

Betrachtungen zum Standortbedarf für Basisstationen in einem bundesweiten digitalen Funknetz der BOS

1. Ausgangslage

Aus funktechnischer Sicht ist es eigentlich ungünstig, dass die BOS ihre Frequenzen bei 80 MHz (4-m-Bereich) aufgeben und das digitale Funknetz im Frequenzbereich 380 – 400 MHz (77 cm) aufbauen werden. Die Reichweiten, die mit Trägerfrequenzen bei 80 MHz zu erzielen sind, lassen sich aus physikalischen Gründen unter vergleichbaren Voraussetzungen mit Trägerfrequenzen bei 380 – 400 MHz nicht mehr erzielen. Der physikalisch bedingte frequenzabhängige Anteil der Freiraumdämpfung liegt bei 390 MHz um ca. 14 dB höher als bei 80 MHz. Wie wir noch sehen werden, haben 14 dB Unterschied ganz erhebliche Auswirkungen auf die Funknetzplanung. Der Aufbau eines digitalen Funknetzes erfordert auch schon deshalb einen ungleich höheren Aufwand als bisher gewohnt.

2. Dimensionierung der Funknetze

Nach den Vorstellungen der Bedarfsträger soll das künftige Digitalfunknetz der BOS in der Bundesrepublik Deutschland so dimensioniert werden, dass entsprechend dem Vorbild öffentlicher Mobilfunknetze ein Funkbetrieb bundesweit flächendeckend auch mit Handfunkgeräten und sogar innerhalb von Gebäuden ermöglicht wird. Gleichzeitig soll eine flächendeckende Pager-Versorgung gewährleistet werden.

Auf der Basis dieser Forderungen ist ein Vergleich des künftigen Digitalfunknetzes mit dem heutigen Analogfunk der BOS nicht mehr zulässig. Die 4-m-Funkverkehrs-kreise der BOS sind in der Regel für den Betrieb von 10-Watt-Fahrzeugfunkgeräten über eine Fahrzeugantenne ausgelegt. Diese Funkanlagen haben gegenüber Handfunkgeräten erheblich günstigere Sende-/Empfangseigenschaften. Eine Dimensionierung der Funknetze für den flächendeckenden Betrieb von Handfunkgeräten war im 4-m-Bereich der BOS auch nie vorgesehen, erst recht nicht für eine Inhouse-

Versorgung. Daher mussten in den 4-m-Funknetzen keine Verluste berücksichtigt werden, die z.B. durch die Wendelantenne am Handfunkgerät, durch die Trageweise des Geräts am Körper und durch einen Funkbetrieb aus Gebäuden heraus entstehen. Insgesamt können sich diese Verluste auf ca. 18 – 23 dB belaufen.

Werden die genannten Verluste jetzt für das digitale Funknetz im Link-Budget berücksichtigt, ist ein entsprechend geringerer Spielraum für den maximal nutzbaren Pfadverlust auf der freien Funkstrecke die Folge, d.h. die Funkreichweite verringert sich erheblich. Diese Verringerung kann unter sonst gleichen Bedingungen nur kompensiert werden durch eine Erhöhung der Sendeleistung oder/und durch eine Verkürzung der zulässigen Funkstrecken im Netz (Funkzellenverdichtung).

2.1 Pfadverlust, Reichweite und Ausgleich durch Sendeleistungsanhebung

Legt man die Funkfeldberechnungsmodelle von Okumura/Hata zugrunde (siehe „Anlage 1“), lässt sich der in der folgenden Tabelle beispielhaft dargestellte Zusammenhang zwischen Pfadverlust- und Reichweitenänderung berechnen. Zum Ausgleich müsste die Sendeleistung jeweils wie folgt erhöht werden:

Tabelle 1:

Eine Verminderung des nutzbaren Pfadverlustes um:	Bewirkt eine Reduzierung der Reichweite auf:	Ein Ausgleich ist möglich durch Erhöhung der Sendeleistung um:
0 dB	100 %	Faktor 1,00
1 dB	93,5 %	Faktor 1,26
2 dB	87,5 %	Faktor 1,59
3 dB	81,8 %	Faktor 2,00
4 dB	76,5 %	Faktor 2,51
5 dB	71,6 %	Faktor 3,16
6 dB	66,9 %	Faktor 3,98
7 dB	62,6 %	Faktor 5,01
8 dB	58,5 %	Faktor 6,31
9 dB	54,8 %	Faktor 7,94
10 dB	51,2 %	Faktor 10,0

Ausgehend von der für TETRA 25 vorgesehenen Sendeleistung einer Basisstation von 25 Watt müsste zur Anhebung des zulässigen Pfadverlustes z.B. um 6 dB (für eine bessere Funkversorgung) die Sendeleistung auf 100 Watt erhöht werden. Andererseits ergibt sich auch: Um eine gegebene Reichweite nur um ca. 50 % zu erhöhen, benötige ich die vierfache Sendeleistung!

