



Vergleich kommerzieller und freier Solver bei der Durchführung von Netzbetriebssimulationen

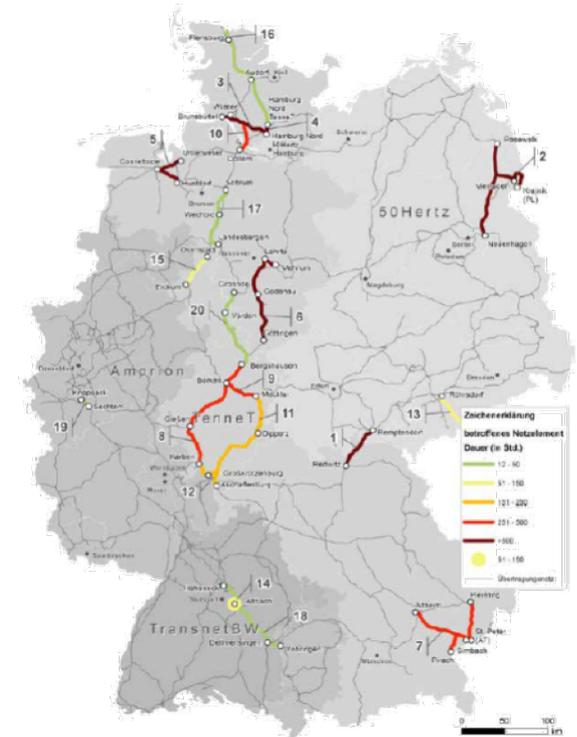
Christian Bredtmann
Jan Kellermann
Albert Moser

Hintergrund und Motivation

Hintergrund

- Zubau von Erzeugungsanlagen auf Basis Erneuerbaren Energien (EE-Anlagen)
- Vermehrte dargebotsabhängige, dezentrale und lastferne Einspeisung
- ➔ Zuwachs des Transportbedarfs im Übertragungsnetz
- Netzausbau verzögert gegenüber EE-Anlagenausbau
 - Steigende Anzahl von Netzengpässen im Übertragungsnetz
 - Netzbezogene Maßnahmen, Redispatch und Einspeisemanagement
- ➔ Optimierung der Maßnahmen mit Hilfe von Netzbetriebssimulationen

Von Engpässen am stärksten betroffene Netzelemente



Quelle: Monitoringbericht 2016

Betroffenes Netzelement (Dauer in h/a)



