

# Energiesystem-Resilienz in Szenarien und Transformationspfaden

Im Zentrum dieses Beitrags steht die Frage, wie Resilienz bei der Modellierung zukünftiger Energiesysteme berücksichtigt werden kann. Dabei wird einerseits die Ausgestaltung von Zielsystemen und andererseits die Pfadentwicklung zur Erreichung dieser Systeme betrachtet. Die Resilienz umfasst die Fähigkeit der Zielsysteme, bei Störungen oder Teilausfällen nicht vollständig zu versagen, sondern wesentliche Systemdienstleistungen ohne größere Beeinträchtigungen aufrecht zu erhalten, aber auch die Fähigkeit der Pfade, trotz disruptiver Ereignisse die Klimaziele zu erreichen.

Energieszenarien liefern wichtiges Orientierungswissen für Entscheidungsträger:innen, die an der Transformation des Energiesystems beteiligt sind. Die Szenarien sind in der Regel auf die Ermittlung von Pfaden zur Erreichung einer klimaneutralen Energieversorgung ausgerichtet. In vielen Fällen kommen dabei kostenminimierende Energiesystemmodelle zum Einsatz.

Der Aspekt der Versorgungssicherheit wird häufig durch die Annahme von Überkapazitäten bei der Stromerzeugung und -übertragung abgebildet (Merten et al. 2023). Die Versorgungssicherheit mit anderen Energieträgern wie Wasserstoff oder synthetischen flüssigen Kraftstoffen steht in den meisten Szenarien nicht im Mittelpunkt.

Resilienz ist allerdings nicht mit Versorgungssicherheit oder der Vorhaltung zusätzlicher Leistung gleichzusetzen. Es besteht daher der Bedarf einer ergänzenden Berücksichtigung der Resilienz bei der Erstellung von Szenarien für die Umsetzung der Energiewende.

Die Transformation des Energiesystems führt zu neuen Anforderungen an die Resilienz. Einflussfaktoren sind dabei insbesondere die Volatilität erneuerbarer Energiequellen, die Dezentralisierung, die Digitalisierung und die Sektorenkopplung. Hinzu kommen Auswirkungen des Klimawandels, der sich nicht nur auf mögliche Extremwetterlagen, sondern auch auf den regulären Systembetrieb auswirkt. Mit Blick auf die verschiedenen Transformationspfade sind zudem insbesondere politische, wirtschaftliche, gesellschaftliche und technologische Entwicklungen zu nennen, die einen Einfluss auf die Resilienz haben.

## Sektorenkopplung

Wie sich die veränderten Systemeigenschaften auf die Resilienz auswirken, soll exemplarisch anhand der Sektorenkopplung dargestellt werden. Mit dem Ausbau der Sektorenkopplung kommen zusätzliche Wandlungsanlagen und Speicher zum Einsatz. Die damit erhöhte Redundanz und Dezentralität der Anlagen kann eine Ausbreitung von Störungen reduzieren, was beides der Resilienz zuträglich ist. Andererseits kann die erhöhte Abhängigkeit von Strominfrastrukturen auf Verteilnetzebene eine Ausbreitung von Störungen auf die Wärmeversorgung und den Verkehrssektor begünstigen. Am Beispiel der Sektorenkopplung wird auch deutlich, dass sich Akteursinteressen auf den effektiven Resilienzbeitrag dezentraler Technologien auswirken: so spielen z.B. Kriterien wie Klimafreundlichkeit und Stromsystemnutzen beim Kauf von Elektrofahrzeugen weder für die Kaufentscheidung noch für das Nutzungs- und ggf. Ladeverhalten eine wesentliche Rolle.