2.2 Pfadverlust, Zellfläche und Ausgleich durch Funkzellenverdichtung

Die zweite Möglichkeit zur Kompensation des Pfadverlustes besteht in der Verkürzung der zulässigen Reichweiten im Funknetz und somit in der Verdichtung der Funkzellen. Zwischen Reichweite und versorgter Fläche pro Funkzelle besteht ebenfalls ein exponentieller Zusammenhang. Beträgt die Funkreichweite z.B. 15 km, kann mit einer Relaisfunkstelle theoretisch eine Fläche von 707 km^2 versorgt werden. Angenommen, die zulässige Funkreichweite würde auf ein Drittel, also auf 5 km reduziert, dann beträgt die versorgte Fläche dieser Funkzelle nur noch $78,5 \text{ km}^2$, also nur noch ein Neuntel. Für eine Flächendeckung wäre dann die neunfache Zahl an Basisstationen erforderlich (erforderliche Überlappungen der Funkzellen sind hierbei nicht berücksichtigt).

Soll nun am Rande einer Funkzelle eine um 6 dB höhere Feldstärke verfügbar sein, muss unter sonst gleichen Bedingungen nach Okumura/Hata der Radius der Funkzelle (Reichweite) von 100 % auf ca. 66,9 % reduziert werden. Damit verbunden ist jedoch eine Reduzierung der versorgten Fläche pro Basisstation von 100 % auf 44,8 %. Zum Ausgleich müsste die Anzahl der Basisstationen um den Faktor 2,23 erhöht werden.

In der nachfolgenden Tabelle wird der Zusammenhang zwischen Pfadverlust- und Reichweitenänderung sowie der daraus ableitbare Infrastrukturaufwand beispielhaft dargestellt. Zur besseren Übersicht wird von einer fiktiven Funkreichweite von 10 km ausgegangen:

Tabelle 2:

Eine Verminderung des nutzbaren Pfadverlustes um:	Bewirkt eine Reduzierung der Reichweite auf:	Die versorgte Fläche pro Funkzelle beträgt damit:	Ein Ausgleich ist möglich durch höhere Zahl an Basisstationen um:
0 dB	10,000 km	314,16 km ²	Faktor 1,00
1 dB	9,352 km	274,74 km ²	Faktor 1,14
2 dB	8,747 km	240,37 km ²	Faktor 1,31
3 dB	8,181 km	210,27 km ²	Faktor 1,49
4 dB	7,651 km	183,91 km ²	Faktor 1,71
5 dB	7,155 km	160,81 km ²	Faktor 1,95
6 dB	6,692 km	140,67 km ²	Faktor 2,23
7 dB	6,259 km	123,08 km ²	Faktor 2,55
8 dB	5,853 km	107,62 km ²	Faktor 2,92
9 dB	5,475 km	94,16 km ²	Faktor 3,34
10 dB	5,120 km	82,34 km ²	Faktor 3,81

Prof. Walke von der RWTH Aachen hat in seinem Gutachten für die BOS der Bundesrepublik Deutschland einen Bedarf an 3.986 Basisstationen in einem TETRA 25-Netz errechnet. Mit dieser Anzahl an Basisstationen soll zwar bundesweit eine Versorgung für Handfunkgeräte ermöglicht werden, doch eine Inhouse-Versorgung ist dabei nur für die Innenstadtbereiche vorgesehen, die lediglich etwa 6 % der Fläche der Bundesrepublik ausmachen. Sollte also eine bundesweit flächendeckende Inhouse-Versorgung sichergestellt werden, müsste man für 94 % der Fläche der Bundesrepublik noch mindestens 10 dB Gebäudeverlust ausgleichen. Um diesen Ausgleich herzustellen, wäre für diese Fläche, für die nach Walke 2.214 Basisstationen angesetzt sind, gemäß obenstehender Tabelle die 3,81fache Anzahl nötig, also 8.435 Basisstationen. Hinzu kommen die 1.772 Basisstationen der bereits Inhouse-versorgten Innenstadtbereiche, macht zusammen 10.207 Basisstationen!

