





## Inhaltsverzeichnis

### 1. Antennentechnik

- 1.1. Was ist eine Antenne?
- 1.2. Funktionsweise der Antenne
- 1.3. Wirkungsgrad
- 1.4. Richtfaktor (Direktivität)
- 1.5. Gewinn
- 1.6. Isotrop- / Kugelstrahler
- 1.7. Dipol-Antennen
- 1.8. Yagi-Antenne

### 2. Auftrag

- 2.1. Aufgabenstellung
- 2.2. Warum diese Aufgabenstellung?
- 2.3. Wie kann man das Problem lösen?
- 2.4. Simulation
  - 2.4.1. Was ist Feko?
- 2.5. Messung

### 3. Entwurf und Simulation

- 3.1. Aufbau der Grundstruktur in Feko
- 3.2. Entwurf einer Antenne, die nur in eine bestimmte Raumrichtung sendet
- 3.3. Entwicklung eines Modells
- 3.4. Verdreifachung der Yagi-Antenne
- 3.5. Erweiterung mit einem zusätzlichen Reflektor
- 3.6. Optimierung mit Optfeko
- 3.7. Erweiterung der Antenne um einen zusätzlichen Direktor
- 3.8. Ausbau der Antenne auf zwei Reflektoren und drei Direktoren

### 4. Praktische Messung

- 4.1. Die Messanlage
- 4.2. Der Messungsablauf
- 4.3. Messung der Antenne mit je einem Element
- 4.4. Messung der Antenne mit zwei Direktoren und zwei Reflektoren
- 4.5. Messung der Antenne mit drei Direktoren und zwei Reflektoren

### 5. Diskussion der Störeinflüsse bei der Messung

- 5.1. Störeinflüsse
  - 5.1.1. Reflexionen
  - 5.1.2. Interferenz mit anderen Signalen
  - 5.1.3. Verluste in Leitermaterial und Messgeräten
  - 5.1.4. Nichtideale Geometrie
- 5.2. Grösse der Abweichung

### 6. Auswertung der Resultate

- 6.1. Vergleich von Simulation und Messresultaten
- 6.2. Entwicklung der Antenne
- 6.3. Resultat

# 1. Antennentechnik

## 1.1. Was ist eine Antenne?

Eine Antenne dient zum Senden und Empfangen von elektromagnetischen Wellen. In der Regel liegt die Baugrösse in einem bestimmten Verhältniss der Wellenlänge. Für passive Antennen gilt das **Reziprozitätsprinzip**: Ein Antennentyp, der zum Senden eines Signals einer gewissen Frequenz ausgelegt ist, kann auch zum Empfangen dieses Signals genutzt werden, da seine Richtcharakteristik identisch ist.

## 1.2. Funktionsweise der Antenne

Das Ersatzschaltbild einer Antenne besteht aus einem Schwingkreis (reaktiver Anteil, bestehend aus Spule und Kondensator) und einem Antennenwiderstand (resistiver Anteil), der sich aus Wärmeverlusten und Abstrahlverlusten addiert. Um beim Übergang Leitung-Antenne Reflexionen zu vermeiden, sollten die Impedanzen von Leitung (ZL) und Antenne (ZA) angepasst werden. Wird der Kreis in elektrische Schwingungen versetzt, bilden sich geschlossene elektrische (E) Feldlinien, die das System mit Lichtgeschwindigkeit verlassen. Im Resonanzfall ist ZA reell und somit wird die grösste Leistung ausgesendet.

Man unterscheidet zwei Bereiche in der Nähe einer elektromagnetischen Quelle: Das Nahfeld und das Fernfeld. Im Nahfeld sind H-Feld und das E-Feld um  $\pi/2$  phasenverschoben. Der Poyntingvektor wird imaginär, das heisst es wird grösstenteils nur Blindleistung erzeugt, es gibt also keine Abstrahlung. Deshalb ist für die Antenne vor allem das Fernfeld wichtig.

Man spricht von Fernfeld ab einem Abstand von der Antenne von

$$r_{\text{fern}} \approx 2 \cdot L^2 / \lambda$$

wobei L die grösste Abmessung der Antenne ist.

## 1.3. Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad einer Antenne gibt an, wieviel der zugeführten Leistung der Antenne auch abgestrahlt wird. Die Differenz entsteht unter Anderem aufgrund thermischer Verluste.

## 1.4. Richtfaktor (Direktivität)

Der Richtfaktor bezeichnet das Verhältnis von maximaler Strahlungsdichte einer gegebenen Antenne im Fernfeld zur Strahlungsdichte des isotropen Kugelstrahlers bei gleicher Sendeleistung und im gleichen Abstand in einer bestimmten Richtung.

## 1.5. Gewinn

Der Gewinn der Antenne ist der Richtfaktor multipliziert mit dem Antennenwirkungsgrad.

## 1.6. Isotrop- / Kugelstrahler

Eine besondere Antenne ist der Isotropstrahler. Es handelt sich hierbei um ein theoretisches Modell eines Kugelstrahlers, der gleichmässig in alle Richtungen sendet bzw. empfängt. In der Praxis ist er nicht realisierbar, da alle Antennen eine gewisse Richtwirkung haben. Er dient jedoch als Bezugsgrösse zum Vergleich mit realen Antennen. Der dBi-Wert gibt den Gewinn einer Antenne bezogen auf den Isotropstrahler an.

## 1.7. Dipol-Antennen

Die Dipolantenne besteht aus einem geraden Metallstab. Sie wandelt hochfrequenten Wechselstrom in elektromagnetische Wellen um.

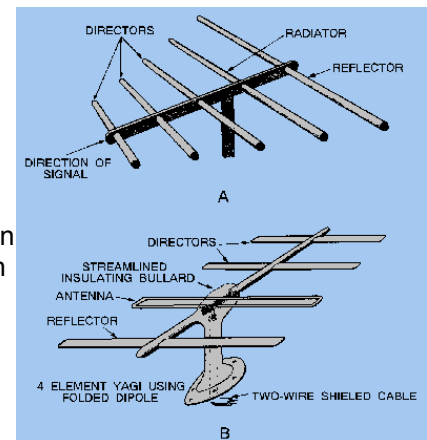
Bei  $\lambda/2$ -Dipolen, also Antennen, bei denen die Stablänge die Hälfte der Wellenlänge betraegt, befindet sich

in der Mitte ein Strommaximum und an den beiden äusseren Enden ein Spannungsmaximum. Das Spannungsmaximum entsteht durch die elektrische Ladung an den Stabenden. Diese wirkt als Kapazität. Der Stromfluss entlang der Stabachse wirkt induktiv. Der Gewinn betraegt 2.2 dBi und die Direktivität ist donutförmig, mit Pol in der Stabachse.

Bei  $\lambda/4$ -Dipolen (Monopol) wird nur ein Zweig des Halbwellendipols als Antennenstab verwendet. Die Funktion der anderen Hälfte als Gegenpol wird durch eine elektrisch leitfähige Oberfläche uebernommen, an dem sich der Viertelwellenstab elektrisch „spiegelt“. Der Viertelwellendipol strahlt nur in der oberen Hälfte wie ein Halbwellendipol im freien Raum.

### 1.8. Yagi-Antenne<sup>1</sup>

Die Yagi-Antenne wird zum Senden und Empfangen gebraucht. Sie besteht aus einem gespeisten Dipol, einer Reihe von Direktoren und meist einem Reflektor. Hierbei erregt der aktive Dipol die Passiven Elemente (Direktoren/ Reflektor). Die passiven Elemente wirken dann ebenfalls als Strahler, allerdings phasenverschoben. Wählt man passende Längen und Abstände für die passiven Elemente, so kann man durch Überlagerung aller Strahlungen konstruktive Interferenz erzeugen und eine hohe Direktivität erzielen.



## 2. Auftrag

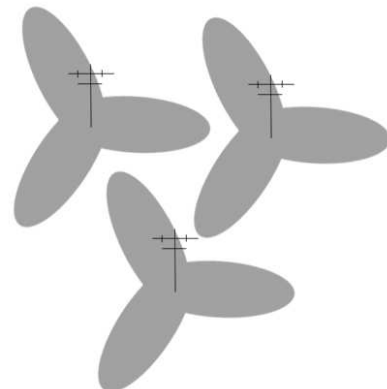
### 2.1. Aufgabenstellung

Unser Auftrag besteht darin, eine Antenne zu entwerfen, die in drei  $120^\circ$  auseinanderliegende Raumrichtungen maximale Leistung strahlt und in die Bereiche zwischen den Keulen möglichst keine Strahlung abgibt. Anders ausgedrückt: Unser Ziel ist es, den grössten Abstand zwischen Maxima und Minima der Strahlungsdirektivität zu erreichen.

### 2.2. Warum diese Aufgabenstellung?

Diese Aufgabe, so wie sie gestellt ist, könnte ein typischer Auftrag aus dem Ingenieursberuf sein. In diesem Projekt können wir das einzelne Vorgehen, von Ideensammlung über Simulation bis hin zur Messung, in der geprüft wird, ob die gebaute Antenne auch das tut was man wollte, einmal durchspielen.