## Modellbasierte Analyse von Resilienz

Eine modellgestützte Untersuchung von Resilienz erfordert die Definition sowie eine Abschätzung der kurz- und langfristigen Wirkungen von Stressfällen bzw. disruptiven Ereignissen. Ein Beispiel für einen Stressfall könnte eine Extremwetterlage im Winter sein, bei der zunächst ein Sturm Schäden an Windenergieanlagen und Stromleitungen verursacht, und eine anschließende Dunkelflaute zu weiteren Herausforderungen bei der Energieversorgung führt. Für eine solche Berücksichtigung im Modell müssen die Wirkungen auf das Energiesystem, wie Ort, Zeitpunkt und Dauer der Beeinträchtigung, quantifiziert werden. Dies gilt gleichermaßen auch für disruptive Ereignisse und deren Einbindung in die modellgestützte Analyse von Transformationspfaden. Aufgrund der Vielzahl möglicher Ereignisse empfiehlt sich zunächst eine Fokussierung auf ausgewählte Ereignisse. Hierzu bietet sich der Einsatz von Stakeholder-Konsultationen unterstützt durch z.B. Risiko-Matrizen an (► Abbildung 1).



**DLR**

Dr. Hans Christian Gils  
hans-christian.gils@dlr.de

Dr. Henning Wigger  
henning.wigger@dlr.de

**Fraunhofer IEE**

Dr. Philipp Härtel  
philipp.haertel@iee.fraunhofer.de

**FZ Jülich**

Dr. Stefan Vögele  
s.voegel@fz-juelich.de

**ISFH**

Dr. Raphael Niepelt  
niepelt@isfh.de

**KIT**

Dr. Sadeeb S. Ottenburger  
sadeeb.ottenburger@kit.edu

**UFZ**

Dr. Reinhold Lehneis  
reinhold.lehneis@ufz.de

David Manske  
david.manske@ufz.de

**Wuppertal Institut**

Dr. Larissa Doré  
larissa.dore@wupperinst.org

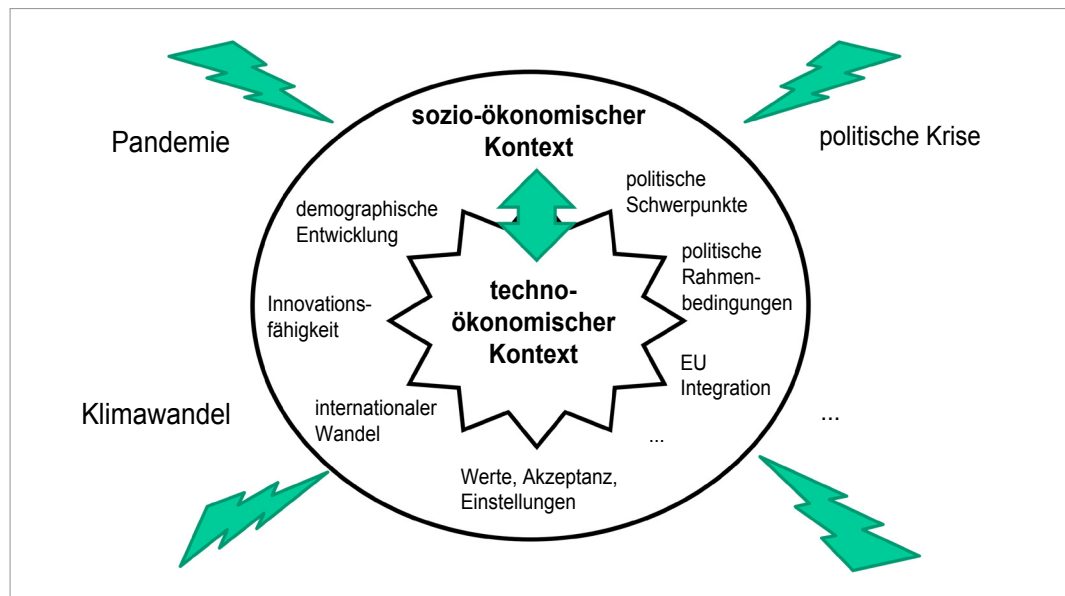
Frank Merten  
frank.merten@wupperinst.org

**ZSW**

Andreas Püttner  
andreas.puettner@zsw-bw.de

► Abbildung 1

**Analyse der Resilienz von Zukunftssystemen:**  
*exemplarischer Untersuchungsrahmen*  
 (Quelle: RESUR/FZ)



Die beschriebene Vorgehensweise einer Quantifizierung und modellbasierten Untersuchung spezifischer Stressfälle oder Disruptionen wird als inzidenzbasierte Verletzlichkeitsanalyse bezeichnet. Mit Blick auf die übliche Vorgehensweise bei der Modellierung von Energiesystemen werden zur Modellierung dieser Beeinträchtigungen spezifische Modelleingangsdaten modifiziert. Dies kann insbesondere eine Anpassung der Nachfrageprofile verschiedener Energieträger, der Verfügbarkeit von Energie aus erneuerbaren Quellen, eine reduzierte Verfügbarkeit von (Netz-)Infrastrukturen oder eine reduzierte Performance von gewissen Anlagen umfassen (Gils et al. 2023).