Im Folgenden soll nun der Bedarf anhand der Berechnungsgrundlagen nach Prof. Walke genauer untersucht werden:

3. Berechnungsgrundlagen nach Prof. Walke

Prof. Dr.-Ing. Walke vom Lehrstuhl für Kommunikationsnetze an der RWTH Aachen wendet bei seinen Funkfeldberechnungen die von Okumura / Hata entwickelten Näherungsformeln für die Berechnung des zu erwartenden Pfadverlustes auf der Funkstrecke an. Es werden Näherungsformeln für vier Morphologietypen unterschieden: *Urban Area*, *Suburban Area*, *Rural Area* und *Open Area*. In den Berechnungen selbst verwendet Prof. Walke allerdings nur die Näherungsformeln für die Morphologietypen *Suburban Area* und *Rural Area* und unterscheidet des weiteren für beide Typen jeweils Innenstadtbereiche mit Inhouse-Versorgung und Umlandbereiche ohne Inhouse-Versorgung (siehe „Anlage 2“).

Zunächst werden für die Innenstadtbereiche und für das Umland die Link-Budgets für die Aufwärtsstrecke von einem Handfunkgerät zu einer Basisstation berechnet. Gegenüber der Abwärtsstrecke hat die Aufwärtsstrecke den schlechteren Spielraum für den Pfadverlust und muss deshalb als Maßstab für eine zweiseitig gerichtete Funkverbindung dienen. Aufgrund der festgestellten Link-Budgets ergibt sich so für die Innenstadtbereiche mit Inhouse-Versorgung ein maximal nutzbarer Pfadverlust auf der Funkstrecke von 118 dB und für die Umlandbereiche ohne Inhouse-Versorgung ein maximal nutzbarer Pfadverlust von 130,4 dB.

Mit Hilfe der genannten Näherungsformeln von Okumura / Hata lassen sich nun die jeweils erzielbaren Reichweiten berechnen. Aus den Reichweiten ergeben sich dann die entsprechenden Flächen der Funkzellen, wobei Prof. Walke nicht mit Hexagonflächen rechnet, sondern von einer Kreisfläche ausgeht und von dieser wegen der zwangsläufig erforderlichen Funkzellenüberlappungen 10 % abzieht.

Entsprechend der prozentualen Verteilung der Stadt- und Landflächen in der Bundesrepublik können nun die erforderlichen Standortzahlen für Basisstationen berechnet werden. Auf diese Weise sind die von Prof. Walke ermittelten Zahlenangaben rechnerisch nachvollziehbar.

Um nun den Bedarf an Basisstationen für eine flächendeckende Inhouse-Versorgung vergleichend gegenüberstellen zu können, sollen die gleichen Berechnungsgrundlagen nach Walke angewendet werden, nur wird jetzt auch für die Umlandbereiche ein Gebäudeverlust von 10 dB mit berücksichtigt. Ergebnis: Für eine flächendeckende Inhouse-Versorgung wären 10.214 Basisstationen erforderlich (siehe „Anlage 3“ und vergleiche Seite 4 unten)!

4. Pager-Versorgung

Der A luK fordert eine bundesweit flächendeckende Pager-Versorgung im digitalen Funknetz. Um festzustellen, ob diese Versorgung vorhanden ist, wird die Abwärtsstrecke zu einem Pager betrachtet (siehe „Anlage 4.1“). Aufgrund des besseren Link-Budgets der Abwärtsstrecke ergibt sich gegenüber der Aufwärtsstrecke eines Handfunkgeräts in allen Umgebungsbereichen generell ein um 8 dB größerer Spielraum für den maximal nutzbaren Pfadverlust auf der Funkstrecke, woraus sich entsprechend größere Funkreichweiten ableiten. Voraussetzung ist allerdings, dass ein Pager die gleiche Empfindlichkeit wie ein Handfunkgerät hat und auch keine höheren Antennenverluste aufweist. Wahrscheinlich wird man aber wegen der integrierten Empfangsantenne und der Trageweise direkt am Körper (Hemd- oder Hosentasche) mit zusätzlichen Verlusten rechnen müssen. In der vorliegenden Berechnung ist von 3 dB schlechteren Werten als beim Handfunkgerät (also -6 dB für den Antennengewinn des Pagers) ausgegangen worden.

Beim Vergleich der Reichweiten (siehe „Anlage 3“ und „Anlage 4.1“) ist festzustellen, dass überall dort, wo eine Inhouse-Versorgung für Handfunkgeräte sichergestellt ist, auch Pager sicher versorgt werden. Dies gilt immer dann, wenn der o.g. Spielraum für den nutzbaren Pfadverlust nicht überschritten wird. Sollte also das Funknetz eine flächendeckende Inhouse-Versorgung für Handfunkgeräte ermöglichen, wären in diesem Falle keine zusätzlichen Basisstationen für einen Pagerbetrieb nötig.