Die Aufgabenstellung ist auch nicht aus der Luft gegriffen, im Gegenteil, sie hat einen starken Realitätsbezug: Mit diesem Strahlungsmuster, wie wir es erzielen wollen, kann man eine Fläche effizient bestrahlen, ohne dass dabei Interferenz entsteht. Die drei Strahlungsfelder werden gemäss dem nebenstehenden Bild ineinander gelegt. Durch ihre Form entsteht keine Überschneidungen.



<sup>1</sup> Das Bild der Yagi-Antenne stammt von <http://www.tpub.com/neets/book10/NTX4-32.GIF>

### 2.3. Wie kann man das Problem lösen?

Unsere Aufgabe ist es, ein Modell zu finden, das den oben genannten Kriterien gerecht wird. Um möglichst effizient arbeiten zu können, teilen wir den Prozess in zwei Phasen: Simulation und Messung.

### 2.4. Simulation

Die Modellierung führen wir an einer Computersimulation durch. Die Software die wir verwenden, heisst FEKO. Der Vorteil einer Simulation ist in unserem Fall, dass wir in gleicher Zeit wesentlich mehr Optimierungsprozesse durchführen können, als wenn wir jedes Mal in der Praxis die Versuchsanordnung ändern würden. Hinzu kommt, dass wir hier Modifikationen vornehmen können, die wir in der Praxis nicht durchführen können, beispielsweise die Stablänge auf einen bestimmten Wert zu verändern.

#### 2.4.1. Was ist Feko?

FEKO ist eine Software, mit der sich elektromagnetische Felder berechnen und in 2D oder 3D darstellen lassen. Wir verwenden diese Software, da ein Anwendungsbereich dieser Software das Antennendesign ist.

In FEKO wird die Oberfläche des zu berechnenden Objektes in beliebig kleine Dreiecke zerlegt (gemesht). Anschliessend werden für jedes Dreieck einzeln die Maxwellgleichungen gelöst. Je kleiner man diese Dreiecke wählt, desto genauer sind die Ergebnisse. Allerdings ist dies auch mit längerer Rechenzeit verbunden.

Im Unterprogramm POSTFEKO können die gewünschten Resultate (Gewinn, Direktivität, 3D Bilder, etc.) dann grafisch dargestellt werden. Anhand dieser Daten können wir dann Schlüsse ziehen über weitere Optimierung der Antenne.

Zusätzlich bietet die Software das Tool OPTFEKO an, ein Optimierungsprogramm, in dem man einzelne Parameter maximieren/ minimieren lassen kann.

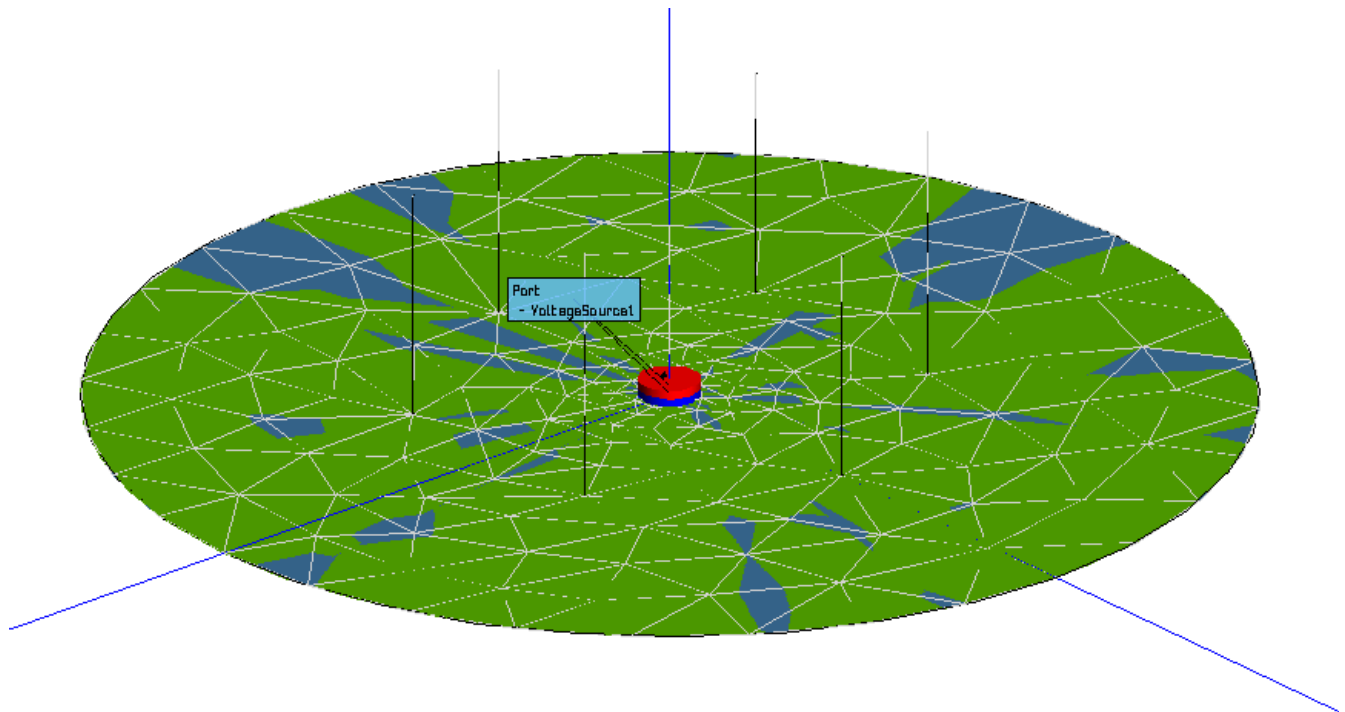
### 2.5. Messung

Die Simulation beruht auf Modellen der Natur. Störfaktoren können hier nicht oder nur schlecht mit einbezogen werden. Diese können nur erkannt werden, wenn man die Strahlung der Antenne auch in der Praxis misst. Erst an der Messung können wir erkennen, wie gut wir unseren Auftrag erfüllt haben.

## 3. Entwurf und Simulation

### 3.3. Aufbau der Grundstruktur in Feko

Als Erstes wurde in Feko die Grundstruktur der Antenne aufgebaut. Die Grundplatte hat einen Aussenradius von 18.7cm und eine kleine Aussparung von etwa 0.5cm Radius, worin der Sender isoliert von der Platte platziert wird. Der Sender hat eine Höhe von 8.4cm, was genau  $\lambda/4$  entspricht. Um den Sender herum werden später die drei Direktoren- und Reflektorenpaare in Winkelabständen von jeweils  $120^\circ$  angeordnet. Dabei muss beachtet werden, dass diese später nur an diskreten Stellen in die Platte geschraubt werden können. Möglich sind Radien auf fünf verschiedenen Ringen. Der innerste Radius liegt bei 6.9cm, die weiteren folgen in Schritten von jeweils 7mm.

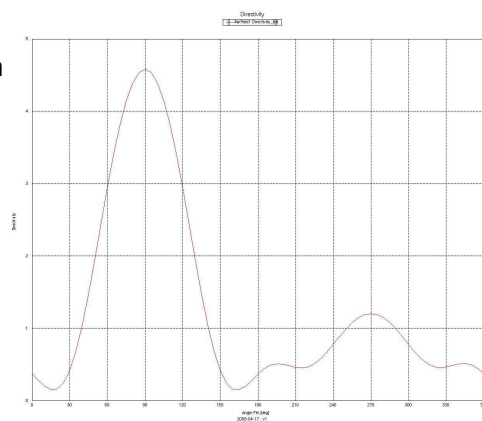


Nachdem die Anordnung mit den graphischen Tools von Feko erzeugt wurde, wird die Spannungsquelle mit der Versuchsfrequenz von 892.85MHz angeschlossen. Anschliessend wird das Antennenmodell gemasht und simuliert.

### 3.2. Entwurf einer Antenne, die nur in eine bestimmte Raumrichtung sendet

Unser erster Ansatz bei der Bearbeitung dieses Auftrags war es, eine Antenne zu entwerfen, die in eine bestimmte Raumrichtung sendet. Als Vorbild dazu diente die klassische Yagi-Antenne. Sie besteht im Normalfall aus einem Reflektor und mehreren Direktoren. Der Reflektor ist etwa 5% Länger als der Monopolsender, um eine höhere kapazitive Wirkung zu erzeugen. Damit wird ein phasenverschobenes Feld erzeugt, welches eine Auslöschung des Fernfeldes hinter der Antenne bewirkt. Der Direktor ist etwa 10% Kürzer als der Sender und ist daher weniger kapazitiv. Er verursacht ein positiv interferierendes Feld vor der Antenne und bewirkt so die Abstrahlung der Leistung in eine bestimmte Raumrichtung. Um diese gewünschte Wirkung zu erzielen, müssen sowohl Reflektor als auch Direktor etwa  $\lambda/4$  vom Sender entfernt platziert werden.

Unser erster Antennenentwurf besteht lediglich aus einem einzelnen Reflektor und einem Direktor, die jeweils  $\lambda/4$  vom Sender entfernt platziert wurden. Der Sender besitzt eine Länge von 8.4 cm, daher wählten wir für den Reflektor ebenfalls eine Länge von 8.4 cm und für den Direktor 7.6 cm. Sie werden beide auf dem dritten Ring platziert. Dies entspricht etwa der obigen Beschreibung der Yagi-Antenne.



