Modellierung einer Windenergieanlage zur Untersuchung tonaler Schallabstrahlung

Boris Dilba[1], Marian Markiewicz[1], Otto von Estorff[2]

[1] *Novicos GmbH, 21073 Hamburg, E-Mail:dilba@novicos.de*

[2] *TU Hamburg-Harburg, Inst. f. Modellierung und Berechnung, 21073 Hamburg*

Einleitung

Mit Hilfe geeigneter numerischer Simulationsmethoden ist es möglich, schon in frühen Entwicklungsphasen ein Verständnis der Interaktion einzelner Komponenten sowie deren Einfluss auf die Schallabstrahlung der gesamten Windenergieanlage zu untersuchen und Vorgaben für Hersteller abzuleiten. Von besonderem Interesse ist die Untersuchung tonaler Komponenten, resultierend vom Getriebe, dem Maschinenträger oder dem Rotor. Das frühe Verständnis des detaillierten Schallabstrahlverhaltens der Windenergieanlage kann kostspielige Nachbesserungen und Ausfallzeiten vermeiden.

In diesem Beitrag wird ein effizientes numerisches Simulationsverfahren vorgestellt, mit dem die tonale Schallabstrahlung der Windenergieanlage berechnet werden kann. Das Strukturverhalten der Windenergieanlage wird mittels einer Substrukturtechnik basierend auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) modelliert, bei der die Frequenzübertragungsfunktionen (FRFs) der Subsysteme miteinander gekoppelt werden. Die Güte der Modellierung wird durch eine Validierung gegen Messdaten ermittelt.

Aus der Strukturmodellierung werden die Oberflächenschnellen abgeleitet, die die Eingangsdaten für die Akustiksimulation darstellen. Da es sich um ein akustisches Außenraumproblem handelt, bei dem Auswertungen im Fernfeld an den IEC-Messpunkten von großem Interesse sind, wird die Boundary-Elemente-Methode (BEM) verwendet. Auf Grund der Speicher- und Rechenzeitlimitierung der Standard BEM, kommt hier das schnelle BEM-Verfahren der hierarchischen Matrizen zum Einsatz. In Abhängigkeit verschiedener Anregungen, werden die Richtcharakteristik sowie Schallfelder der Windenergieanlage berechnet und dargestellt.

1. Reduzierte Strukturmodellierung der Windenergieanlage

Die Windenergieanlage besteht aus verschiedenen Komponenten, die im Rahmen ihrer Fertigungsprozesse einzeln geprüft werden. Im Hinblick auf tonales Verhalten der Windenergieanlage sind diese Einzelprüfungen allerdings nicht sehr aussagekräftig, da erst durch die Verbindung der einzelnen Komponenten das dynamische Strukturverhalten der Windenergieanlage definiert wird.

Für die Strukturmodellierung der Windenergieanlage wird ein auf FRFs basierender Substrukturierungsansatz gewählt. Bei diesem Vorgehen werden die FRFs des Gesamtsystems durch Kopplung der FRFs der Subsysteme erzeugt. Um eine effiziente und stabile Kopplung zu gewährleisten, sollten so wenige Koppelpunkte wie möglich bei der Unterteilung in Subsysteme erzeugt werden. Zwischen den Koppelpunkten zweier Subsysteme werden entsprechende Verbindungseigenschaften definiert, so dass die Lagersteifigkeiten (Getriebe, Generator, Hauptlager, etc.) in den FRFs des Gesamtsystems berücksichtig werden. Im Rahmen dieser Analyse stehen die Antriebsstrangkomponenten im Vordergrund, das führt zu einer Unterteilung der Windenergieanlage in 5 Subsysteme:

1. Turm + Maschinenträger
2. Gondelgehäuse
3. Getriebe
4. Generator
5. Rotor + Blätter

Abbildung 1 zeigt die auf die Koppel- und Auswertepunkte reduzierten Subsysteme.