Entscheidet man sich jedoch aus Kostengründen für eine Inhouse-Versorgung nur in den Innenstadtbereichen, dann ist für den Pagerbetrieb eine Verdichtung der Basisstationen in den Umlandbereichen erforderlich. Angenommen das „Empfangssystem Pager“ kommt mit den genannten nur 3 dB schlechteren Werten aus, müsste bei nicht vorhandener Inhouse-Versorgung in den Umlandbereichen ein um 5 dB geringerer nutzbarer Pfadverlust ausgeglichen werden (Ausgleich nach „Tabelle 2“ mit dem Faktor 1,95). Hierfür wird ein Mehrbedarf von 2.109 Standorten ermittelt. Der Gesamtbedarf würde somit auf 6.095 Basisstationen (siehe „Anlage 4.2“) steigen.

Anmerkung: Eine gültige Berechnung des Mehrbedarfs kann erst dann durchgeführt werden, wenn verlässliche technische Daten zur Empfindlichkeit und zum Antennengewinn (oder besser Antennenverlust) von TETRA-Pagern vorliegen.

In Zusammenhang mit der Pager-Versorgung müsste auch geprüft werden, ob die Sendeleistung der Basisstationen wie bisher angenommen 25 Watt oder generell 40 Watt betragen wird, wovon Walke ausgeht. Der Unterschied von 25 Watt (44 dBm) zu 40 Watt (46 dBm) beträgt zwar nur 2dB, doch können im Grenzfall bereits diese 2 dB eine deutliche Auswirkung auf den Mehrbedarf haben (nach „Tabelle 2“ um den Faktor 1,31).

5. Voraussetzungen bei den durchgeführten Funkfeldberechnungen

Die vorgenannten Angaben zur Anzahl der benötigten Standorte für Basisstationen gelten nur dann, wenn alle Voraussetzungen, von denen Walke ausgegangen ist, auch in der Praxis eingehalten werden können.

Zum Beispiel geht Walke generell vom Einsatz großer Antennenfelder mit 8 dB Antennengewinn und zusätzlichem Empfangs-Diversity mit 3 dB Gewinn aus. Nach Ansicht der AG „Technik“ ist für viele Standorte die Windlast dieser Antennen zu hoch. Auch wird sich Empfangs-Diversity nicht generell realisieren lassen, weil die dafür erforderlichen horizontalen oder vertikalen Abstände zwischen den Einzelantennen an einem Standort (Mast) nur selten eingehalten werden können. Statt der zusammen 11 dB Gewinn rechnet die AG „Technik“ nur mit 6dB Gewinn für die Antennen der Basisstationen. Das macht bereits einen Unterschied von 5 dB! (Auswirkung: siehe „Tabelle 2“)

Des Weiteren geht Walke generell von 40 m Antennenhöhe für die Basisstationen aus. Doch nur wenige Standorte der BOS erlauben 40 m Antennenhöhe über Grund. Rechnet man z.B. mit nur 24 m Antennenhöhe, erhöht sich der theoretische Standortbedarf für eine Funkversorgung nach Walke allein aufgrund dieser Höhenänderung von 3.986 auf 6.635 (siehe „Anlage 5.1“)!

Würde man mit dieser Antennenhöhe (24 m) auch noch eine bundesweit flächendeckende Inhouse-Versorgung sicherstellen wollen, dann wären dafür sogar 16.683 Standorte für Basisstationen nötig (siehe „Anlage 5.2“).

Wie man klar erkennt, kommt man auf diese Weise sehr schnell zu nicht akzeptablen Größenordnungen.

6. Ausblick

- Bei der konkreten Funknetzplanung wird sich herausstellen, dass nur die wenigsten Standorte der BOS geeignet sind, die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Gibt es solche Standorte, müssen sie sich auch am richtigen Ort befinden, d.h. sie müssen zur Netzplanung passen.
- Die Folge wird sein, dass die weitaus meisten Standorte neu erschlossen und geeignete Antennenmasten erst errichtet werden müssen, damit die gestellten Anforderungen möglichst gut erfüllt werden können.
- Trotz guter Antennenstandorte wird sich die Forderung nach einer bundesweit flächendeckenden Inhouse-Versorgung wegen des dafür erforderlichen enormen Infrastrukturaufwandes wohl nicht realisieren lassen.
- Der erforderliche zusätzliche Infrastrukturaufwand für eine bundesweit flächendeckende Pagerversorgung kann erst dann abschließend bewertet werden, wenn verlässliche Empfängerdaten für den TETRA-Pager vorliegen.

Anhang:

Als Anlagen werden unterschiedliche Berechnungen zu Link-Budgets, Funkreichweiten, Zellflächen und sich daraus ergebende Standortbedarfe für Basisstationen in einem bundesweiten TETRA 25 -Funknetz angefügt.