Hintergrund und Motivation

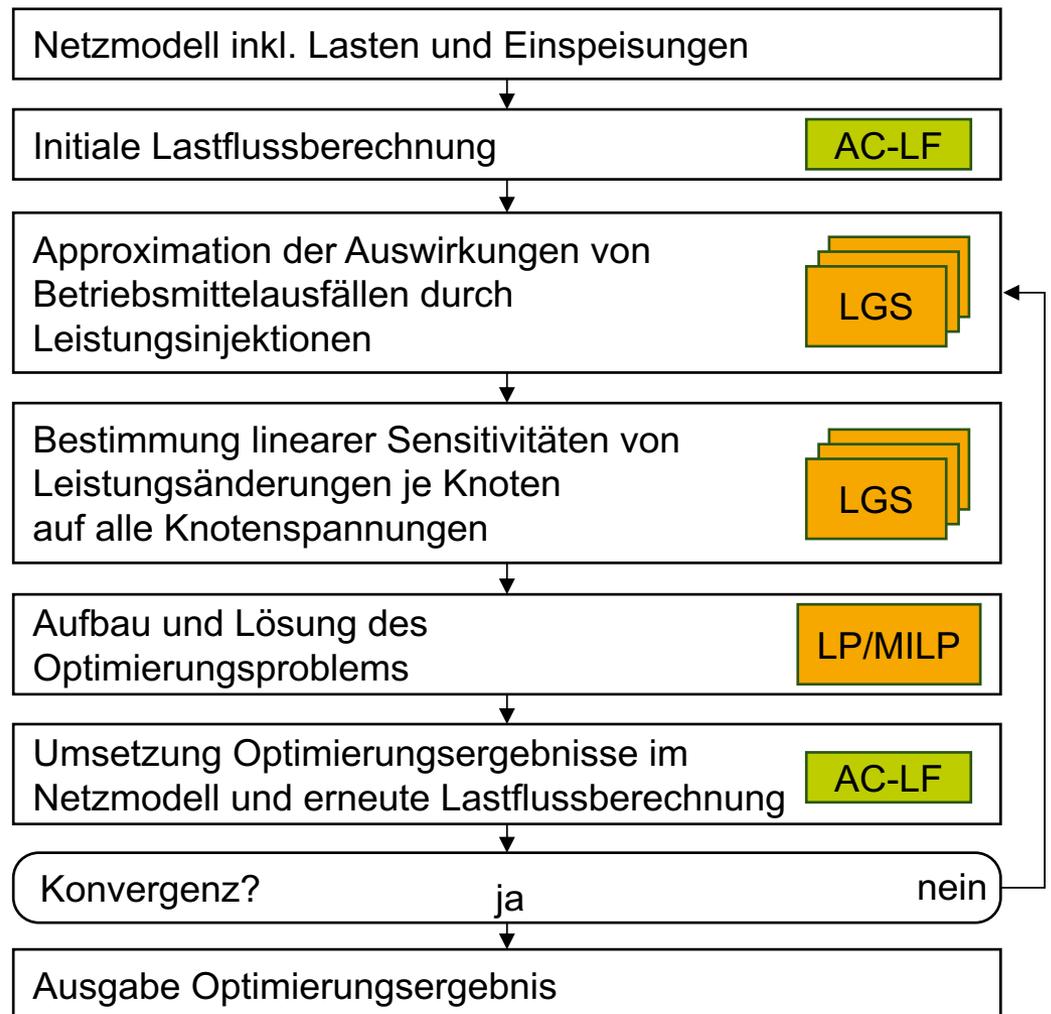
Motivation

- Modelldetails und Problemgröße steigen stetig an
 - Rechenzeit und Robustheit zunehmend von Bedeutung
 - Zwei rechenzeitintensive Vorgänge
 - Bestimmung von Sensitivitäten der Maßnahmen auf Netzengpässe in Form des Lösen von linearen Gleichungssystemen (LGS)
 - Lösen des gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems (GGLP)
- ➔ Nutzung bestehender, leistungsfähiger Solver bietet sich an
- Kriterien zur Beurteilung der Solver
 - Verfügbarkeit (frei, proprietär)
 - Kosten (kostenlos, Lizenzgebühren)
 - Leistungsfähigkeit
- ➔ Gegenüberstellung und Bewertung ausgewählter kommerzieller und frei verfügbarer Bibliotheken für realitätsnahe Netzbetriebssimulationen

Problembeschreibung

Überblick Verfahrensablauf

- Lastflussberechnung
- Ausfallrechnung
- Optimierte Engpassbehebung
- Sukzessiv linearisierter, iterativer Ansatz
- Ermittlung von relevanten Engpässen mittels linearer Approximation
- Bestimmung der Sensitivitäten
- ➔ Lösen von LGS
- Bestimmung der Maßnahmen
- ➔ Lösen von ganzzahligen Optimierungsproblemen



Problembeschreibung

- Formulierung des Optimierungsproblems
 - Standardform für GGLP (bzw. für LP) zur Minimierung einer linearen Zielfunktion
 - Reelle oder ganzzahlige/binäre Entscheidungsvariablen (Kraftwerkseinsatz, Phasenschiebertransformatoren, etc.)
 - Stromgrenzen relevanter Zweige im ungestörten Betrieb sowie im (N-1)-Fall
 - Zulässiger Wertebereiche der Maßnahmen
 - Mindestbetriebs- und Mindeststillstandszeiten

- Bestimmung der Sensitivitäten

$$\underline{\vec{S}} = 3 \cdot \mathbf{diag}(\underline{\vec{U}}) \cdot \underline{\mathbf{Y}}^* \cdot \underline{\vec{U}}^*$$

$$\mathbf{J} \cdot \Delta \underline{\vec{U}} = \Delta \underline{\vec{S}} \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{J} \cdot \begin{pmatrix} \Delta U \\ \Delta \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}$$

- Lösen von linearen Gleichungssystemen

1. Symbolische Faktorisierung
2. Numerische Faktorisierung
3. Lösen für eine oder mehrere rechte Seiten (engl. Right-Hand-Sides, RHS)