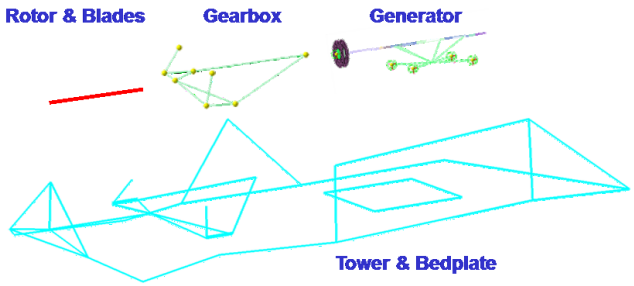

Abbildung 1: Reduzierte Subsysteme der Windenergieanlage

Die FRFs der einzelnen Teilsysteme werden basierend auf der modalen Superposition bestimmt, so dass sich zum Bestimmen der gekoppelten FRFs des Gesamtsystems folgendes Vorgehen ergibt:

1. Modenberechnung für alle Subsysteme
   - Modenbasierte FRF-Berechnung der Subsysteme
2. Definition der Koppeleigenschaften zwischen den Subsystemen
   - Steifigkeit, Dämpfung
3. Berechnung der gekoppelten FRFs
   - Algorithmus basierend auf der Singulärwertzerlegung

Sind die gekoppelten FRFs bestimmt, können durch das Aufbringen von Lastkollektiven die Systemantworten des reduzierten Gesamtmodells der Windenergieanlage berechnet werden.

Im Hinblick auf die akustische Simulation müssen die Oberflächenschnellen der schallemittierenden Flächen der Windenergieanlage, bestehend aus dem Turm, dem Gondelgehäuse und den Rotorblättern, bestimmt werden. Hierzu werden die Schnittkräfte in den Koppelstellen zwischen den abstrahlenden Subsystemen bestimmt und in einer Nachrechnung als entsprechende Last definiert. Zum Lösen der Lastfälle der abstrahlenden Teilsysteme bietet sich die modale Superposition an, da die Moden bereits für die FRF-Berechnung der Teilsysteme bestimmt wurden.

2. Boundary Elemente Methode (BEM)

Die akustische Wellengleichung für den eingeschwungenen Zustand, d.h. zeitlich harmonische Schwingungen, ist durch

$$\Delta p(\boldsymbol{x}) + k^2 p(\boldsymbol{x}) = 0 \quad \boldsymbol{x} \in \Omega \quad k = {}^{\omega}/_{c} \tag{1}$$

gegeben. Gleichung (1) ist auch als Helmholtzgleichung bekannt. Die Wellenzahl ist durch $k = \omega/c$ mit der Schallgeschwindigkeit c und der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ gegeben. Partielle Integration der schwachen Formulierung von (1) zusammen mit der Fundamentallösung

$$G(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) = \frac{1}{4\pi |\boldsymbol{x} - \boldsymbol{y}|} e^{-ik|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}|} \tag{2}$$

$$\Delta G(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) + k^2 G(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) = -\delta(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$$

führen auf die Randintegralgleichung (BIE)

$$c(\boldsymbol{y})p(\boldsymbol{y}) + \int_{\partial\Omega} \frac{\partial G(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})}{\partial n(\boldsymbol{x})} p(\boldsymbol{x}) \partial\Omega(\boldsymbol{x}) = i\rho\omega \int_{\partial\Omega} G(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) v_n(\boldsymbol{x}) \partial\Omega(\boldsymbol{x}) \tag{3}$$

mit der Dichte ρ, dem akustischen Druck p und der Geschwindigkeit v_n in Normalenrichtung $\vec{n}$. Nach der Diskretisierung von (3) führt die Verwendung der Kollokationsmethode auf das lineare Gleichungssystem (4), vgl. [1] und [2].

$$\left(\frac{1}{2} I + K\right) p = i\rho\omega V v_n \tag{4}$$

Für die gewöhnliche BEM sind die Matrizen K und V voll besetzt, so dass sich ein quadratischer Speicherbedarf ergibt. Das direkte Lösen von (4) führt zu einem kubischen (n^3) Lösungsaufwand. Iteratives Lösen kann den Aufwand auf mn^2 mit $m < n$ reduzieren. Der Speicherbedarf und die Lösungszeit stellen die limitierenden Faktoren der mit der BEM berechenbaren Problemgrößen dar.