Das Berechnungsprogramm erlaubt es, die erforderlichen Standortzahlen auch für andere Funkssysteme zu ermitteln. Hierzu müssen in den Link-Budgets nur die jeweils zutreffenden Systemwerte eingegeben werden.

gez.: Horst Beckebanze

Funkfeldberechnung nach dem Modell von Okumura / Hata

(auf der Grundlage durchgeführter Messungen in den Jahren 1962/1963 und 1965 in Tokio und gültig für den Frequenzbereich von **150 bis 1500 MHz**)

Für die Berechnung des **Pfadverlustes L** haben Okumura/Hata Näherungsformeln entwickelt und dabei zwischen vier Morphologietypen unterschieden: *Urban Area*, *Suburban Area*, *Rural Area* und *Open Area*.

Es dürfen nur Zahlenwerte in den grünen Feldern verändert werden!

I. Bekannt sein müssen:

f = Frequenz
 h_B = Antennenhöhe der Basisstation
 h_M = Antennenhöhe der Mobilstation
 R = Entfernung zw. Basis- und Mobilstation

f =	392 MHz
h_B =	40 m
h_M =	1,5 m
R =	2,055 km

Reichweite bei Vorgabe Pfadverlust:

f =	392 MHz
h_B =	40 m
h_M =	1,5 m
L =	118,0 dB

II. Berechnung des Pfadverlustes für die verschiedenen Umgebungen bei Vorgabe der Reichweite:

(städtisch)

$$L_{\text{Urban Area}} = 69,55 + 26,16 \cdot \log f - 13,82 \cdot \log h_B - (1,1 \cdot \log f - 0,7) \cdot h_M + (1,56 \cdot \log f - 0,8) + (44,9 - 6,55 \cdot \log h_B) \cdot \log R$$

$$L_{\text{Urban Area}} = 126,0 \text{ dB}$$

$$R = 1,201 \text{ km}$$

(Vorstadt)

$$L_{\text{Suburban Area}} = 63,35 + 27,72 \cdot \log f - 13,82 \cdot \log h_B - (1,1 \cdot \log f - 0,7) \cdot h_M + (44,9 - 6,55 \cdot \log h_B) \cdot \log R - 2 \cdot (\log f/28)^2$$

$$L_{\text{Suburb Area}} = 118,0 \text{ dB}$$

$$R = 2,055 \text{ km}$$

(ländlich)

$$L_{\text{Rural Area}} = 37,81 + 46,05 \cdot \log f - 13,82 \cdot \log h_B - (1,1 \cdot \log f - 0,7) \cdot h_M + (44,9 - 6,55 \log h_B) \cdot \log R - 4,78 \cdot (\log f)^2$$

$$L_{\text{Rural Area}} = 110,5 \text{ dB}$$

$$R = 3,400 \text{ km}$$

(Freifeld)

$$L_{\text{Open Area}} = 27,81 + 46,05 \cdot \log f - 13,82 \cdot \log h_B - (1,1 \cdot \log f - 0,7) \cdot h_M + (44,9 - 6,55 \cdot \log h_B) \cdot \log R - 4,78 \cdot (\log f)^2$$

$$L_{\text{Open Area}} = 100,5 \text{ dB}$$

$$R = 6,639 \text{ km}$$

Link-Budget, Funkreichweite und Anzahl der Standorte in Deutschland, berechnet für die Aufwärtsstrecke mit einem TETRA-Handfunkgerät:

Es dürfen nur Zahlenwerte in den grünen Feldern verändert werden!

I. Berechnung des Link-Budget		Werte nach Prof. Walke	
Inhouse-Versorgung nur in den Innenstadtbereichen! (etwa 6 % der Fläche der BRD)			
		Innenstadt:	Umland:
Sendeleistung Handfunkgerät	1 Watt =	30 dBm	30 dBm
Antennengewinn Handfunkgerät		-3 dB	-3 dB
Körperverlust		-5 dB	-5 dB
Gebäudeverlust		-10 dB	0 dB
Schwundreserve		-15 dB	-12,6 dB
Antennengewinn Basisstation		8 dB	8 dB
Antennenkabelverluste Basisstation		-2 dB	-2 dB
Verlust Filter/Verteiler Basisstation		-3 dB	-3 dB
Diversitätsgewinn Basisstation		3 dB	3 dB
	Verbleib:	3 dBm	15,4 dBm
Empfänger-Empfindlichkeit Basisstation		-115 dBm	-115 dBm
maximal nutzbarer Pfadverlust auf der Funkstrecke:		118 dB	130,4 dB

II. Berechnung der Funkreichweiten (R)

Frequenz	f = 392 MHz	Es werden die genannten Formeln nach Okumura/Hata angewendet!
Antennenhöhe Basisstation	h _B = 40 m	
Antennenhöhe Handfunkgerät	h _M = 1,5 m	