Vorstellung Solver für lineare Gleichungssysteme

- Solver zum Lösen LGS bzw. zur Bestimmung der Sensitivitäten
- Alle Solver spezialisiert auf dünnbesetzte Matrizen
- Für nicht-kommerzielle Zwecke nutzbar (Open Source oder Community Lizenz)
- Bibliotheken gut dokumentiert, aktiv weiterentwickelt, große Community

Name	Lizenz	Letzte Aktualisierung (Stand 01/2018)
Eigen SparseLU	Open Source, Mozilla MPL2	Eigen3-beta, 17.01.2018
Eigen BiCGSTAB	Open Source, Mozilla MPL2	Eigen3-beta, 17.01.2018
SuiteSparse UMFPACK	Open Source, GNU GPL 2.0 Modul CHOLMOD: GNU LGPL 2.1 Modul AMD: BSD 3-clause	v5.7.6, 05/2016
SuiteSparse KLU	Open Source, GNU LGPL 2.1 Module AMD/COLAMD: BSD 3-clause	v1.3.8, 05/2016
Intel MKL PARDISO	Kommerziell Community und Academic Lizenzen	v2018.0.1, 10/2017

➔ Untersuchung der einzelnen Solver für gegebenes System

Vorstellung Solver für LP/GGLP-Optimierungsprobleme

Name	Lizenz	Letzte Aktualisierung (Stand 01/2018)
CPLEX	kommerziell	v12.8, 10/2017
Gurobi	kommerziell	v7.5.1, 2017
Xpress	kommerziell	v8.4.5, 01/2018
MINOS	kommerziell	v5.5, 2013
COIN-OR Cbc/Clp	Open Source, Eclipse Public License	Cbc v2.9.9, 06/2017 Clp v1.16.11, 06/2017
GLPK	Open Source, GNU GPL	v4.64, 12/2017
SCIP	Open Source, ZIB Academic License	v5.9, 12/2017
LP_SOLVE	Open Source, GNU LGPL	v5.5, 09/2016

- Ergebnis Voruntersuchungen
 - CPLEX und Gurobi leistungsfähigste kommerzielle Solver
 - COIN-OR Cbc/Clp leistungsfähigster freier Solver
 - ➔ Im Fokus der weiteren Untersuchungen

Methodisches Vorgehen

- Optimierungsframework
 - Modulare Struktur
 - Solver austauschbar ohne Beeinflussung der restlichen Teile der Berechnungen
 - ➔ Gute Vergleichbarkeit der verschiedenen Solver bei sonst gleichen Bedingungen
 - Nutzung Lineare-Algebra/Matrix-Bibliothek Eigen
 - BLAS/LAPACK-Bibliothek Intel Math Kernel Library (MKL)
 - Parallelisierung von Gurobi, CPLEX und Cbc aktiviert
- Bewertungsgrößen
 - Rechenzeit (mehrfache Messungen mit Mittelwertbildung)
 - Residuum für Solver der LGS: $r = \|b - A \cdot x_0\|$
 - Zielfunktionswert bei Solvern zu LP/GGLP
- Realitätsnahe Rechenzeitmessung
 - Vermeidung „heißer“ Caches, Prefetching etc.
 - Keine Mikro-Benchmarks
 - Messungen anhand eines normalen Optimierungslaufs durchgeführt

