

## BEAM-ME – Ein interdisziplinärer Beitrag zur Erreichung der Klimaziele

T. Breuer

Jülich Supercomputing Centre (JSC), Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Germany

M. Bussieck · F. Fiand

GAMS Software GmbH, Frechen, Germany

K.-K. Cao · H. C. Gils · M. Wetzel

Department of Energy Systems Analysis, Institute of Engineering Thermodynamics, German Aerospace Center (DLR), Stuttgart, Germany

A. Gleixner · T. Koch · D. Rehfeldt

Zuse Institute Berlin/Technische Universität Berlin, Berlin, Germany

D. Khabi

High Performance Computing Center Stuttgart (HLRS), Stuttgart, Germany

Die deutsche Energiewende macht ein radikales Neudenken in Wirtschaft und Wissenschaft erforderlich. Vielfältige Maßnahmen rücken näher, die von der Politik im Zuge des schrittweisen Umstiegs auf die erneuerbaren Energien beschlossen wurden: 2022 soll das letzte Kernkraftwerk vom Netz gehen. Bis 2025 sollen 40 bis 45 Prozent des bundesweit verbrauchten Stroms aus erneuerbaren Energien erzeugt werden. Spätestens 2038 soll laut der Empfehlung der Kohlekommission das letzte Kohlekraftwerk abgeschaltet werden. Mit diesen und weiteren Veränderungen vollzieht sich nach und nach ein grundlegender Umbau des Energiesystems. Dafür werden Windräder und Solarzellen installiert, Stromautobahnen gebaut und sogenannte Smart Grids eingerichtet, es werden Energieinfrastrukturen verbunden und neue Stromspeichertechnologien erforscht.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

So konkret all das klingt, so ungewiss sind viele der Faktoren im Planungsspiel. Die Entwicklung des Energiemarkts lässt sich schwer vorhersagen, und auch die Klimaaussichten werfen Fragen auf. Wie wird in 50 Jahren die Sonne scheinen? Wann und wo wird der Wind wehen? Mit jeder einzelnen Eventualität, die als Messung, Annahme oder Wahrscheinlichkeit in eines der analytischen Modelle für die Energiesysteme der Zukunft eingespeist wird, ergibt sich ein komplexeres Bild. Diese Komplexität ist gigantischen Datenmengen geschuldet, die herkömmliche Computer und Algorithmen schnell an die Grenzen ihrer Kapazität und Leistungsfähigkeit bringen. Die Herausforderungen der Energiewende sind zu einem wesentlichen Teil Herausforderungen der Informationstechnologie.

Neue Perspektiven eröffnet BEAM-ME, ein interdisziplinäres Forschungsprojekt, das von 2015 bis 2019 im Rahmen des sechsten Energieforschungsprogramms der Bundesregierung durchgeführt wurde (Förderkennzeichen: 03ET4023A-F). Beteiligt waren die Abteilung Energiesystemanalyse des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, das Jülich Supercomputing Centre am Forschungszentrum Jülich, das Höchstleistungsrechenzentrum

Stuttgart, der Bereich Mathematical Optimization and Scientific Information am Zuse Institute Berlin, das Institut für Mathematik an



HLRS



JÜLICH  
FORSCHUNGSZENTRUM



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt  
German Aerospace Center



GAMS

der Technischen Universität Berlin und die GAMS Software GmbH. Die Buchstaben des dynamischen Projektnamens ergeben sich aus der Zielsetzung der sechs Projektpartner: Realisierung von Beschleunigungsstrategien der anwendungsorientierten Mathematik und Informatik für optimierende Energiesystemmodelle.