Zur Auswertung der Simulation verwenden wir hier und im Folgenden die Direktivitätskurven, die mit dem Programm Postfeko erstellt werden können. Diese Darstellung zeigt in der Vertikalen die Direktivität der Antenne in der xy-Ebene (Theta = 90°) gegenüber dem Winkel in der Horizontalen (Phi = 0° .. 360°). Es zeigt sich eine klare Keule in die Richtung des Direktors (Phi = 90°). Gegen den Reflektor (Phi = 270°) wird nur

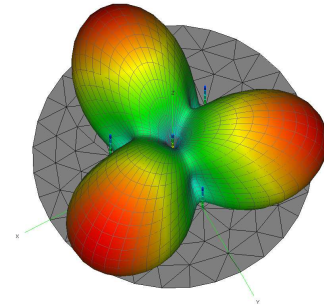
sehr wenig gestrahlt und im Raum zwischen den beiden Stäben praktisch gar nichts.

### 3.3. Entwicklung eines Modells

Der nächste Schritt besteht in der Übertragung der Yagi-Antenne in ein Modell, welches in drei Richtungen sendet, statt nur in eine Einzige. Die naheliegendste Idee war es, die Yagi-Antenne einfach um 120° und um 240° zu drehen und so dreifach auf der Grundplatte aufzubauen. Es zeigte sich allerdings schnell, dass dies nicht so einfach funktioniert. Die Simulation zeigte uns eine Antenne, die bei Weitem nicht unseren Erwartungen entsprach, denn diese Antenne strahlt in die falsche Richtung, wie sich anhand der Resultate zeigen lässt.

### 3.4. Verdreifachung der Yagi-Antenne

In unserem ersten Versuch haben wir die Reflektoren und Direktoren in einem Kreis mit Radius  $\lambda/4$  um den Sender angeordnet. Die Höhe des Reflektors beträgt 5% mehr, die des Direktors 10% weniger als  $\lambda/4$ . Nach erfolgreicher Simulation ergab sich nebenstehendes 3D-Modell des elektrischen Feldes. Wie gewünscht wird es bereits in drei klare Keulen aufgeteilt. Die Direktivität zeigt ebenfalls bereits drei ausgeprägte Keulen in jeweils 120° Abstand.



Bei genauerer Betrachtung stellte sich allerdings heraus, dass diese Antenne eigentlich gar nicht in die von uns gewünschten Richtungen sendet, sondern genau entgegengesetzt! Es scheint also nicht möglich zu sein, diese einfache Yagi-Antenne zu verdreifachen und zu drehen und dann in drei Richtungen zu senden. Die Felder überlagern sich offenbar anders, wenn man auf allen Seiten der Antenne Stäbe anbringt, als wenn man diese nur hinter und vor dem Sender platziert. Ausserdem fällt uns auf, dass die Amplituden nicht alle genau gleich hoch liegen. Dies ist etwas merkwürdig, da unser Antennenmodell doch absolut symmetrisch aufgebaut ist.

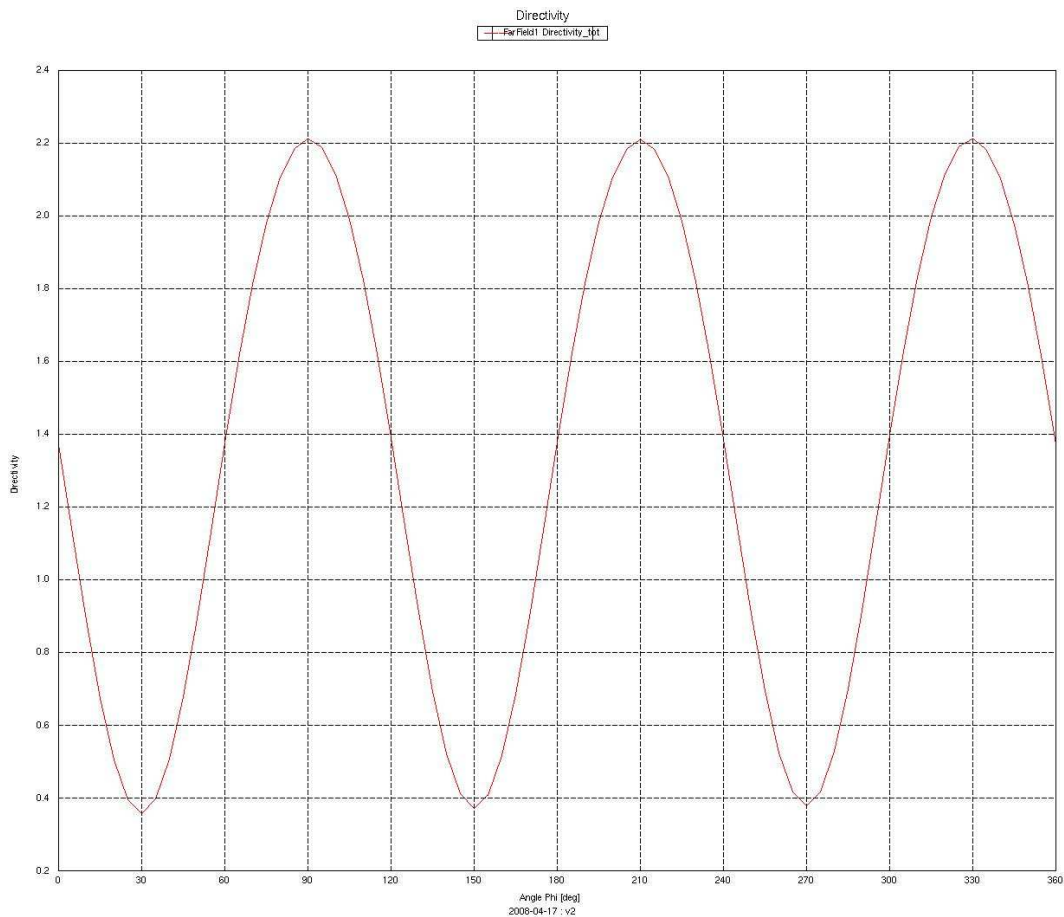
### 3.5. Erweiterung mit einem zusätzlichen Reflektor

Ausgehend von der ersten Versuchsanordnung, wo es uns immerhin gelunge ist, drei Keulen in jeweils  $120^\circ$  Abstand zu erzeugen, haben wir weitere Optimierungen vorgenommen. In einer ersten Phase haben wir eine Antenne mit zwei Direktoren und zwei Reflektoren ausprobiert, kamen hier aber auf niedrigere Direktivitätslinien als zuvor. Offenbar schien dies noch keine bessere Lösung zu sein. Aufgefallen ist uns hier vor Allem, dass viel zu viel Strahlung direkt in den Boden geht, also vertikal gerichtet ist, statt in die horizontale geleitet zu werden.

Etwas bessere Ergebnisse konnten wir erzielen, in dem wir mit zwei Reflektoren der Länge 7.6cm bzw. 11.1cm ( $\lambda/3$ ) und einem Direktor der Länge 8.4cm ( $\lambda/4$ ) arbeiteten, wieder jeweils in  $120^\circ$  Abstand.

Ausserdem konnten wir feststellen, dass durch genaueres Meshen die 3 Maximas gleichmässiger Amplituden hatten, also die unregelmässigen Amplituden also nicht von der Versuchsanordnung selbst erzeugt wurden. Dies leuchtet ein, da ja die simulierte Anordnung absolut symmetrisch ist. Lediglich das Mesh beinhaltet unregelmässige Dreiecke.

Die Simulation der erweiterten Anordnung liefert folgende Direktivitätskurve:



Die Direktivität besitzt drei um  $120^\circ$  verschobene Maxima von 2.2 und zugehörige Minima bei etwa 0.4. Diese Daten werden zum Vergleich mit späteren Messungen in dB umgerechnet:

$$\begin{aligned}\Delta G &= 20 \times \log_{10}(\text{Maximum der Direktivität} / \text{Referenz}) - 20 \times \log_{10}(\text{Minimum der Direktivität} / \text{Referenz}) \\ &= 20 \times \log_{10}(\text{Maximum der Direktivität} / \text{Minimum der Direktivität})\end{aligned}$$

In unserem Fall ist  $\Delta G = 20 \times \log_{10}(2.2 / 0.4) = 14.8 \text{ dB}$ . Wir erwarten also für die Messung ebenfalls eine Differenz in dieser Größenordnung.

Dies ist bereits ein sehr gutes Ergebnis. Trotzdem soll es noch weiter Verbessert werden. Ziel ist es, die Maxima und Minima noch weiter auseinander zu bringen. Da wir mit zwei Direktoren keinen Erfolg hatten, haben wir versucht die oben beschriebene erweiterte Antenne mit dem Optimierungsprogramm von Feko zu verbessern.