3. Hierarchische Matrizen für die BEM

Eine wesentliche Erweiterung des Einsatzbereiches der BEM kann durch die Verwendung von schnellen BEM-Methoden erreicht werden. Die am weitesten verbreitete Methode ist die Fast-Multipole-Methode (FMM), bei der eine Approximation des Matrix-Vektor-Produkts mit quasi-linearem Aufwand *O(n·log(n))* erzeugt wird. Die Approximation des Matrix-Vektor-Produkts ermöglicht den effizienten Einsatz von iterativen Solvern zum Lösen von (4).

Ein anderer Ansatz zur Reduzierung des Speicherbedarfs und der Lösungszeit ist die Verwendung von hierarchischen Matrizen (H-Matrizen), siehe [3] und [4]. Im Vergleich zur FMM werden bei dem Ansatz der H-Matrizen Approximationen der Systemmatrizen K und V aus Gleichung (4) erzeugt. Dabei werden einzelne Matrixblöcke durch Niedrigrangmatrizen der Form

$$A = \sum_{i=1}^{k} u_i v_i^H = UV^H \tag{5}$$

approximiert. Im Gegensatz zum analytischen Ansatz der FMM stellt das Verfahren der H-Matrizen eine algebraische Approximation der Kernfunktion dar. Wie für die FMM lässt sich mit der Methode der H-Matrizen ebenfalls eine quasi-lineare Speicherkomplexität erzielen. Des Weiteren werden durch die H-Matrix-Arithmetik Matrixoperationen, wie z.B. Matrix-Vektor-Produkt, Matrix-Matrix-Produkt, Matrixinversion und Matrixfaktorisierung, mit quasi-linearem Aufwand ermöglicht. Speziell die hierarchische LU-Faktorisierung lässt sich als effizienter Präkonditionierer für den iterativen Lösungsprozess verwenden.

4. Simulation der Schallabstrahlung

Im Fokus dieser Analyse steht die Schallabstrahlung der Windenergieanlage in Abhängigkeit von der Dynamik des Antriebsstrangs. Speziell die Übersetzung der langsamen Rotorumdrehungen in schnelle Generatorumdrehungen ruft im Getriebe verschiedenste Lastkollektive hervor, die sich auf den Antriebsstrang und den Maschinenträger übertragen und für tonales Verhalten verantwortlich sein können. Von besonderem Interesse sind die akustischen IEC-Messpunkte hinter der Windenergieanlage, die im Folgenden für 2 Lastszenarien untersucht werden. In den Lastfällen wird das Getriebe in vertikaler und horizontaler Richtung angeregt, siehe Abbildung 2.

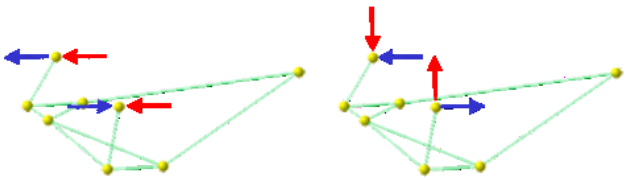

Abbildung 2: Kraftanregung am Getriebe, links Lastfall 1 und rechts Lastfall 2

Das Akustikmodell umfasst ca. 450.000 Freiheitsgrade und wird mit der Methode der hierarchischen Matrizen gelöst.

Lastfall 1

Im ersten Lastfall wird die horizontale (blau) mit der vertikalen (rot) Anregung verglichen. In beiden Fällen wird durch eine gegenphasige(180°) Kraftanregung ein Moment

erzeugt. Die resultierenden Schalldruckverläufe in einem Sektor von +/-15° hinter (0°) der Windenergieanlage sind in Abbildung 3 zu sehen.

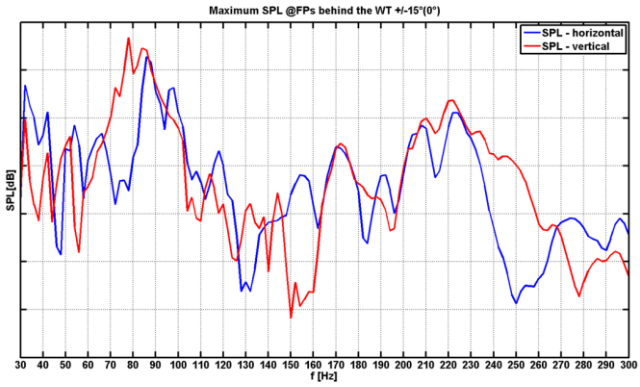

Abbildung 3: Schalldruckpegel für Lastfall 1

Die unterschiedlichen Anregungsrichtungen führen lediglich zu geringen Unterschieden in den Schalldruckpegeln hinter der Windenergieanlage. Die größte Abweichung ist bei 78Hz zu erkennen. Aus der Betrachtung der zugehörigen Richtcharakteristik für 78Hz in Abbildung 4 wird deutlich, dass die vertikale Anregung zu signifikant höheren Pegeln führt. Um eine detailliertere Aufschlüsselung der zur Schall-