Besagte komplexe Optimierungsmodelle, die für die Zukunft der Energieversorgung eine so entscheidende Rolle spielen, liegen in Form linearer Optimierungsprobleme, sogenannter linearer Programme (LP), vor. Der neuartige Ansatz von BEAM-ME besteht darin, sich für ihre Beschreibung und Lösung das Potenzial von Hochleistungsrechnern zunutze zu machen. Dies geht mit erheblichen mathematischen und technischen Herausforderungen einher. Die gigantische Rechenleistung zeitgenössischer Supercomputer resultiert aus massiver Parallelisierung, wohingegen die Algorithmen, die in den bisherigen State-of-the-Art LP-Lösern implementiert sind, nur eingeschränkt von einer parallelen Rechenleistung profitieren. Bisher wurden solche Algorithmen ausschließlich auf Shared-Memory-Architekturen verarbeitet – was den Einsatz dieser Löser auf Hochleistungsrechnern mit verteiltem Speicher ausschloss. Um moderne Supercomputer für die Lösung riesiger linearer Energiesystemmodell-Programme benutzen zu können, mussten daher zunächst skalierbare Algorithmen entwickelt werden.



*Abbildung 1 Supercomputer JUWELS am Jülich Supercomputing Centre, Copyright: Forschungszentrum Jülich / R.-U. Limbach*

BEAM-ME fokussierte sich anfangs hauptsächlich auf das Energiesystemmodell REMix, ein etabliertes, seit vielen Jahren kontinuierlich weiterentwickeltes Instrument des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Es ist flexibel parametrisierbar und dient dazu, Energieszenarien, beispielsweise für Europa, zu analysieren und zu validieren. Wer sich etwa als Ingenieur die Frage beantworten will, welche Infrastruktur gebraucht wird, um eine Region bestmöglich mit Strom zu versorgen, kann ein entsprechendes Modell generieren und mithilfe der Algorithmen die Antwort errechnen. So jedenfalls die Idee. Tatsächlich erreicht der Vorgang Dimensionen, denen heutige Standard-Hardware nicht mehr

gewachsen ist. Die Rechenzeit uferf aus, der Bedarf an Arbeitsspeicher steigt bis in den Terabyte-Bereich.

Die hinter BEAM-ME versammelten Projektpartner entwickelten deshalb die Lösungsalgorithmen und REMix so weiter, dass das Modell auf leistungsstärkeren Supercomputern gerechnet werden kann, in denen Hunderte bis Tausende Rechenkerne parallel genutzt werden können. Über solche Hochleistungsrechnerarchitekturen verfügen unter anderem das Jülich Supercomputing Centre und das Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart, zwei der drei bedeutendsten Rechenzentren in Deutschland. Durch das parallelisierte Rechnen mit verteiltem Arbeitsspeicher wird es möglich, hochauflösende Optimierungsmodelle der Energiesystemanalyse in wenigen Zeitstunden (dafür umso mehr „Core-Stunden“) auszuführen.

Ist das Modell gelöst, zeigt es sehr genau, wie Länder oder Städte ihre Energienachfrage optimal decken können. Beispielsweise kann für Regionen, welche mit Solarenergie regelmäßig über ihren Eigenbedarf hinaus Strom produzieren, aus dem Ergebnis der Schluss gezogen werden, dass der Bau von Stromspeichern sinnvoll ist. In einem anders gelagerten Fall müssen womöglich Stromübertragungsstrassen zwischen Schleswig-Holstein und Süddeutschland verstärkt oder zugebaut werden, um den Strom aus Offshore-Windparks ins Alpenvorland zu transportieren. Die mit BEAM-ME erschlossenen neuen Möglichkeiten erlauben das Lösen hochgradig detaillierter Modelle, etwa zur Transformation von Energiesystemen hin zur weitest gehenden Nutzung von Erneuerbarer Energie bei gleichzeitiger Gewährleistung der Versorgungssicherheit und unter Berücksichtigung der Kopplung der Energiesektoren Strom, Wärme und Verkehr. Hierbei leisten diese neuen Modelle einen wichtigen Beitrag zur energiepolitischen Strategieentwicklung.