### 3.6. Optimierung mit Optfeko

Der Aufbau unseres Feko-Modells bot folgende Parameter für eine Optimierung an:

- Höhe des Direktors (direcotr1\_height)
- Höhe des 1. Reflektors (reflector1\_height)
- Höhe des 2. Reflektors (reflector2\_height)
- Platzierung des Direktors (dir1 gibt an, auf welchem Ring der Direktor steht)
- Platzierung des 1. Reflektors
- Platzierung des 2. Reflektors (ref1 bzw. ref2 geben an, auf welchen Ringen sich die Reflektoren befinden)

Wir führten zwei Simulationen durch. In der Ersten gaben wir als Ziel an, das Maximum der Direktivität möglichst hoch zu machen. Die Simulation brachte folgende Ergebnisse und die nebenstehende Direktivitätskurve:

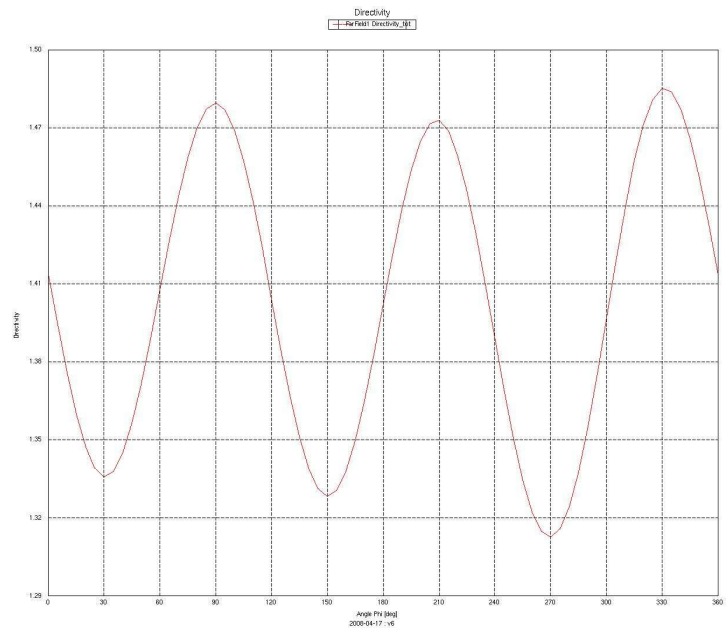
SIMPLEX NELDER-MEAD finished  
Base small enough: 3.353881454e-03

Optimum found for these variables:

```
reflector1_height = 8.350113549e-02
reflector2_height = 1.146385474e-01
director1_height = 9.069784387e-02
dir1              = 5.327823348e-01
ref1              = 1.569668280e-01
ref2              = 4.094564325e+00
Optimum aim function valü: -2.176189136e+00
```

Sensitivity of optimum valü with respect to each optimisation parameter:

Parameter	Sensitivity
reflector1_height	9.144870846e+02
reflector2_height	4.662194025e+03
director1_height	1.748373630e+04
dir1	5.677667538e+01
ref1	1.200571233e+01
ref2	5.272119334e+01



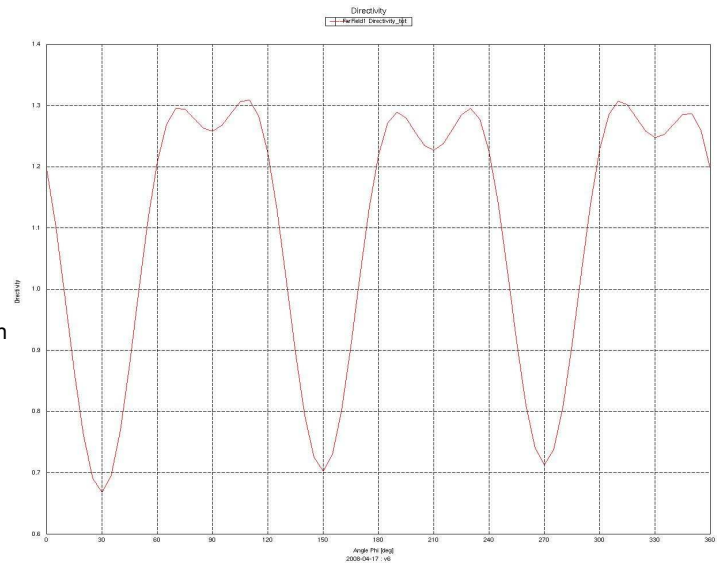
In der 2. Simulation sollten zusätzlich zur Maximierung des Maximums der Direktivität das Minimum minimiert werden. Optfeko lieferte folgendes Ergebnis:

SIMPLEX NELDER-MEAD finished  
Base small enough: 2.836004396e-03

Optimum found for these variables:  
 reflector1\_height = 7.253467659e-02  
 reflector2\_height = 1.105888932e-01  
 director1\_height = 8.147737998e-02  
 dir1 = 1.273139794e-01  
 ref1 = 3.575747610e-01  
 ref2 = 4.155865950e+00  
 Optimum aim function valü: -1.910566981e+00

Sensitivity of optimum valü with respect to each optimisation parameter:

Parameter	Sensitivity
reflector1_height	2.227280016e+04
reflector2_height	6.302789174e+03
director1_height	3.264774917e+04
dir1	3.100655390e+00
ref1	2.661060366e+00
ref2	7.715902174e+01



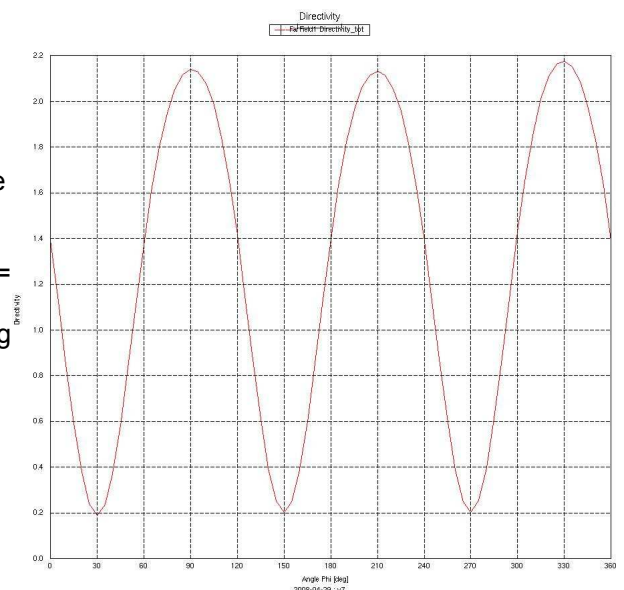
Die Direktivitäten der beiden Modelle haben sehr unregelmässige Form und die Differenz zwischen den Maxima und Minima ist kleiner als im Vorgehenden Modell. Somit hat die Simulation keine brauchbaren Optimierungsergebnisse erbracht und wurde daher verworfen.

### 3.7. Erweiterung der Antenne um einen zusätzlichen Direktor

Da die Optimierung der Antenne mit zwei Reflektoren und nur einem Direktor keine brauchbaren Ergebnisse brachte, beschlossen wir, nochmals zu versuchen, weitere Stäbe in unsere Antenne einzubauen. Es scheint keine bessere Direktivität mit nur drei Stäben pro Richtung erreichbar zu sein. Dies klingt einläuchtend, zumal auch die klassischen Yagi-Antennen, welche nur in eine einzige Raumrichtung senden, aus sehr vielen Direktoren bestehen können.

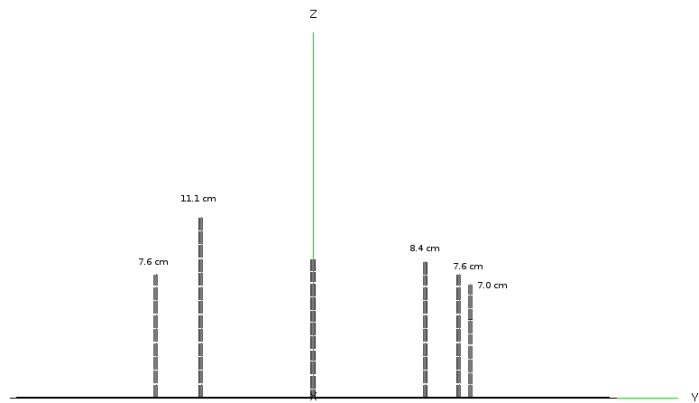
Als erstes wurde ein weiterer Direktor angebaut. Er befindet sich auf Radius drei, also drei Schritte weiter vom Zentrum entfernt als der bisherige Direktor, und hat eine Länge von 7.6 cm. Diese Geometrie stellte sich unter mehreren Simulationen mit unterschiedlichen Längen und Positionen als Optimum heraus. Eine intuitive Erklärung, warum gerade diese Einstellung die Beste ist, haben wir nicht finden können.

Die Simulation ergab tatsächlich eine etwas bessere Direktivität als die Antenne bisher zeigte. Die Maxima liegen zwar leicht tiefer als bei Versuch 2 (dort lagen sie noch leicht über 2.2), dafür sind die Minima weiter nach unten gewandert. Sie liegen neu bei 0.2 statt wie bis anhin bei etwa 0.35. Dies ergibt eine Differenz von  $\Delta G = 20 \times \log_{10}(2.15 / 0.2) = 20.6$  dB, also eine theoretische Steigerung um fast 6 dB, was etwa einer Vervielfachung des Unterschiedes entsprechen würde.