Ein alternatives Vorgehen stellt die strukturelle Verletzlichkeitsanalyse dar, bei der die Analyse von Systemcharakteristika im Vordergrund steht, die zu einer Stärkung oder Schwächung der Resilienz führen können. Beispiele hierfür sind eine hohe technologische Vielfalt oder die Abhängigkeit von einzelnen Anlagen. Resilienzfördernde Eigenschaften wie die genannte technologische Vielfalt können als zusätzliche Randbedingungen in das Systemdesign mit Energiesystemmodellen integriert werden (Sasanpour et al. 2021).

Die Resilienzanalyse erfordert auch eine erweiterte Berücksichtigung von Unsicherheiten in Energiesystemmodellen. Sensitivitätsanalysen mittels deterministischer Analysewerkzeuge, wie z.B. Optimierungsmodelle, können zwar wichtige Aufschlüsse hinsichtlich wichtiger Determinanten im Energiesystem geben, haben aber letztlich wenig mit der Optimalität einer Optimierung zu tun, bei der ein

Teil der Parameter mit Unsicherheiten behaftet ist (Wallace, 2000).

So sollte das bisher dominante Vorgehen der Berücksichtigung von Sensitivitätsanalysen ergänzt oder ersetzt werden durch eine endogene Betrachtung von Unsicherheiten. In Abhängigkeit der Forschungsfrage kommt es hierbei auf die Wahl sogenannter Risikooperatoren an. Diese quantifizieren das mit den unsicheren Parametern verbundene Risiko, welches mit übermäßigen Systemkosten oder -verlusten oder der Verletzung wichtiger Nebenbedingungen im Energiesystem einhergeht. Die Festlegung der Risikooperatoren und somit auch der Modellformulierung hängt zum einen von dem vorhandenen Wissen über die unsicheren Parameter ab und wird zum anderen dadurch bestimmt, wie die Auswirkungen auf das Entscheidungsproblem modelliert werden. Beispielsweise können hier Verfahren der zwei- und mehrstufigen stochastischen Optimierung (Härtel & Frischmuth, unveröffentlicht) oder der robusten Optimierung realisiert werden. So können gleichermaßen kurz- und langfristige Unsicherheiten modelliert, und Lösungen gefunden werden, die eine optimierte Abwägung zwischen Risiken und zusätzlichen Kosten widerspiegeln.

### Konfliktpotenziale in Energiewendeszenarien

Energiewendeszenarien können aufgrund ihrer vorgegebenen Zielsetzungen häufig nur am Rande auf gesellschaftliche Herausforderungen oder Konflikte eingehen. Mit einer systematischen und prospektiven Betrachtung kann ein Beitrag dazu

	Fokusjahr	Klimaneutrales D	RESCUE – Green Late	RESCUE- Green Supreme	BMWi TN Strom	BMWi TN H2G	BMWi TN PtG / PtX
1) Flächennutzungs-konkurrenz	2030	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	2050	Orange	Orange	Yellow	Orange	Orange	Yellow
2) Regelungen zur Ausgestaltung der Energiewende	2030	Yellow	Yellow	Yellow	Orange	Yellow	Yellow
	2050	Red	Red	Yellow	Red	Red	Orange
3) Wohn- und Lebensqualität vor Ort	2030	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	2050	Red	Red	Orange	Red	Red	Orange
4) Nutzung von Technologien und Infrastruktur	2030	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Orange
	2050	Orange	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange

geleistet werden, Konflikte, die mit der Umsetzung der Energiewende im Strombereich verbunden sind, hinsichtlich ihres (zukünftigen) Konfliktpotenzials zu bewerten.