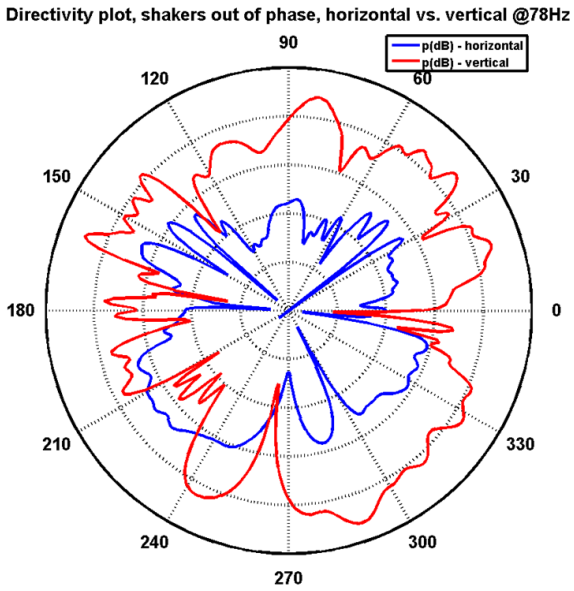

Abbildung 4: Richtcharakteristik der Windenergieanlage für Lastfall 1 bei 78Hz

abstrahlung beitragenden Oberflächenbereiche der Windenergieanlage zu erzielen, wird die Oberfläche in 3 Gruppen unterteilt: Gondel, Rotorblätter und Turm. Die zur Richtcharakteristik zugehörigen Gruppenbeiträge sind in Abbildung 5 dargestellt. Aus Abbildung 5 geht hervor, dass der Schalldruckpegel im Fernfeld durch 2 der 3 Gruppen bestimmt wird.

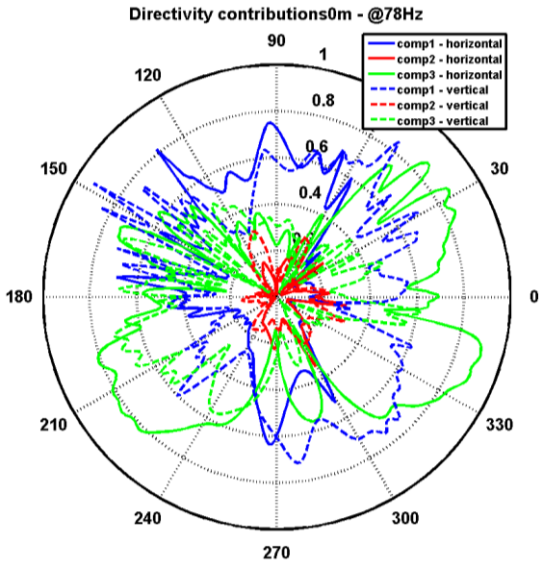

Abbildung 5: Beiträge der 3 Oberflächengruppen bei 78Hz

Die höheren Schalldruckpegel rund um die Windenergieanlage sind auch im akustischen Fernfeld deutlich sichtbar, siehe Abbildung 6.