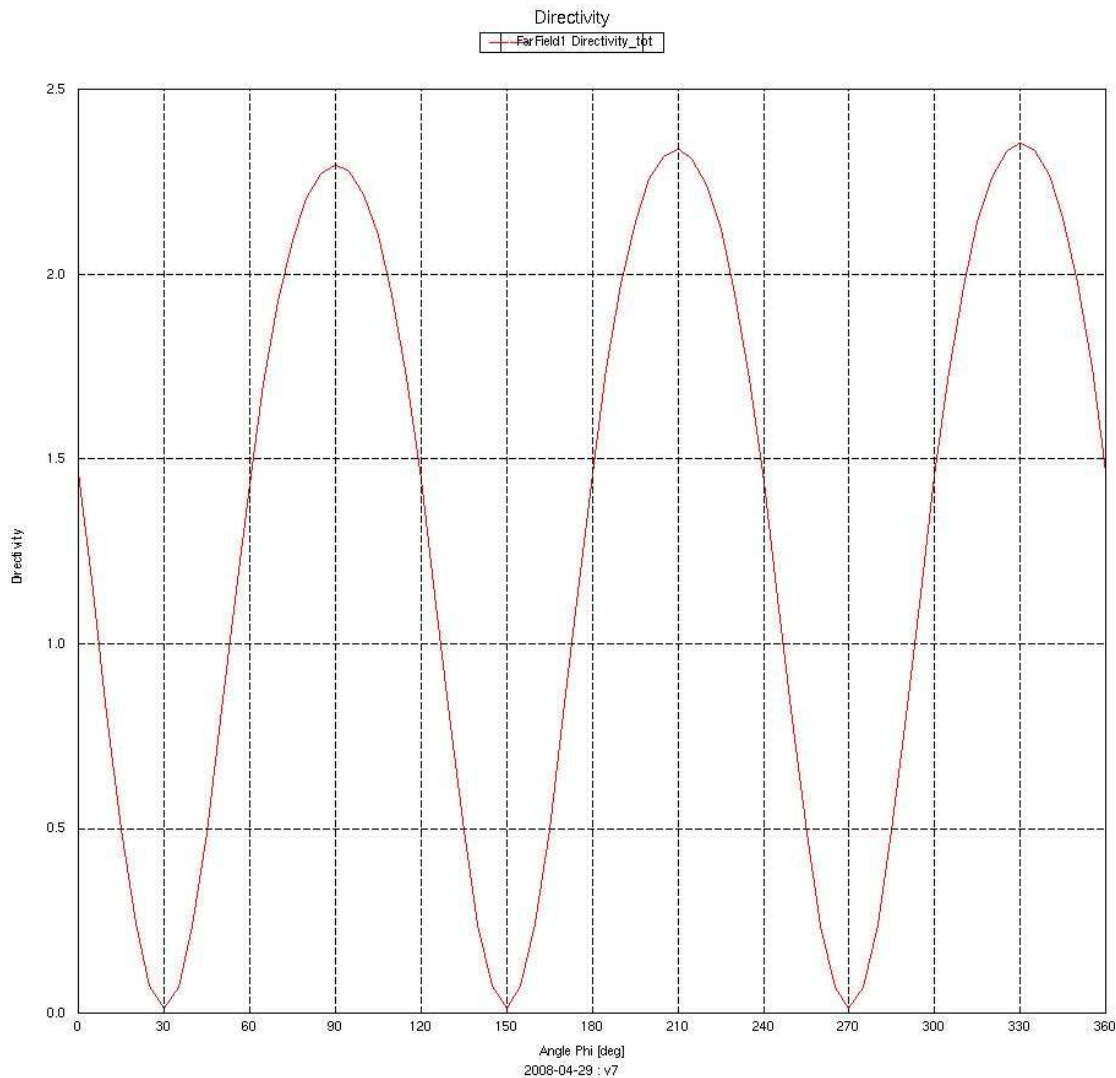


### 3.8. Ausbau der Antenne auf zwei Reflektoren und drei Direktoren

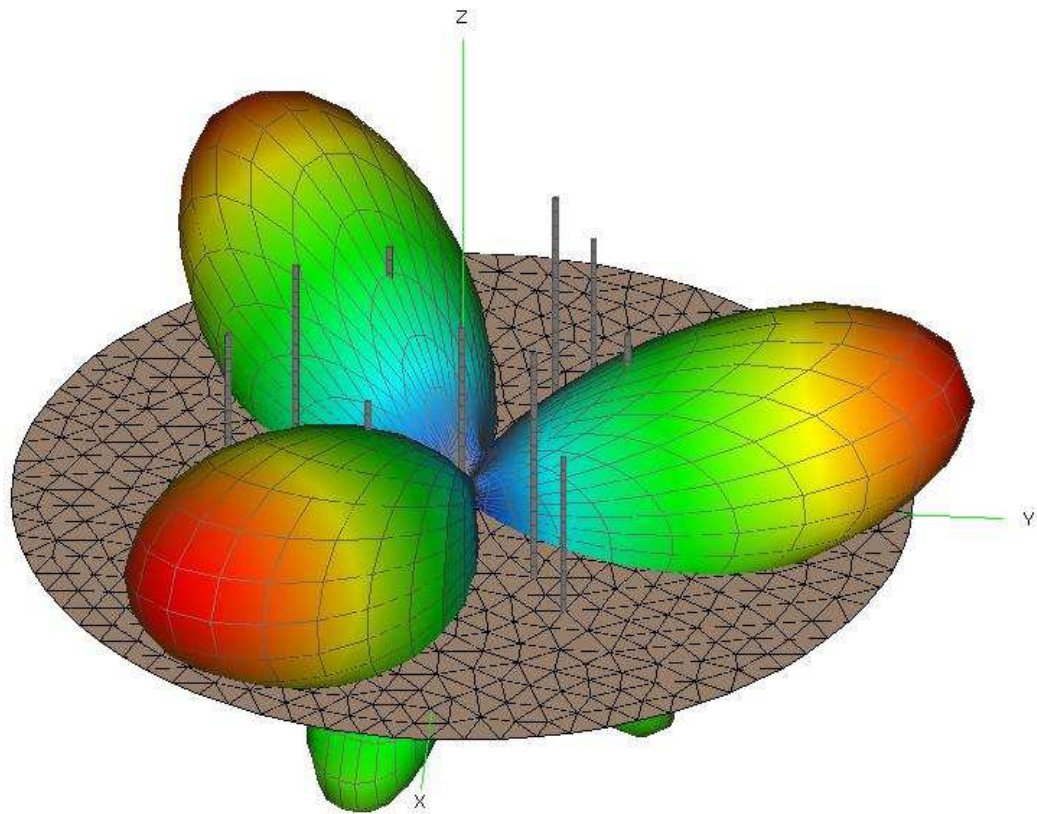
In der begründeten Hoffnung noch bessere Ergebnisse zu erzielen wurde noch ein dritter Direktor im äussersten Radius angefügt. Seine Länge beträgt 7.0 cm, obwohl diese Länge im Standardset der Antenne nicht vorhanden ist. Durch Simulation verschiedener Längen hat sich dieser Wert als Optimum herausgestellt. Längere und auch kürzere Stäbe bewirken eine Verschlechterung der Direktivität. Der Aufbau der Antenne entspricht jetzt der nebenstehenden Graphik. Sie zeigt einen Querschnitt durch die Antenne. Zu sehen ist eine Sende-Komponente. Dieser Teil der Antenne strahlt nach rechts.



Dieser Aufbau führte zu untenstehendem Simulationsergebnis. Die Maxima haben sich etwas weiter nach oben verschoben und die Minima sind praktisch auf Null gesunken. Deren Differenz hat sich weiter vergrößert auf  $\Delta G = 20 \times \log_{10}(2.32 / 0.02) = 40 \text{ dB}$ . Diese enorme Steigerung um weitere 19.4 dB. Dies ist kaum vorstellbar. Ein grosser Fehler kommt selbstverständlich aus der ungenauen Auswertung des Diagrammes (Wert beim Minimum) und möglicherweise ist auch etwas ungenau gerechnet worden. Für einen realistischen Wert muss unbedingt eine Messung durchgeführt werden.



Sehr eindrücklich ist auch die 3D-Darstellung des Fernfeldes in Postfeko.

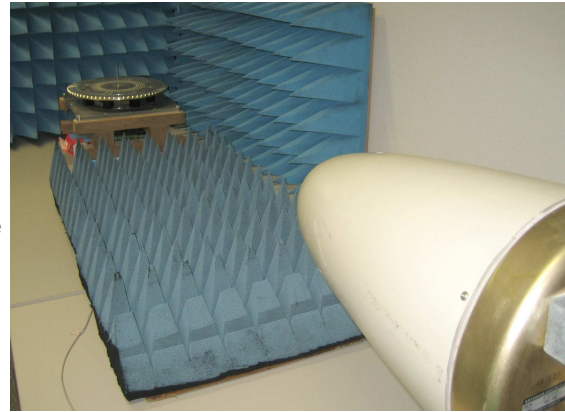


Die enorm engen Enden der Keulen beim Sender im Mittelpunkt der Grundplatte korrespondieren mit den niedrigen Minima in der Direktivität. Ausserdem ist hier der Aufbau der Antenne nochmals gut zu erkennen. Die drei Direktoren sieht man in der gegen rechts zeigenden Keule stehen. Gegenüber stehen die zwei etwas längeren Reflektoren.