Ergebnisse

Untersuchtes System

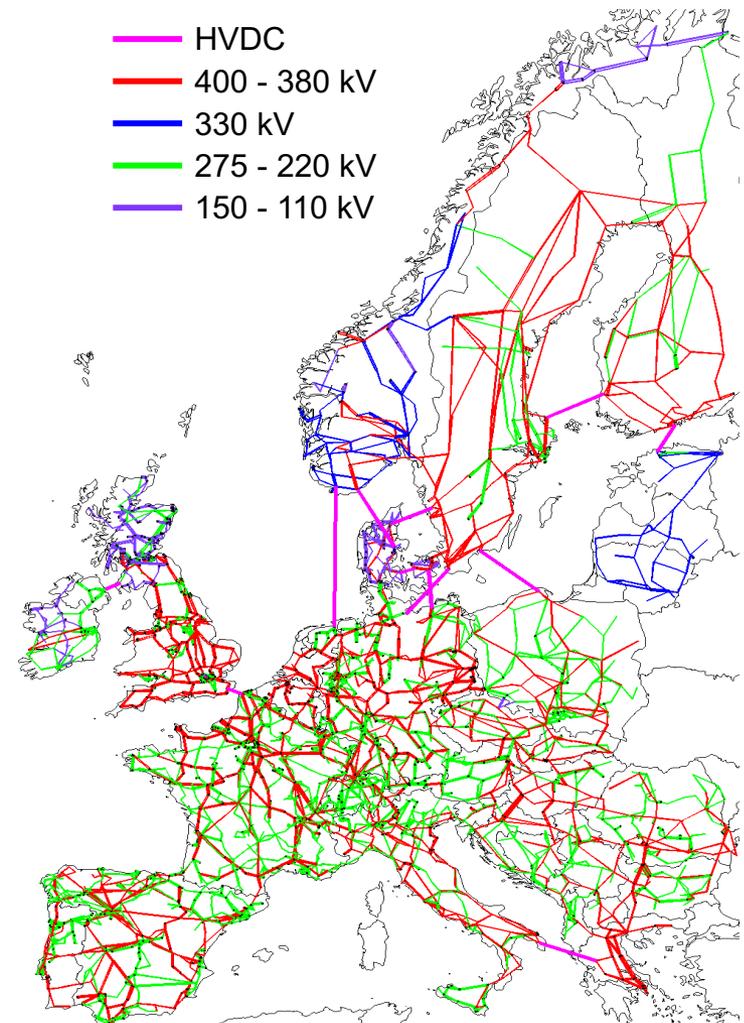
- Kontinentaleuropäisches Übertragungsnetz
 - 11.000 Knoten
 - 13.000 Zweige
 - 600 steuerbare Elemente (insb. Kraftwerke und Phasenschiebertransformatoren)
- Konsistente Kraftwerkseinsätze für 24 konsekutive Stunden (für Zeitkopplung)

Testumgebung

- 64-bit Linux Systemumgebung (Kernel v3.10)
- Intel Xeon CPU E5-2670 v3
 - 48 Kerne (24 physikalische Kerne mit Hyperthr)
 - 30 MB L3-Cache
- 256 GiB RAM

Einstellungen für GGLP-Optimierung

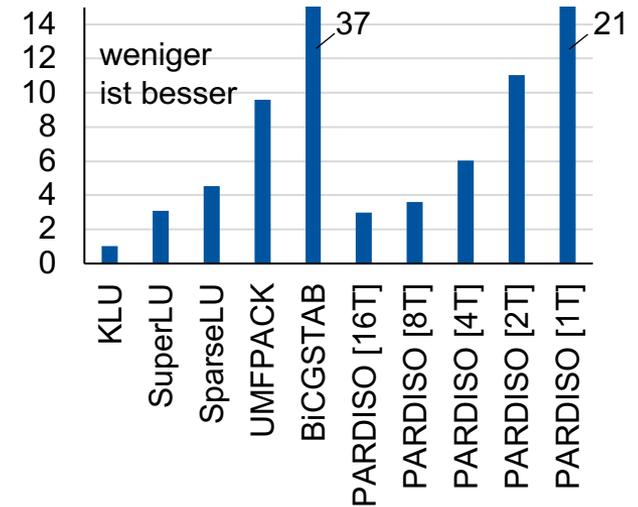
- MIP-Gap: 0,01
- Anzahl möglicher Threads: 32



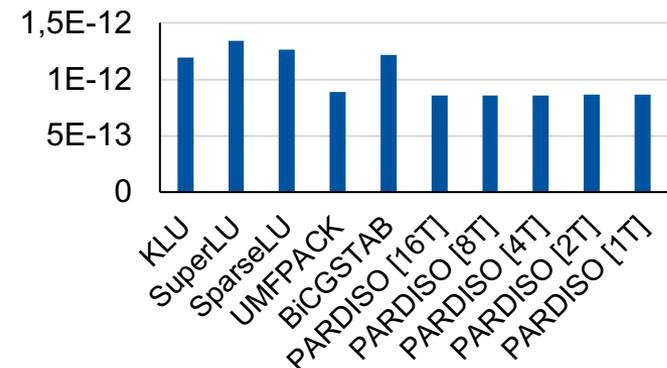
Ergebnisse – Solver für lineare Gleichungssysteme