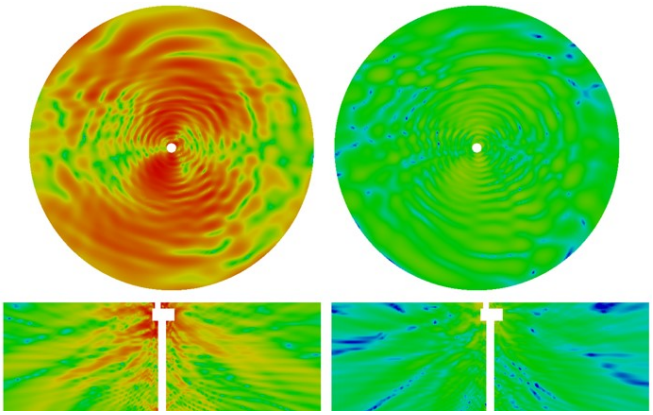

Abbildung 6: Schalldruckpegel im Fernfeld für Lastfall 1 bei 78Hz. Vertikale Anregung (links) und horizontale Anregung (rechts), (Kreisförmiges Feldpunktnetz: r=150m h=0.1m)

Lastfall 2

Im 2. Lastfall wird das Getriebe nur in horizontaler Richtung angeregt. Verglichen wird die Schallabstrahlung für eine inphasige (rot) und eine gegenphasige (blau) Kraftanregung. Die Verläufe der Schalldruckpegel hinter der Windenergieanlage zeigen fast keine Gemeinsamkeiten mehr, vgl. Abbildung 7.

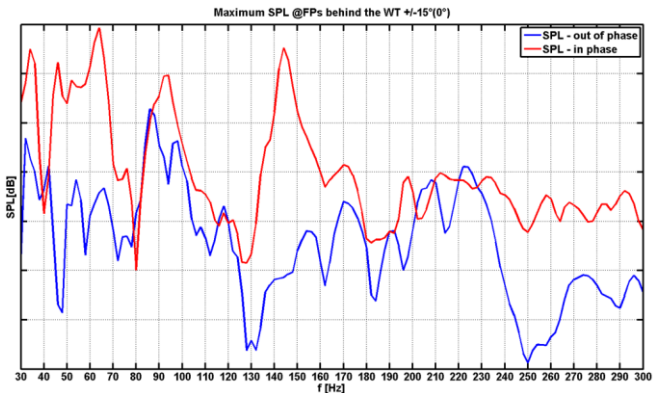

Abbildung 7: Schalldruckpegel für Lastfall 2

Im Bereich von 78Hz liegen die Schallpegel im Auswertesektor dichter zusammen als im ersten Lastfall. Bei Betrachtung der zugehörigen Richtcharakteristik in Abbildung 8 sind dennoch Unterschiede festzustellen.

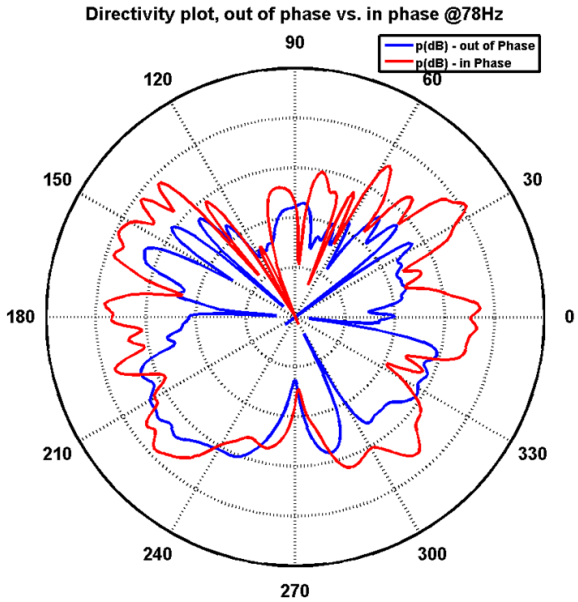

Abbildung 8: Richtcharakteristik der Windenergieanlage für Lastfall 2 bei 78Hz

Die Pegel für die inphasige Anregung sind überwiegend größer als für die gegenphasige. Auch für die Kraftanregungen im 2. Lastfall zeigt sich für 78Hz, dass die Schallabstrahlung im Fernfeld von 2 der 3 Oberflächengruppen dominiert wird.