REMIX ist, wie auch zahlreiche andere Energiesystemmodelle, in der algebraischen Modellierungssprache GAMS implementiert. GAMS ist eine spezielle Sprache für die Beschreibung von Optimierungsmodellen und bildet gleichzeitig die Schnittstelle zu diversen Algorithmenpaketen für deren Lösung. Die neuen Algorithmen wurden am Zuse Institute Berlin und an der Technischen Universität Berlin eigens für die Supercomputer in Jülich und Stuttgart entwickelt, die im Rahmen von BEAM-ME zum Einsatz kamen.

Als vielversprechende algorithmische Grundlage wurde zu Projektbeginn der Open-Source-Löser PIPS-IPM identifiziert. Dieser musste substantiell erweitert und überarbeitet werden, um auf die vorliegenden Energiesystemmodelle angewendet werden zu können. PIPS-IPM löst u.a. LPs mit Blockdiagonalstruktur, wobei die Blöcke sowohl durch Variablen („linking variables“) als auch durch Restriktionen („linking constraints“) verbunden sind. Letztere wurden zu Projektbeginn noch nicht unterstützt. Da sie eine wichtige Voraussetzung für die Anwendbarkeit von PIPS-IPM auf Energiesystemmodelle sind, wurden sie als Erweiterung des Löser ergänzt. Die verschiedenen Blöcke sind wiederum die Voraussetzung des parallelisierten Rechnens. Für jeden von ihnen wird ein separater Prozess innerhalb des Supercomputers ausgeführt, der lediglich die für den einzelnen Block relevanten Daten benötigt.

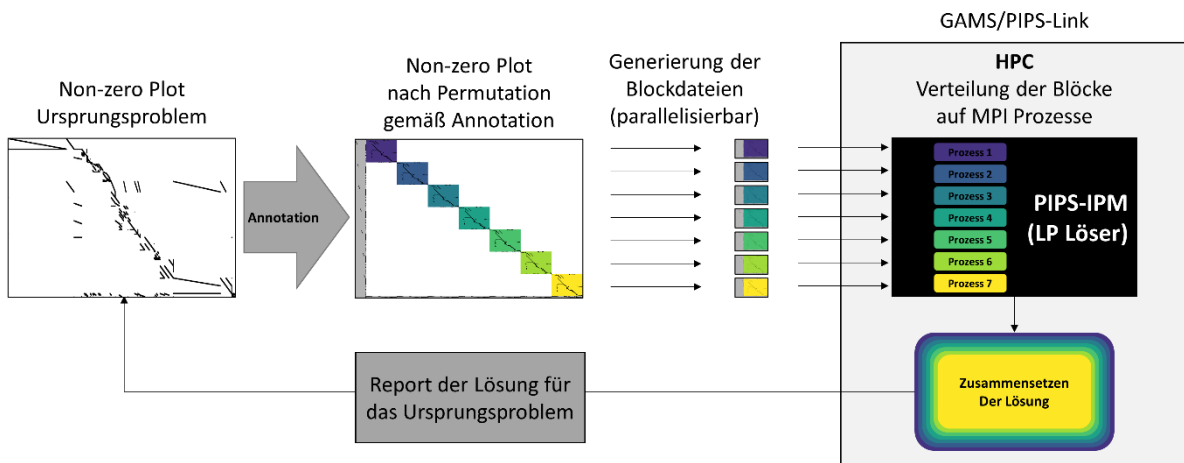


Abbildung 2 Schematische GAMS/PIPS Work-Flow Darstellung

Diese Art der Optimierung erschließt ein völlig neues Leistungspotenzial. Es hängt dabei von der inhaltlichen Motivation hinter der jeweiligen Forschungsfrage ab, wie viele Blöcke in dem Modell definiert werden können. Wird zum Beispiel ein Kalenderjahr über Zeitschritte beschrieben, kann eine an der Tagesanzahl orientierte Struktur mit 365 Blöcken den Lösungsprozess parallelisieren. Oder es werden genau doppelt so viele Blöcke festgelegt, und somit Tage und Nächte getrennt abgebildet. Nicht jede Blockstruktur eignet sich in gleicher Weise für die zugrunde liegenden Algorithmen. Deshalb gibt es unterschiedliche Anwendungsvarianten. Die Modellierungssprache GAMS wurde während des Projekts derart erweitert, dass der Modellierer die Blockstruktur(en) bereits existierender Modelle durch Annotation der Entscheidungsvariablen leicht bestimmen kann.