## 4. Praktische Messung

### 4.1. Die Messanlage

Die Messanlage besteht aus einer Sendeantenne und unserer Antenne als Empfänger. Die zu vermessende Antenne wird möglichst auf gleicher Höhe wie der Sender platziert und auf diesen ausgerichtet. Dieser Aufbau empfiehlt sich, da die verwendete Sendeantenne sehr genau in eine Richtung sendet und wir deshalb viel weniger Reflektionen haben. Würde unsere Antenne zum Senden verwendet, würden die Reflektionen stark ansteigen, da unsere Antenne in drei Raumrichtungen, also auch gegen die Wände um die Antenne herum, sendet. Um die Empfangsantenne herum werden Matten aus Kohlestoffhaltigen Absorbieren angeordnet, um die Reflektionen weiter zu minimieren. Unsere Messanlage befindet sich in einem „normalen“ Büro im ETZ-Gebäude. Leider ist es nicht möglich eine perfekte Abschirmung mit einem Faraday-Käfig einzusetzen.



### 4.2. Der Messungsablauf

Bei der Messung wird mit dem Sender eine bestimmte Leistung abgestrahlt (deren Grösse ist im Weiteren nicht von Bedeutung). Es kann die Amplitude und Frequenz der Strahlung eingestellt werden. Die zu vermessende Antenne empfängt einen gewissen Teil der Leistung. Das Messgerät ist mit dem Empfänger verbunden und misst den Wert der empfangenen Leistung in dBm. Diese Werte werden von uns für alle Winkelschritte aufgenommen.

### 4.3. Messung der Antenne mit je einem Element

In unserer ersten Messung bauten wir die dreifache Yagi-Antenne mit zwei Reflektoren und einem Direktor auf. Als Erstes haben wir die beste Sendefrequenz bestimmt, in dem wir die Frequenz variierten, bis wir eine maximale Empfangsleistung erreichten. Wir fanden heraus, dass die wenigsten Verluste nicht bei 892.85 Mhz sondern bei 873.55 Mhz auftreten.

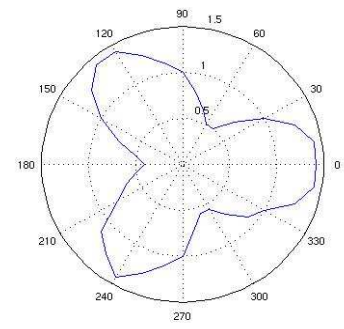
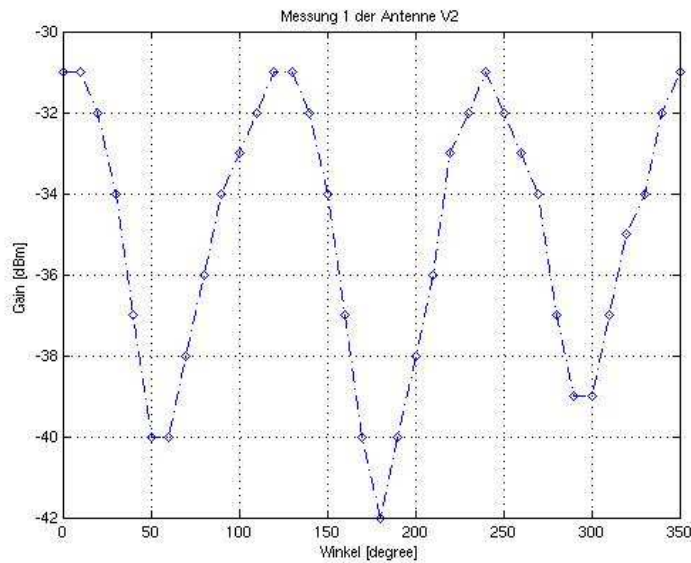
Wir lesen die Verlustleistung/ Gewinn in dBm an der Anzeige ab. Anschliessend drehen wir die Scheibe um  $10^\circ$ , lesen wieder ab, drehen wieder, bis wir einmal durch sind ( $360^\circ$ ). Um die Ergebnisse etwas besser behandeln zu können, wurden mit untenstehendem MATLAB-Skript eine graphische Darstellung erzeugt.

```
angle = [0:10:360];
values = [-31, -31, -32, -34, -37, -40, -40, -38, -36, -34, -33,
-32, -31, -31, -32, -34, -37, -40, -42, -40, -38, -36, -33, -32,
-31, -32, -33, -34, -37, -39, -39, -37, -35, -34, -32, -31, -31];

plot(angle, values, 'd-');
title('Messung 1 der Antenne V2');
xlabel('Angle [degree]');
ylabel('Gain [dBm]');
grid;
figure;
phi = (0:20/360:2) * pi; r = zeros(1,length(values));

for i=1:length(values)
    % Messwert - kleinster Messwert = 20 * log(x/0.4)
    r(i) = 10^(1/20*(values(i)-min(values)))*0.4;
end

polar(phi,r);
```



Der Unterschied zwischen Maximaler und minimaler Amplitude beträgt  $42 \text{ dBm} - 31 \text{ dBm} = 11 \text{ dB}$ . Wir haben also etwa  $4 \text{ dB}$  Unterschied zum erwarteten Wert der Simulation. Dies entspricht der Grössenordnung der Verluste die in den späteren Abschnitten noch diskutiert wird.

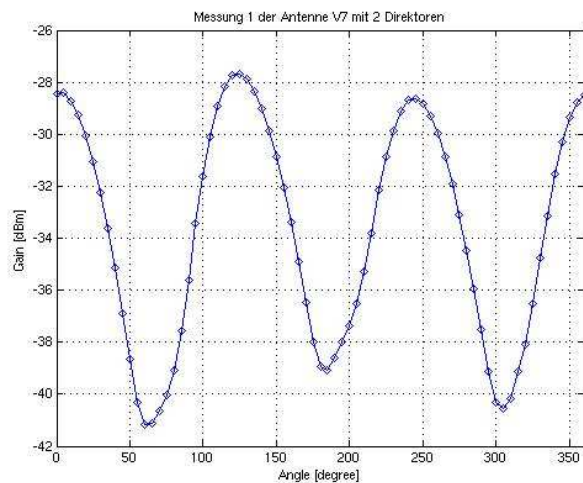
#### 4.4. Messung der Antenne mit zwei Direktoren und zwei Reflektoren

Diesmal haben wir die Antenne in Schritten von  $5^\circ$  ausgemessen. Die Ergebnisse sollen an dieser Stelle nicht tabellarisch aufgelistet werden, denn sie können bei Bedarf auch dem MATLAB-Skript entnommen werden.

```
angle = [0:5:360];
```

```
values = -[28.45, 28.42, 28.71, 29.27, 30.05, 31.05, 32.23, 33.61,
35.15, 36.90, 38.67, 40.30, 41.15, 41.13, 40.65, 40.02, 39.10,
37.57, 35.60, 33.42, 31.62, 30.11, 28.92, 28.17, 27.75, 27.68,
27.88, 28.34, 29.00, 29.85, 30.88, 32.05, 33.36, 34.91, 36.47,
38.00, 38.95, 39.06, 38.60, 37.98, 37.37, 36.52, 35.27, 33.80,
32.17, 30.89, 29.88, 29.13, 28.69, 28.63, 28.83, 29.30, 29.96,
30.85, 31.93, 33.10, 34.47, 35.94, 37.51, 39.11, 40.33, 40.55,
40.18, 39.12, 38.09, 36.54, 34.77, 33.15, 31.55, 30.28, 29.35,
28.79, 28.49]; ...
```

Diesen Graphiken entnehmen wir eine Differenz zwischen Minima und Maxima von durchschnittlich etwa  $12 \text{ dB}$ . Dies ist etwas überraschen, da die Simulation eine Steigerung um beinahe  $6 \text{ dB}$  erwarten liess. Ausserdem bedeutet dieser Wert eine Diskrepanz von  $8.6 \text{ dB}$  zwischen Simulation und Messung.



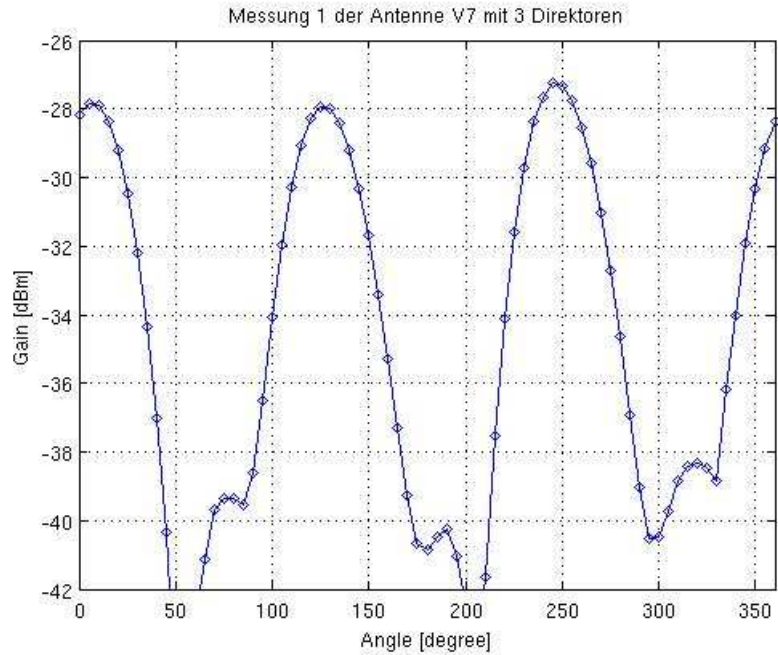
### 4.5. Messung der Antenne mit drei Direktoren und zwei Reflektoren

Auch hier sollen die Messresultate lediglich im MATLAB Skript abgegeben werden. Diese Antenne zeigt eine etwas weniger regelmässige Direktivität.