Im Projekt SyKonaS<sup>1</sup> wurde eine Typologie von Energiewendekonflikten erarbeitet und um eine korrespondierende Aufarbeitung bestehender Instrumente zur Konfliktbearbeitung ergänzt. Auf dieser Basis wurde das Konfliktpotenzial verschiedener Energiewendeszenarien mittels eines Indikatorensystems abgeschätzt (► Abbildung 2). Die Analyse zeigt auf, dass je nach gewählten Energiewendepfaden bzw. Technologieschwerpunkten Konflikte unterschiedlich schwer ausfallen können.

Zugleich bestehen aber auch Themen, die szenario-unabhängig zu schweren Konflikten führen können. Mittels einer semi-quantitativen Systemanalyse (Cross-Impact Bilanzanalyse) konnten zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen Konfliktlinien und Richtungsentscheidungen der Energiewende abgeschätzt werden, die es für die weitere Umsetzung zu beachten gilt. Zukünftig sollten sozio-technische Aspekte daher in techno-ökonomische Energiewendeszenarien integriert werden. Dadurch können frühzeitig bzw. vorausschauend Informationen für Energiewendeakteure zur Verfügung gestellt werden, welche Konfliktthemen in besonderem Maße mit Konfliktlösungsinstrumenten bei der Wahl von konkreten Energiewendepfaden, aber auch pfadunabhängig, für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende bespielt werden müssen. Dies bietet die Möglichkeit, bestehende Instrumente auf zu erwartende Konfliktthemen anzupassen und dadurch die Resilienz des Energiesystems insgesamt zu erhöhen.

### Datengrundlage

Eine fundierte Bewertung der Resilienz erfordert zudem eine gute Datengrundlage über das heutige Energiesystem mit all seinen Teilsystemen von der Stromerzeugung über den Transport bis zu den Verbrauchern. Der Datenbedarf modellgestützter Resilienzanalysen umfasst dabei nicht nur Bestandsinfrastrukturen, sondern beinhaltet z.B. auch Informationen über die Nachfrageentwicklung und die Ausprägung von Stressfällen.

Der schnell fortschreitende Klimawandel und die daher notwendige beschleunigte Dekarbonisierung des Stromsektors rücken auch die erneuerbaren Energien immer stärker ins Blickfeld der Resilienz-bewertung. Die Stromerzeugung aus diesen zahlreichen und dezentralen Energieanlagen ist aufgrund strenger Datenschutzrichtlinien in Deutschland derzeit nicht öffentlich verfügbar. Die Bestimmung der Stromerzeugung aus wetterabhängigen erneuerbaren Energien, wie Windenergie und Photovoltaik, kann stattdessen mit Hilfe von Simulationsmodellen unter Verwendung detaillierter Anlagen- und Wetterdaten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung berechnet werden (Lehneis et al. 2022). Die räumlich aufgelöste Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Verbindung mit dem Stromverbrauch zeigt mögliche Schwachstellen auch bezüglich der Resilienz im Energiesystem auf. Mittels aussagekräftiger Kennzahlen, wie z.B. der Deckungsrate = Stromerzeugung / Stromverbrauch, lassen sich lokal vorhandene Defizite bzw. noch ungenutzte Potenziale mit hoher räumlicher Auflösung analysieren.

► Abbildung 2

#### Matrix der Konfliktbewertung von Szenarien

anhand ausgewählter Indikatoren (Ausschnitt). Das Konfliktpotenzial steigt von gelb über orange zu rot an.

(Quelle: SyKonaS)

<sup>1</sup> Forschungsprojekt SyKonaS - Systemische Konfliktanalyse mittels Szenariotechnik, <https://www.enargus.de/search/?q=01226362%2F1>

## Weiterentwicklung von Technologien

Für die Entwicklung resilienter Transformationspfade ist zu beachten, dass zukünftige Technologieentwicklungen und -sprünge die optimale Auslegung eines Energiesystems stark beeinflussen können. Damit einhergehende Kostensenkungen haben in der Regel keinen offenkundigen negativen Einfluss auf die Resilienz des Gesamtsystems. Unterschiedliche Kostenentwicklungen verschiedener, miteinander in Konkurrenz stehender Technologien können jedoch dazu führen, dass sich die Konkurrenzfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit einzelner Technologien, Standorte und Infrastruktursysteme verändern.