	Fläche Kreis:	nach Walke:	Fläche Hexagon:
a) Innenstadt, Suburban, Inhouse-Versorgung R _{SA} = 2,055 km --->	13,26 km ²	11,94 km ²	10,97 km ²
b) Innenstadt, Rural, Inhouse-Versorgung R _{RA} = 3,400 km --->	36,31 km ²	32,68 km ²	30,03 km ²
c) Umland, Suburban, <u>keine</u> Inhouse-Versorg. R _{SA} = 4,711 km --->	69,73 km ²	62,76 km ²	57,67 km ²
d) Umland, Rural, <u>keine</u> Inhouse-Versorgung R _{RA} = 7,795 km --->	190,90 km ²	171,81 km ²	157,87 km ²

III. Berechnung der erforderlichen Zahl an Standorten für Basisstationen

Fläche der BRD: 356.601 km ²		Standorte:	Standorte:	Standorte:
davon:				
a)	5,82% 20.739 km ²	1.564	1.737	1.891
b)	0,32% 1.143 km ²	31	35	38
c)	7,37% 26.267 km ²	377	419	455
d)	86,50% 308.452 km ²	1.616	1.795	1.954
100,00% 356.601 km ²		Gesamtzahl: 3.588	3.986	4.338

Link-Budget, Funkreichweite und Anzahl der Standorte in Deutschland, berechnet für die Aufwärtsstrecke mit einem TETRA-Handfunkgerät:

Es dürfen nur Zahlenwerte in den grünen Feldern verändert werden!

I. Berechnung des Link-Budget Werte nach Prof. Walke
Für eine bundesweit flächendeckende Inhouse-Versorgung (Innenstadt und Umland)

		<u>Innenstadt:</u>	<u>Umland:</u>
Sendeleistung Handfunkgerät	1 Watt =	30 dBm	30 dBm
Antennengewinn Handfunkgerät		-3 dB	-3 dB
Körperverlust		-5 dB	-5 dB
Gebäudeverlust		-10 dB	-10 dB
Schwundreserve		-15 dB	-12,6 dB
Antennengewinn Basisstation		8 dB	8 dB
Antennenkabelverluste Basisstation		-2 dB	-2 dB
Verlust Filter/Verteiler Basisstation		-3 dB	-3 dB
Diversitätsgewinn Basisstation		3 dB	3 dB
	Verbleib:	3 dBm	5,4 dBm
Empfänger-Empfindlichkeit Basisstation		-115 dBm	-115 dBm
maximal nutzbarer Pfadverlust auf der Funkstrecke:		118 dB	120,4 dB

II. Berechnung der Funkreichweiten (R)

Frequenz	f = 392 MHz	Es werden die genannten Formeln nach Okumura/Hata angewendet!
Antennenhöhe Basisstation	h _B = 40 m	
Antennenhöhe Handfunkgerät	h _M = 1,5 m	

	Fläche Kreis:	nach Walke:	Fläche Hexagon:
a) Innenstadt, Suburban, Inhouse-Versorgung R _{SA} = 2,055 km --->	13,26 km ²	11,94 km ²	10,97 km ²
b) Innenstadt, Rural, Inhouse-Versorgung R _{RA} = 3,400 km --->	36,31 km ²	32,68 km ²	30,03 km ²
c) Umland, Suburban, Inhouse-Versorg. R _{SA} = 2,413 km --->	18,29 km ²	16,46 km ²	15,12 km ²
d) Umland, Rural, Inhouse-Versorgung R _{RA} = 3,992 km --->	50,06 km ²	45,06 km ²	41,40 km ²

III. Berechnung der erforderlichen Zahl an Standorten für Basisstationen

Fläche der BRD: 356.601 km ²		Standorte:	Standorte:	Standorte:
<u>davon:</u>				
a)	5,82% 20.739 km ²	1.564	1.737	1.891
b)	0,32% 1.143 km ²	31	35	38
c)	7,37% 26.267 km ²	1.436	1.596	1.737
d)	86,50% 308.452 km ²	6.161	6.846	7.450
	100,00% 356.601 km ²	Gesamtzahl: 9.193	10.214	11.116

Link-Budget und Funkreichweite für eine TETRA-Basisstation, berechnet für die Abwärtsstrecke zu einem Pager:

Es dürfen nur Zahlenwerte in den grünen Feldern verändert werden!