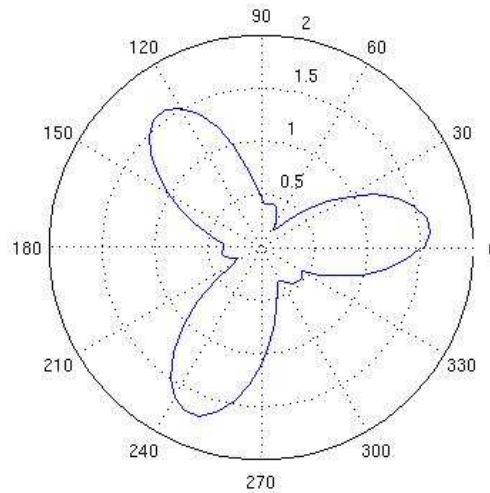
```

Values = -[28.17, 27.85, 27.90, 28.37, 29.22, 30.48, 32.18, 34.33,
37.00, 40.32, 44.37, 45.88, 43.24, 41.14, 39.70, 39.34, 39.38,
39.56, 38.61, 36.51, 34.08, 31.96, 30.30, 29.07, 28.29, 27.92,
27.98, 28.40, 29.21, 30.34, 31.69, 33.40, 35.27, 37.28, 39.28,
40.67, 40.85, 40.50, 40.25, 41.05, 42.36, 44.12, 41.67, 37.55,
34.12, 31.60, 29.73, 28.38, 27.64, 27.26, 27.32, 27.75, 28.56,
29.58, 31.05, 32.70, 34.61, 36.92, 39.03, 40.53, 40.49, 39.73,
38.86, 38.41, 38.35, 38.45, 38.83, 36.16, 34.03, 31.94, 30.31,
29.15, 28.35]; ...
    
```

Die Unregelmässigkeiten in der Direktivität sind nur sehr schwierig erklärbar. Möglicherweise interferieren die drei Direktorstäbe nicht förderlich für das Feldbild. Trotzdem stellen wir fest, dass wir zwar nicht die von der Simulation suggerierten 40 dB Unterschied zwischen Minimum und Maximum erreicht haben, aber immerhin beträgt der Unterschied 18.62 dB. Dies ist das bisher beste Messresultat.



In der Polardarstellung erkennt man dieselben Unregelmässigkeiten sowie eine Abweichung im Winkel um etwa 5°-10°.



## 5. Diskussion der Störeinflüsse bei den Messungen

### 5.1. Störeinflüsse

Wie im Abschnitt 4.1. beschrieben wurde, ist der Aufbau unserer Messanlage nicht vollständig störungsfrei. Wir haben keinen Faraday-Käfig um die Antennen angelegt und auch die Oberflächen von Wand und Tisch sind nicht vollständig mit Absorbern bedeckt. Daher ergeben sich einige äussere Einflüsse, die unsere Messresultate verfälschen.

#### 5.1.1. Reflexionen

Der wohl wichtigste Störeinfluss in unserem Messaufbau ist wohl die Mehrwegstrahlung. Die von der Sendeantenne abgegebene elektromagnetische Strahlung wird sowohl am Tisch, an den Wänden und an der gesamten restlichen Umgebung reflektiert. Diese Reflexionen werden ebenfalls von der Empfangsantenne aufgenommen. Da die reflektierte Strahlung mit unbekannter Phasenverzögerung beim Empfänger eintrifft, interferiert sie mit der Hauptstrahlung auf unbekannt Weise stört so unsere Messresultate.

#### 5.1.2. Interferenz mit anderen Signalen

Ein weiterer Störfaktor liegt in der bereits in unserem Frequenzbereich vorhandenen Strahlung. Wir senden auf einer Frequenz von etwa 900 Mhz, was ziemlich genau dem primären GSM-Band entspricht. Dies bedeutet, dass die Handyantennen in der Umgebung des ETZ-Gebäudes ebenfalls einen Einfluss auf unsere Messung haben. Die Grösse dieser Störung ist ebenfalls nur sehr schwer einzuschätzen, da sie je nach dem wieviele Mobiltelefone sich in der Nähe befinden und in welchem Betriebszustand sich diese befinden, stark variieren kann.

#### 5.1.3. Verluste in Leitermaterial und Messgeräten

Eine vergleichsweise kleine Ungenauigkeit in der Messung rührt auch von den verwendeten Leiter- und Isolationsmaterialien. Wir haben in Feko immer mit perfektem Material gerechnet und diese Ergebnisse mit den Messwerten verglichen. In der Realität werden allerdings Kupferleiter als Antenne und eine Grundplatte aus Eisen mit zwar grossen aber dennoch endlichen Leitfähigkeiten verwendet. Auch die Isolationsmaterialien sind nicht perfekt. Trotzdem sind in unserem Frequenzbereich die Störungen durch das Material, insbesondere im Vergleich mit den übrigen Störeinflüssen, noch sehr gering.

#### 5.1.4. Nichtideale Geometrie

Viel wichtiger als der Einfluss der Materialeigenschaften ist deren Geometrie. Durch die endliche Dicke der Antennenstäbe entstehen Ströme im Material, welche bei der Simulation mit unendlich dünnen Drähten und lediglich einem Oberflächen-Meshing nicht beachtet wurden. Diese Ströme beeinflussen die abgestrahlte Leistung. Die Grösse dieser Störungen ist allerdings gegenüber den Reflexionen ebenfalls gering.

### 5.2. Grösse der Abweichung

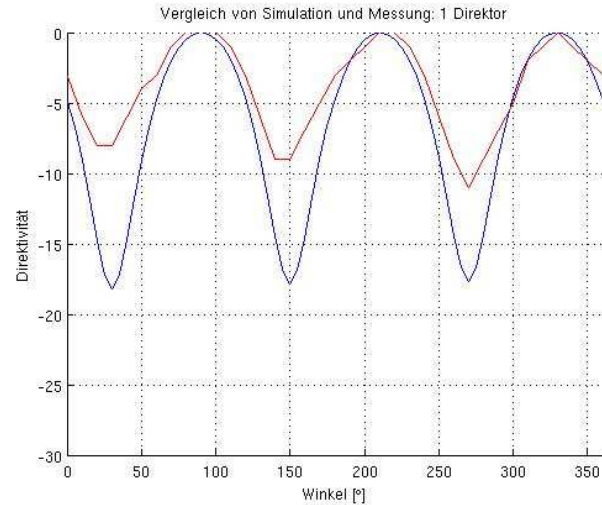
Alle diese Einflüsse gemeinsam bewirken die Abweichung der Messergebnisse von den Simulationsresultaten. Die Grösse der einzelnen Störfaktoren ist nur sehr schwer abzuschätzen. Dennoch kann man sagen, dass unsere Abweichungen von bis zu etwa 12 dB durchaus in der richtigen Grössenordnung liegen. Dieser Unterschied könnte wesentlich verkleinert werden, indem man die Messanlage besser abschirmt, zum Beispiel mit einem Faraday-Käfig und mehr Absorbern.

## 6. Auswertung der Resultate

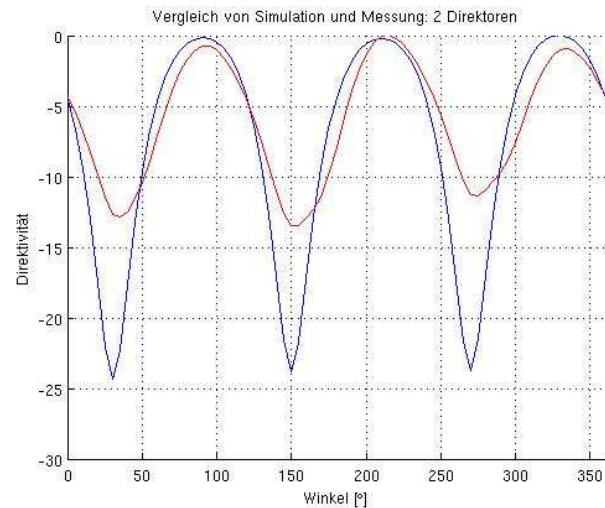
### 6.1. Vergleich von Simulation und Messresultaten

Nun wollen wir unsere Messresultate mit denen der Simulation vergleichen. Dazu werden die bereits verwendeten Kurven auf ihren jeweiligen Maximalwert normiert und entsprechend skaliert. Bei den logarithmischen Kurven der Messung bedeutet dies, dass von jedem Wert der höchste gemessene Wert subtrahiert wird. Bei den linearen Werten aus der Simulation wird jeder Wert durch den Maximalwert dividiert. Die erhaltenen „relativen“ Simulationswerte werden anschliessend noch mit  $10 \cdot \log()$  in dB skaliert.

