren. Das resultierende Szenario vereint mehrere Ziele der langfristigen nachhaltigen Entwicklung miteinander: i) weiteres ökonomisches Wachstum, mit einer moderaten Reduktion der Einkommensungleichheit zwischen verschiedenen Weltregionen; ii) Aufrechterhalten eines Puffers von Erdöl- und Gasressourcen um die Versorgungssicherheit mit Energie global und in kritischen Regionen zu verstärken; iii) Begrenzung von Treibhausgasemissionen um sicherzustellen, dass die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration das Doppelte der vor der „Industriellen Revolution“ vorherrschenden Werte nicht übersteigt; und iv) Gewährleistung, dass die globale Mobilitätsnachfrage befriedigt wird, ohne auf Annahmen zurückgreifen zu müssen, die einen starken Gegentrend zum öffentlichen Verkehr oder eine niedrigere Mobilitätsnachfrage annehmen. Die Resultate dieser Analyse illustrieren die technologischen, ökonomischen, Treibstoffproduktions- und Infrastrukturimplikationen einer Realisierung dieses Szenarios über lange Zeithorizonte (bis zum Jahr 2100). Für die politischen Entscheidungsträger relevant ist, dass mit diesem Szenario Entwicklungen identifiziert werden, die für das Entstehen eines nachhaltigen globalen Personenverkehrs und Energiesystems nötig sind. Diese Entwicklungen — und der damit verbundene Handlungsbedarf — beziehen sich auf Fahrzeugtechnologien, Treibstoffproduktion und allgemeine Energiesystementwicklungen.

**Stichwörter:** Nachhaltige Entwicklung, Klimawandel, Energiesicherheit, technologischer Wandel, Wasserstoff, Verkehr, Autos