- Lineares Gleichungssystem (gemittelte Werte)
 - etwa 22.000 Zeilen/Spalten
 - sehr dünnbesetzt (nur 0,029% Non-Zeros)
 - 637 zu lösende rechte Seiten
 - Gesamtrechenzeit
 - auf schnellsten Solver skaliert
 - KLU um mindestens Faktor 3 performanter
 - Iterativer Solver BiCGSTAB deutlich langsamer
 - PARDISO nur mit Multithreading vergleichbare Performance
 - Residuen
 - Residuum für alle Solver in ähnlich guten Bereich von maximal $1.35E-12$.
- ➔ Große Potentiale zur Rechenzeitreduktion bei geeigneter Auswahl der Solver

Rechenzeit (skaliert)



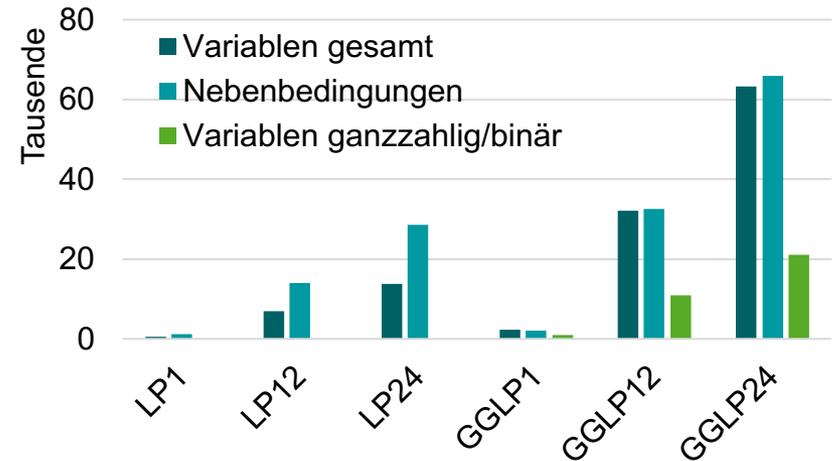
Residuum (2-Norm)



Ergebnisse – Solver für LP/GGLP

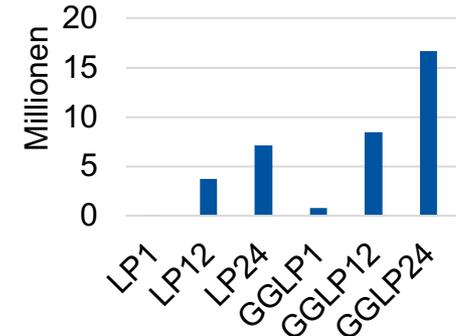
- Untersuchung verschiedener Optimierungsgrößen und -typen
 - Ohne Ganzzahligkeitsentscheidungen (LP)
 - Mit KW-Einschaltentscheidung und ganzzahliger PST-Stufung (GGLP)
 - Einzelstunde ohne Zeitkopplung
 - 12-stündige / 24-stündige Optimierung mit Zeitkopplung