Ein einfaches Beispiel für diesen Effekt ist die Veränderung des optimalen Verhältnisses von Wind- zu Solarenergie der H<sub>2</sub>-Produktion, das sich mit sinkenden Kosten für die Elektrolysetechnologie hin zu mehr Solarenergie verschiebt (Niepelt et al. 2023). Während die Technologieentwicklung überall in Europa zu sinkenden H<sub>2</sub>-Gestehungskosten führt, rücken die Regionen jedoch preislich enger zusammen. Dies könnte zu einer konkurrenzfähigeren Vor-Ort-Produktion von H<sub>2</sub> führen, da die Transportkosten unberührt bleiben und auch Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von H<sub>2</sub>-Transportinfrastruktur mit sich bringen. Bei der Ableitung resilienter Transformationspfade sollten Möglichkeiten zur Weiterentwicklung von Technologien daher mitbetrachtet werden.

Jede planerische Maßnahme zur Steigerung der Resilienz muss sich im übergeordneten Konzept der Nachhaltigkeit messen lassen und sich dabei in einem Entscheidungsprozess behaupten. Auch wenn die Entscheidung für oder gegen eine Resilienzmaßnahme auf den ersten Blick trivial erscheint, werden beim genaueren Hinschauen verschiedene Zielkonflikte deutlich. Diese Zielkonflikte betreffen insbesondere die Effizienz (z.B. führt eine höhere ökonomische Effizienz zu weniger Resilienz aufgrund geringerer Redundanz) und/oder Suffizienz technologischer Optionen, die bei der Wahl potenzieller Resilienzmaßnahmen eine Rolle spielen können.

Im Kontext der Energiesystemtransformation hat das Projekt ReMoDigital<sup>2</sup> untersucht, inwieweit sich verschiedene Konstellationen von PV-Batteriespeichern in Heimsystemen (PVBS) und private Ladepunkte für Batteriefahrzeuge, sowie stationäre Großbatteriespeicher auf die Resilienz und Nachhaltigkeit am Beispiels eines MONA 44 Referenznetzwerkes auswir-

ken (Netz et al. 2023). Es konnte gezeigt werden, dass die zusätzliche PVBS in Verbindung mit einem Großbatteriespeicher die Resilienz gegenüber externen disruptiven Ereignissen erhöhen. Dabei hatte der Großbatteriespeicher den höchsten Resilienzbeitrag mit bis zu 20% weniger Ausfällen im Vergleich zu einem Verteilnetz ohne zusätzliche Resilienzmaßnahmen. Aus ökonomischer und ökologischer Perspektive stellt der Großspeicher jedoch in diesem Beispiel wesentlich höhere „Speicher-/Stromgestehungskosten“ sowie höhere Umweltwirkungen im Bereich Klimawandel sowie Ressourcenverbrauch (Mineralien und Metalle) im Vergleich zu den PVBS-Maßnahmen dar. Dies unterstreicht die Relevanz des multikriteriellen Entscheidungsproblems, das durch die zusätzliche Dimension der Resilienz nochmals komplexer wird. Daher werden in Zukunft Methoden benötigt, die Resilienz und Nachhaltigkeitsperspektiven gleichzeitig in den Blick nehmen können.

Städtische Resilienz wird in großem Maße von der Funktionsfähigkeit kritischer Dienste wie Kommunikation und Gesundheitsversorgung bestimmt, die in zunehmendem Maße von einer zuverlässigen Stromversorgung abhängen (Ottenburger et al. 2023). Vor dem Hintergrund zunehmender Risiken müssen vor allem kritische Lasten stärker in der Energiesystemplanung berücksichtigt werden.

Allerdings ist die Energiewende in städtischen Verteilnetzen aufgrund begrenzter räumlicher Kapazitäten und zahlreicher Randbedingungen nicht trivial. Dennoch eröffnet dieser Prozess eine einzigartige Gelegenheit, über die Auswirkungen von Design-Entscheidungen auf Resilienz, Nachhaltigkeit und soziale Gerechtigkeit nachzudenken.