I. Berechnung des Link-Budget

		Innenstadt:	Umland:
Sendeleistung Basisstation	25 Watt =	44 dBm	44 dBm
Verlust Filter/Verteiler Basisstation		-3 dB	-3 dB
Antennenkabelverluste Basisstation		-2 dB	-2 dB
Antennengewinn Basisstation		8 dB	8 dB
Schwundreserve		-15 dB	-12,6 dB
Gebäudeverlust		-10 dB	-10 dB
Körperverlust		-5 dB	-5 dB
Antennengewinn Pager		-6 dB	-6 dB
	Verbleib:	11 dBm	13,4 dBm
Empfänger-Empfindlichkeit des TETRA-Pagers		-112 dBm	-112 dBm
maximal nutzbarer Pfadverlust auf der Funkstrecke:		123 dB	125,4 dB

II. Berechnung der Funkreichweiten (R)

Frequenz	f =	392 MHz
Antennenhöhe Basisstation	$h_B =$	40 m
Antennenhöhe Pager	$h_M =$	1,5 m

Es werden die genannten Formeln nach Okumura/Hata angewendet!

a) Innenstadt, Suburban, Pager-Versorgung	$R_{SA} =$	2,871 km
b) Innenstadt, Rural, Pager-Versorgung	$R_{RA} =$	4,751 km
c) Umland, Suburban, Pager-Versorgung	$R_{SA} =$	3,372 km
d) Umland, Rural, Pager-Versorgung	$R_{RA} =$	5,578 km

Mehrbedarf an Basisstationen, wenn Paging sichergestellt werden soll:

1. Wenn **bundesweit** eine **flächendeckende Inhouse-Versorgung** sichergestellt wird, werden für Paging keine zusätzlichen Basisstationen benötigt!
2. Wenn eine **Inhouse-Versorgung** nur in den **Innenstadtbereichen** sichergestellt wird, benötigt man eine Verdichtung der Basisstationen im Umlandbereich, und zwar:

2.1 Reichweiten und Zellflächen

Reichweiten in Umlandbereichen für HRT, uplink

c) Umland, Suburban, keine Inhouse-Versorgung

$$R_{SA} = 4,711 \text{ km}$$

d) Umland, Rural, keine Inhouse-Versorgung

$$R_{RA} = 7,795 \text{ km}$$

Reichweiten in Umlandbereichen zu Pagern, downlink

c) Umland, Suburban, Pager-Versorgung

$$R_{SA} = 3,372 \text{ km}$$

d) Umland, Rural, Pager-Versorgung

$$R_{RA} = 5,578 \text{ km}$$

Zellflächen:

Kreis:	Walke:	Hexagon:
69,72 km ²	62,75 km ²	57,66 km ²
190,89 km ²	171,80 km ²	157,86 km ²
35,72 km ²	32,15 km ²	29,54 km ²
97,75 km ²	87,97 km ²	80,84 km ²

2.2 Standorte für Basisstationen in der BRD

Fläche Umland, Suburban: 26.267 km²

Fläche Umland, Rural: 308.452 km²

Standorte:	Standorte:	Standorte:
------------	------------	------------

Anzahl Basisstationen ohne Inhouse-Versorgung Suburban:

377	419	456
-----	-----	-----

Anzahl Basisstationen ohne Inhouse-Versorgung Rural:

1.616	1.795	1.954
-------	-------	-------

Summen:	1.993	2.214	2.409
----------------	-------	-------	-------

Anzahl Basisstationen für Pager-Versorgung Suburban:

735	817	889
-----	-----	-----

Anzahl Basisstationen für Pager-Versorgung Rural:

3.156	3.506	3.816
-------	-------	-------

Summen:	3.891	4.323	4.705
----------------	-------	-------	-------

Mehrbedarf an Basisstationen:	1.898	2.109	2.295
--------------------------------------	-------	-------	-------

Gesamtbedarf an Basisstationen:	5.486	6.095	6.633
--	-------	-------	-------

Link-Budget, Funkreichweite und Anzahl der Standorte in Deutschland, berechnet für die Aufwärtsstrecke mit einem TETRA-Handfunkgerät:

Es dürfen nur Zahlenwerte in den grünen Feldern verändert werden!

		Werte nach Prof. Walke	
		Innenstadt:	Umland:
Inhouse-Versorgung nur in den Innenstadtbereichen! (etwa 6 % der Fläche der BRD)			
Sendeleistung Handfunkgerät	1 Watt =	30 dBm	30 dBm
Antennengewinn Handfunkgerät		-3 dB	-3 dB
Körperverlust		-5 dB	-5 dB
Gebäudeverlust		-10 dB	0 dB
Schwundreserve		-15 dB	-12,6 dB
Antennengewinn Basisstation		8 dB	8 dB
Antennenkabelverluste Basisstation		-2 dB	-2 dB
Verlust Filter/Verteiler Basisstation		-3 dB	-3 dB
Diversitätsgewinn Basisstation		3 dB	3 dB
	Verbleib:	3 dBm	15,4 dBm
Empfänger-Empfindlichkeit Basisstation		-115 dBm	-115 dBm
maximal nutzbarer Pfadverlust auf der Funkstrecke:		118 dB	130,4 dB