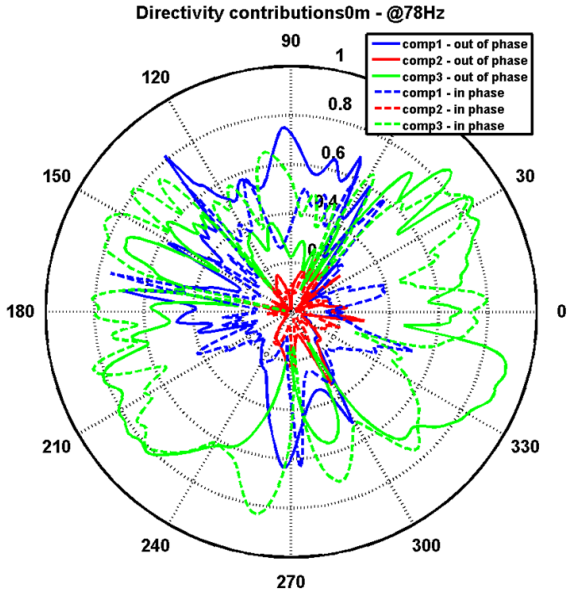

Abbildung 9: Beiträge der 3 Oberflächengruppen bei 78Hz

Wie auch schon aus der Richtcharakteristik abzulesen ist, zeigen sich im Fernfeld um die Windenergieanlage höhere Schallpegel für die inphasige Kraftanregung am Getriebe, siehe Abbildung 10. Des Weiteren kann aus der Fernfeldbetrachtung entnommen werden, dass sich die Fernfeldcharakteristik um 90° dreht.

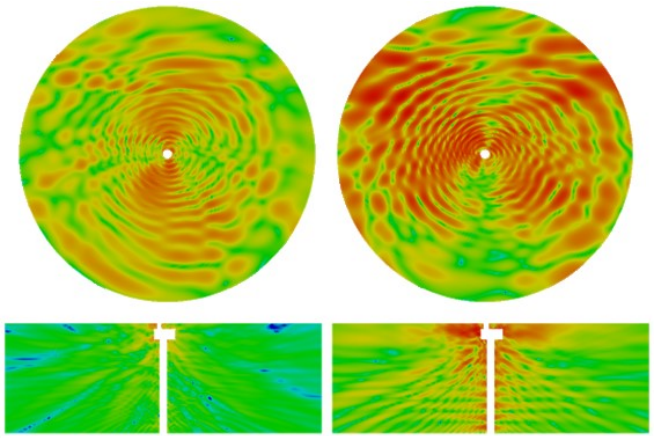

Abbildung 10: Schalldruckpegel im Fernfeld für Lastfall 2 bei 78Hz. Anregung: gegenphasige (links), inphasige (rechts), Kreisförmiges Feldpunktnetz: r=150m h=0.1m

5. Zusammenfassung

Die Simulationen der Schallabstrahlung zeigen ein sensitives, tonales Verhalten der Windenergieanlage bezüglich verschiedener Kraftanregungen am Getriebe. Dieses Verhalten wurde auch in der Realität beobachtet. Der verwendete Substrukturierungsansatz bildet das dynamische Verhalten der Windenergieanlage gut ab. Durch die reduzierte Modellgröße können Parametervariationen der Lagersteifigkeiten zwischen den Subsystemen sehr effizient simuliert werden.

Für die Akustiksimulation hat sich die schnelle BEM der H-Matrizen als robustes und effizientes Tool herausgestellt. Speziell die Anforderung der akustischen Analyse im Fernfeld macht die BEM zum Mittel der Wahl. Die in diesem Beitrag gezeigten Analysen lassen sich problemlos erweitern. Neben einer feineren Unterteilung der schallabstrahlenden Oberflächen für eine detaillierte Analyse, sind z.B. auch Schallleistungsbetrachtungen sowie Abstrahlgradberechnungen einzelner Bauteile ohne weiteres durchführbar.

Tonalitäten, die aus dem Zusammenspiel einzelner Subsysteme entstehen, können durch die gekoppelte Berechnung gut detektiert werden.

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Forschungsprojektes ALARM.

Literatur

[1] von Estorff, O., Boundary Elements in acoustics-Advances and Applications, WIT Press, Southampton, 2000

[2] Wu, T.W., Boundary Element Acoustics: Fundamentals and Computers Codes, WIT Press, 2000

[3] Bebendorf, M., Hierarchical Matrices: A Means to Efficiently Solve Elliptic Boundary Value Problems, Volume 63 of Lecture Notes in Computational Science and Engineering (LNCSE), Springer-Verlag, 2008

[4] Hackbusch, W., Hierarchische Matrizen: Algorithmen und Analysis, Springer-Verlag, 2009