Lokale intelligente Stromnetze, sog. Microgrids, welche unabhängig vom Verteilnetz (off-grid) betrieben werden können, um eine lokale und dezentrale Stromversorgung aufrechtzuerhalten, stellen aus Sicht der Resilienzforschung ein vielversprechendes Konzept dar, das in vielen Teilen der Welt erfolgreich angewandt wird. Microgrids haben das Potenzial, systemische Risiken zu minimieren und kritische Dienste gezielt zu schützen. Allerdings sollte bei der Planung von Microgrids ein bisher wenig beachteter Aspekt stärker berücksichtigt werden, nämlich die Schaffung neuer räumlicher Grenzen. Die Festlegung von Grenzen ist ein subtiler Planungsparameter, da Grenzen stets mit sozialen Implikationen verbunden sind und Fragen zur Gerechtigkeit und Fairness provozieren. Außerdem kann eine ungünstige Microgrid-Planung unter Umständen die städtische Resilienz auf ein

<sup>2</sup> Projekt ReMoDigital – Resilienzmonitoring für die Digitalisierung der Energiewende. Gefördert aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, BMWK FKZ: 03E11020C

niedrigeres Niveau drücken, als möglich gewesen wäre, ohne dass notwendigerweise mehr Geld investiert worden wäre.

## Fazit

Zusammengefasst unterstreichen die Forschungsarbeiten der Institute im FVEE die Notwendigkeit der Entwicklung und Anwendung neuer Instrumente und Methoden für die Resilienzbewertung nachhaltiger Energiesysteme. Diese muss begleitet werden durch die Ermittlung belastbarer Daten zur zukünftigen Entwicklung von Technologien und Systemen. Für die modellgestützte Ermittlung von resilienten Transformationspfaden für das Energiesystem müssen gleichermaßen die Wirkung von disruptiven Ereignissen und von Stressfällen in den Blick genommen werden. Dabei ist es erforderlich, neben techno-ökonomischen und ökologischen Aspekten auch das sozio-ökonomische System in Betracht zu ziehen. Zudem gilt es, auch sich überlagernde Ereignisse in Betracht zu ziehen, da ein resilientes System auch gegen solche gewappnet sein muss.

## Referenzen

- Merten, F., Doré, L., Pastowski, A. (2023) Grüner Wasserstoff und Wasserstoffderivate – Kernelemente einer nachhaltigen und sicheren Energieversorgung Deutschlands, Forschungsbericht.
- Sasanpour, S., Cao, K.-K., Gils, H.C., Jochem, P. (2021) Strategic policy targets and the contribution of hydrogen in a 100% renewable European power system. *Energy Reports*, pp. 4595-4608. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.005>
- Gils, H.C., Yeligeti, M., Sasanpour, S. (2023) Resilienzbewertung zukünftiger integrierter Energiesysteme mit einem optimierenden Infrastrukturplanungsmodell, 13. Internationale Energiewirtschaftstagung
- Härtel, P., Frischmuth, F. (unveröffentlicht) EMPRICE – Multistage stochastic programming with progressive hedging for planning integrated energy system transformations under uncertainty, under Review.
- Lehneis, R., Manske, D., Schinkel, B., Thrän, D. (2022) Spatiotemporal Modeling of the Electricity Production from Variable Renewable Energies in Germany. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 11, 90. <https://doi.org/10.3390/ijgi11020090>
- Niepelt, R., Schlemminger, M., Bredemeier, D. et al. (2023) The influence of falling costs for electrolyzers on the location factors for green hydrogen production. *Sol. RRL*, 7, 2300317. <https://doi.org/10.1002/solr.202300317>
- Netz, H., Schönwandt, I., Wigger, H.; et al. (2023) Integrating sustainability and resilience aspects into power system technology assessments. IEEE PES ISGT Europe 2023, Grenoble, France, accepted for presentation
- Ottenburger, S.S., Ufer, U. (2023) Smart cities at risk: Systemic risk drivers in the blind spot of long term governance, *Risk Analysis*; pp. 1-11, <https://doi.org/10.1111/risa.14102>
- Wallace (2000) Decision Making Under Uncertainty: Is Sensitivity Analysis of Any Use? In *Operations Research* 48 (1), pp. 20-25. DOI: 10.1287/opre.48.1.20.12441