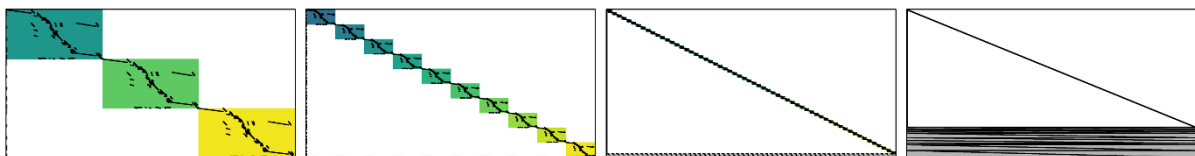


Abbildung 3 Non-Zero Plots unterschiedlicher Blockdiagonalstrukturen einer Modellinstanz. Eine Herausforderung liegt im Finden einer Annotation, die hinreichend viele Blöcke für die Parallelisierung definiert, ohne dass die grauen Blöcke der linking variables und constraints dominant werden.

BEAM-ME ist also kein Projekt für den Spezialfall des Spezialfalls. Es bietet Energiesystemforschern eine universelle Methodik an. Außerdem ist es so offen angelegt, dass sich seine Algorithmen auch auf Energiesystemmodelle anwenden lassen, die nicht auf REMix basieren. Dieser Aspekt kam in einem dem Projekt angegliederten Modellexperiment zum Tragen. Die Technische Universität Dresden, das Energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln, die Universität zu Duisburg-Essen, das Karlsruher Institut für Technologie, das Paul Scherrer Institut und Dänemarks Technische Universität testeten die neuen Methoden an eigenen Modellen – vielfach mit Erfolg. Das gesamte Projekt wurde außerdem von einem internationalen Expertenkreis mit Vertretern aus den Vereinigten Staaten, Irland, Frankreich, Japan sowie der Generaldirektion Energie der Europäischen Kommission begleitet.

Im Vergleich mit dem früheren Status quo ist die wissenschaftliche Energiesystemanalyse nach BEAM-ME nicht nur größer skalierbar, sondern auch aussagekräftiger. Bisher wurden

manche Szenarien wegen Rechenzeitrestriktionen nur für einen Fünfjahreszeitraum modelliert – jetzt kann man mehrere Jahrzehnte vorausplanen. Und dank der neuen Hochleistungsressourcen weitet sich auch der Horizont der Forschung. Nachdem man in der Vergangenheit kaum eine der drängenden „großen“ Fragen angehen konnte (sie mussten in Form von Teilrechnungen für die vorhandene Infrastruktur heruntergebrochen werden), werden die maßgeblichen Szenarien nun konturscharf gezeichnet.

Wie groß die Kreise sein werden, die BEAM-ME zieht, lässt sich noch nicht abschließend beurteilen. Potenziell können die Energiesystemmodelle sehr vieler Forschungseinrichtungen mit den aufgerüsteten Methoden beschleunigt und verbessert werden. Viele der internationalen Wissenschaftler, die an dem Modellexperiment teilgenommen haben, profitieren bereits davon. Andere tun es vorerst nicht, da die mathematischen Grundlagen ihrer Modelle nicht kompatibel sind – zum Beispiel keine geeignete Blockdiagonalstruktur gegeben ist. Fest steht, dass die Ergebnisse des Projekts die Grundlagenforschung bereichern. Sie helfen, neue energiewirtschaftliche Wege einzuschlagen und politische Zielvorgaben zu formulieren. BEAM-ME weist in eine Zukunft, in der die interdisziplinäre Gestaltung der Energiewende begonnen hat.