Untersuchte Problemgrößen



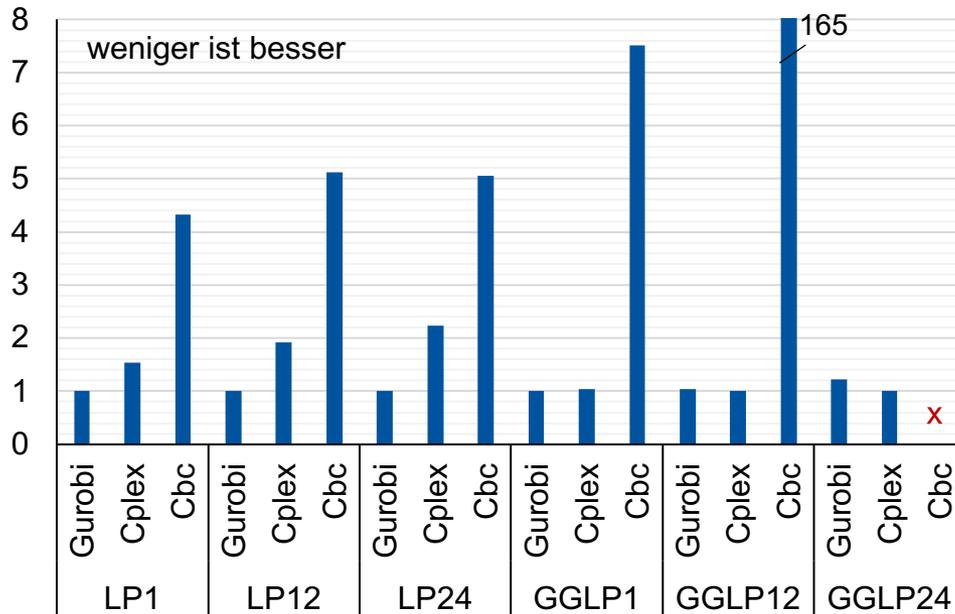
Name	Betrachtete Stunden	Variablen gesamt	Variablen ganzzahlig/binär	Nebenbedingungen	Non-Zeros
LP1	1	610	0	1.133	338.410
LP12	12	7.037	0	14.019	3.737.693
LP24	24	13.798	0	28.565	7.155.304
GGLP1	1	2.264	974	2.093	740.198
GGLP12	12	32.211	10.860	32.535	8.484.389
GGLP24	24	63.340	21.000	65.907	16.664.620

Non-Zeros

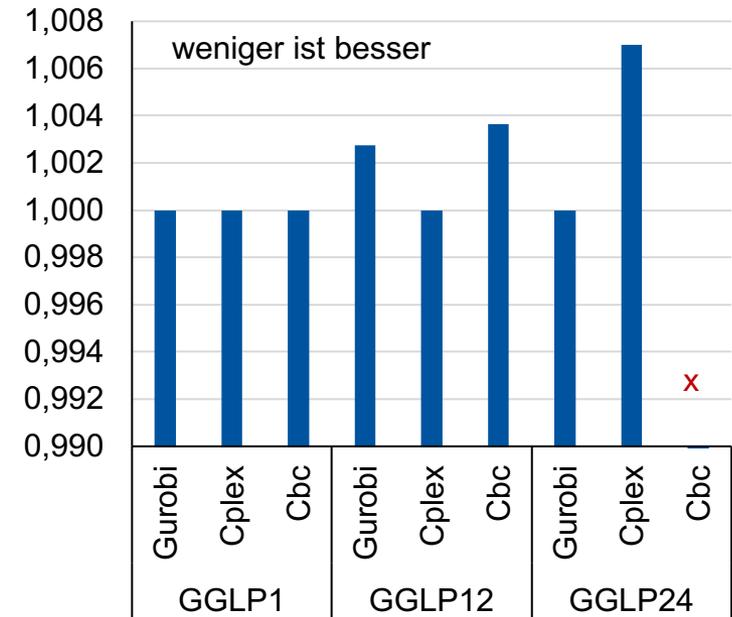


Exemplarische Ergebnisse – Solver für LP/GGLP

Rechenzeit (skaliert)



Zielfunktionswert (skaliert)



- Rechenzeit skaliert auf schnellsten Solver
- LP: Gurobi schnellster Solver
- GGLP: Gurobi/CPLEX etwa gleich schnell, Cbc deutlich langsamer
Cbc findet bei 24-stündigem GGLP keine Lösung

Zusammenfassung und Fazit

Hintergrund und Motivation

- Relevanz von Optimierungen im Rahmen von Netzbetriebssimulationen
- Steigende Modelldetails und Problemgrößen
- Rechenzeit und Robustheit zunehmend von Bedeutung
- ➔ Gegenüberstellung und Bewertung ausgewählter kommerzieller und frei verfügbarer Bibliotheken für rechenintensive Aufgaben

Ergebnisse

- Großes Potentiale zur Reduktion der Rechenzeit durch gezielte Auswahl geeigneter Bibliotheken bei sonst unveränderter Problemformulierung
- Beim Lösen der vorliegenden LGS weist KLU die niedrigste Rechenzeit auf
- Beim Lösen von LP/GGLP weisen die kommerziellen Solver CPLEX und Gurobi die niedrigsten Rechenzeiten auf
- Beim größten GGLP konnte von COIN-OR Cbc keine Lösung innerhalb annehmbarer Rechenzeit ermittelt werden