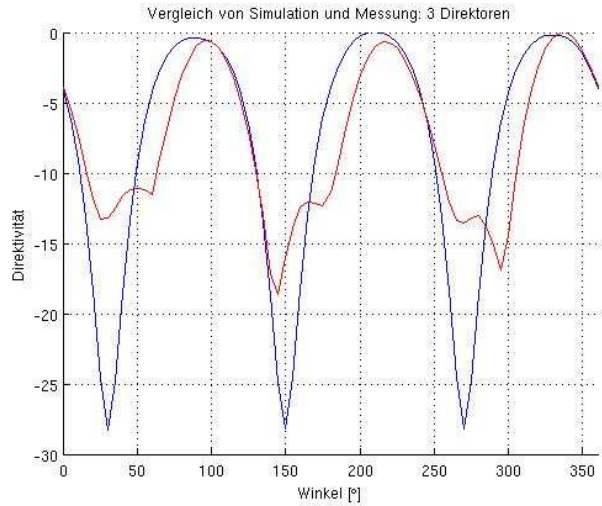
Nebenstehende Graphik zeigt die Werte der Antenne mit nur einem einzigen Direktor. Die Simulation (blau) zeigte deutlich bessere Resultate als die gemessene Richtcharakteristik (rot). Sie stimmen im Winkel zwar relativ gut überein, doch liegen die Extrema etwa 7 dB auseinander.



Bei der Antenne mit zwei Direktoren ist eine noch grössere Diskrepanz von etwa 10 dB zwischen den Extrema zu erkennen. Die Winkel stimmen ebenfalls beinahe überein, die Abweichung beträgt höchstens  $5^\circ$ - $10^\circ$ .

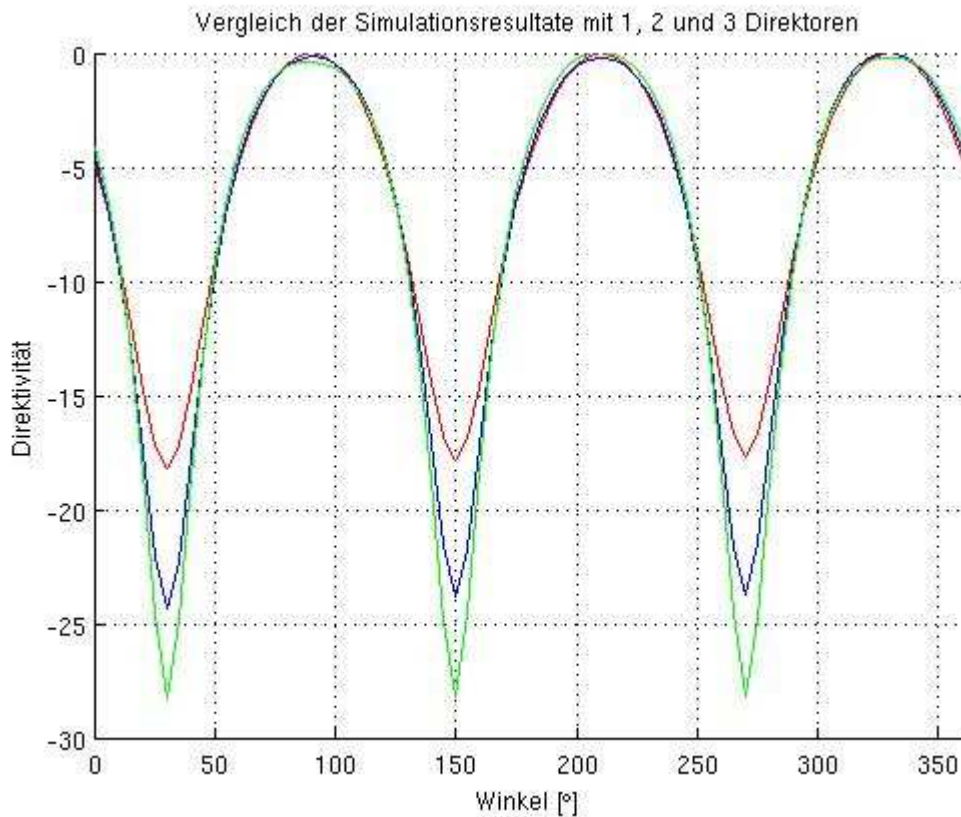


Die Antenne mit drei Direktoren liefert ein noch verzerrteres Bild. Die Winkel sind wiederum recht gut übereinstimmen, aber die Extrema liegen im Schnitt etwa 12 dB auseinander. Ausserdem sind in der Messung plötzlich Unregelmässigkeiten im Kurvenverlauf aufgetaucht.



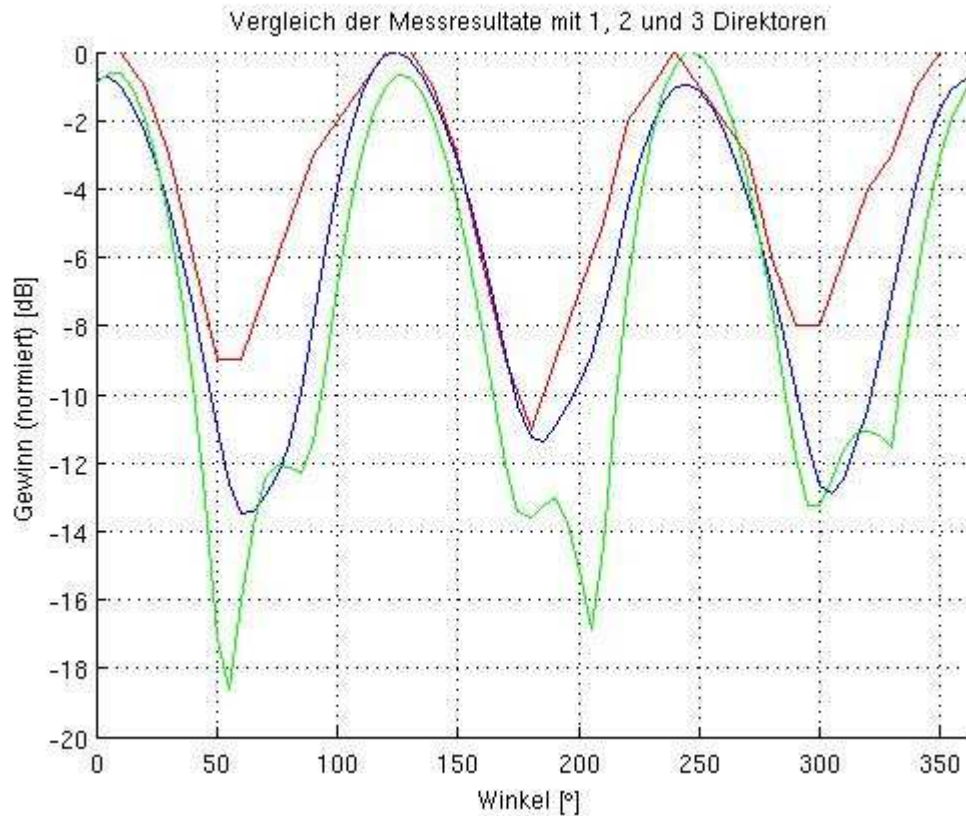
### 6.2. Entwicklung der Antenne

Die Entwicklung unserer Antenne lässt sich sehr gut aufzeigen, wenn man die drei Varianten (einer, zwei oder drei Direktoren) in ein einziges Diagramm zeichnet. Zuerst sollen die Fortschritte in der Simulation betrachtet werden.



Diese Graphik zeigt die normierten Simulationsergebnisse mit einem (rot), zwei (blau) oder drei (grün) Direktoren. Man sieht dass die Verbesserungen insgesamt von der ersten zur endgültigen Version etwa 10 dB betragen.

Nun sollen auch noch die realen Werte aus den Messungen in gleicher Art betrachtet werden.



Diese Graphik zeigt die normierten Messresultate der Antenne. Mit jedem hinzugefügten Element wurden die Minima der Direktivität weiter nach unten gezogen. Man sieht, dass die Resultate tatsächlich enorm gesteigert werden konnten. Anhand dieser Graphik kann man auch feststellen, dass die Antenne mit drei Direktoren trotz den Deformationen klar die Beste ist. Sie soll daher als unser Endresultat gelten.

### 6.3. Resultat

Obige Richtcharakteristik zeigt, dass unsere Antenne in drei klar definierte Raumrichtungen sendet. Die Extrema liegen beachtlich weit auseinander, die Leistung wird also klar verteilt. Die Deformationen in der Kurve dürften auf Grund ihrer Grösse einen relativ geringen Einfluss auf die Performance der Antenne haben.

Ziel des Projekts war es, eine Antenne zu entwerfen, die in drei 120° auseinanderliegende Raumrichtungen maximale Leistung strahlt und in die Bereiche zwischen den Keulen möglichst keine Strahlung abgibt.

Dieses Designziel wurde erreicht.