II. Berechnung der Funkreichweiten (R)

Frequenz	f =	392 MHz	Es werden die genannten Formeln nach Okumura/Hata angewendet!
Antennenhöhe Basisstation	$h_B =$	24 m	
Antennenhöhe Handfunkgerät	$h_M =$	1,5 m	

	Fläche Kreis:	nach Walke:	Fläche Hexagon:
a) Innenstadt, Suburban, Inhouse-Versorgung $R_{SA} = 1,639 \text{ km}$ --->	8,44 km ²	7,60 km ²	6,98 km ²
b) Innenstadt, Rural, Inhouse-Versorgung $R_{RA} = 2,657 \text{ km}$ --->	22,18 km ²	19,96 km ²	18,34 km ²
c) Umland, Suburban, <u>keine</u> Inhouse-Versorg. $R_{SA} = 3,634 \text{ km}$ --->	41,49 km ²	37,34 km ²	34,31 km ²
d) Umland, Rural, <u>keine</u> Inhouse-Versorgung $R_{RA} = 5,891 \text{ km}$ --->	109,03 km ²	98,12 km ²	90,16 km ²

III. Berechnung der erforderlichen Zahl an Standorten für Basisstationen

Fläche der BRD: 356.601 km ²		Standorte:	Standorte:	Standorte:
davon:				
a)	5,82% 20.739 km ²	2.457	2.730	2.971
b)	0,32% 1.143 km ²	52	57	62
c)	7,37% 26.267 km ²	633	704	766
d)	86,50% 308.452 km ²	2.829	3.143	3.421
100,00% 356.601 km ²		Gesamtzahl: 5.971	6.635	7.220

Link-Budget, Funkreichweite und Anzahl der Standorte in Deutschland, berechnet für die Aufwärtsstrecke mit einem TETRA-Handfunkgerät:

Es dürfen nur Zahlenwerte in den grünen Feldern verändert werden!

I. Berechnung des Link-Budget Werte nach Prof. Walke
Für eine bundesweit flächendeckende Inhouse-Versorgung (Innenstadt und Umland)

		<u>Innenstadt:</u>	<u>Umland:</u>
Sendeleistung Handfunkgerät	1 Watt =	30 dBm	30 dBm
Antennengewinn Handfunkgerät		-3 dB	-3 dB
Körperverlust		-5 dB	-5 dB
Gebäudeverlust		-10 dB	-10 dB
Schwundreserve		-15 dB	-12,6 dB
Antennengewinn Basisstation		8 dB	8 dB
Antennenkabelverluste Basisstation		-2 dB	-2 dB
Verlust Filter/Verteiler Basisstation		-3 dB	-3 dB
Diversitätsgewinn Basisstation		3 dB	3 dB
	Verbleib:	3 dBm	5,4 dBm
Empfänger-Empfindlichkeit Basisstation		-115 dBm	-115 dBm
maximal nutzbarer Pfadverlust auf der Funkstrecke:		118 dB	120,4 dB

II. Berechnung der Funkreichweiten (R)

Frequenz	f = 392 MHz	Es werden die genannten Formeln nach Okumura/Hata angewendet!
Antennenhöhe Basisstation	h _B = 24 m	
Antennenhöhe Handfunkgerät	h _M = 1,5 m	

	Fläche Kreis:	nach Walke:	Fläche Hexagon:
a) Innenstadt, Suburban, Inhouse-Versorgung R _{SA} = 1,639 km --->	8,44 km ²	7,60 km ²	6,98 km ²
b) Innenstadt, Rural, Inhouse-Versorgung R _{RA} = 2,657 km --->	22,18 km ²	19,96 km ²	18,34 km ²
c) Umland, Suburban, Inhouse-Versorg. R _{SA} = 1,912 km --->	11,49 km ²	10,34 km ²	9,50 km ²
d) Umland, Rural, Inhouse-Versorgung R _{RA} = 3,100 km --->	30,19 km ²	27,17 km ²	24,96 km ²

III. Berechnung der erforderlichen Zahl an Standorten für Basisstationen

Fläche der BRD: 356.601 km ²		Standorte:	Standorte:	Standorte:
<u>davon:</u>				
a)	5,82% 20.739 km ²	2.457	2.730	2.971
b)	0,32% 1.143 km ²	52	57	62
c)	7,37% 26.267 km ²	2.287	2.541	2.765
d)	86,50% 308.452 km ²	10.218	11.354	12.356
	100,00% 356.601 km ²	Gesamtzahl: 15.014	16.683	18.155