



Technische  
Universität  
Braunschweig



Institut für Nachrichtentechnik

# Nachrichtentechnisches Praktikum

Versuch: Mobilfunk

Institut für Nachrichtentechnik  
Technische Universität Braunschweig

Stand: 31.10.2016

Betreuer: Nils Dreyer

---

# ***Inhalt***

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Die GSM-Systemarchitektur .....</b>	<b>4</b>
2.1.1	Mobile Station (MS) .....	5
2.1.2	Base Station Subsystem (BSS).....	6
2.1.3	Network and Switching Subsystem (NSS).....	6
2.1.4	Operation Subsystem (OSS) .....	7
<b>2.2</b>	<b>GSM-Technik.....</b>	<b>7</b>
2.2.1	Funkschnittstelle .....	7
2.2.2	Zugriffsverfahren .....	7
2.2.3	Funkkanäle .....	9
2.2.4	Logische Kanäle.....	10
2.2.5	Fehlerschutzmechanismen .....	12
2.2.6	Timing Advance.....	13
2.2.7	Handover.....	14
2.2.8	Location-Area & Location-Update .....	14
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau .....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Versuchsvorbereitung.....</b>	<b>15</b>
4.1	MANUAL TEST .....	16
4.2	CALL ESTABLISHED.....	17
<b>5</b>	<b>Versuchsdurchführung .....</b>	<b>17</b>
5.1	Phasen- und Frequenzfehler .....	17
5.2	Power Ramp - Messung .....	18
5.3	Timing Advance.....	20
5.4	Bitfehlerratenmessung .....	20
<b>6</b>	<b>Messprotokolle .....</b>	<b>22</b>
6.1	Phasen- Frequenzfehler .....	22
6.2	Bitfehlerratenmessung für GSM-900 und GSM-1800.....	23
<b>7</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>25</b>
7.1	Umrechnungstabellen.....	25
7.2	Communication Mobile Digital Tester 55 .....	26
7.3	Quellen.....	26

# 1 Einleitung

GSM (*Global System for Mobile Communications*) ist heutzutage das meist verwendete digitale Mobilfunksystem (ca. 1,7 Milliarden Nutzer weltweit - dies entspricht etwa 78% aller Mobilfunknutzer der Welt) in rund 200 Ländern mit 670 verschiedenen GSM-Netzen. Schon im Jahre 1987 wurde zwischen 13 europäischen Ländern vereinbart, ein digitales Mobilfunksystem aufzubauen. Die gesetzten Ziele dieses Systems waren unter anderen: ein breites Sprach- und Dienstangebot, Kompatibilität zu den Festnetzen z.B. ISDN, sowie europaweite Erreichbarkeit und Vermittlung. Es wird als ein Mobilfunksystem der 2. Generation (2G) bezeichnet und trotz der Einführung von UMTS (3G) und LTE (4G) weiterentwickelt (z.B. GPRS, HSCSD und EDGE). Weitere Optimierungen des GSM-Systems wurden im Rahmen von Forschungsarbeiten auch in diesem Institut durchgeführt.

Im Institut für Nachrichtentechnik (IfN) steht zu Lehrzwecken ein Mobilfunkmessgerät von Rhode&Schwarz zur Verfügung und soll im Rahmen des Nachrichtentechnischen Praktikums dazu dienen, einen Einblick in die wesentlichen Bestandteile und Funktionalitäten dieses Systems zu geben. Die erlangten Kenntnisse können mit den Vorlesungsangeboten "Grundlagen des Mobilfunks", "Planung terrestrischer Funknetze" und "Modellierung und Simulation von Mobilfunksystemen" weiter vertieft werden.

Im Folgenden werden zunächst die wichtigsten Grundlagen zu Architektur und Übertragungstechnik erläutert. Zu Beginn des Versuches werden hierzu einige Fragen gestellt, deshalb sollte dieser Teil sorgfältig gelesen und verstanden werden. In den folgenden Kapiteln wird der Versuchsaufbau, -vorbereitung und -durchführung erklärt. Diese Kapitel sollten ebenfalls sorgfältig gelesen werden, um eine zügige Durchführung des Versuches zu gewährleisten.

Es steht ein Mobiltelefon (Alcatel) zur Verfügung, welches für diesen Versuch verwendet werden kann. Zudem bietet dieser Versuch auch die Möglichkeit die eigenen Geräte im Vergleich dazu zu testen.

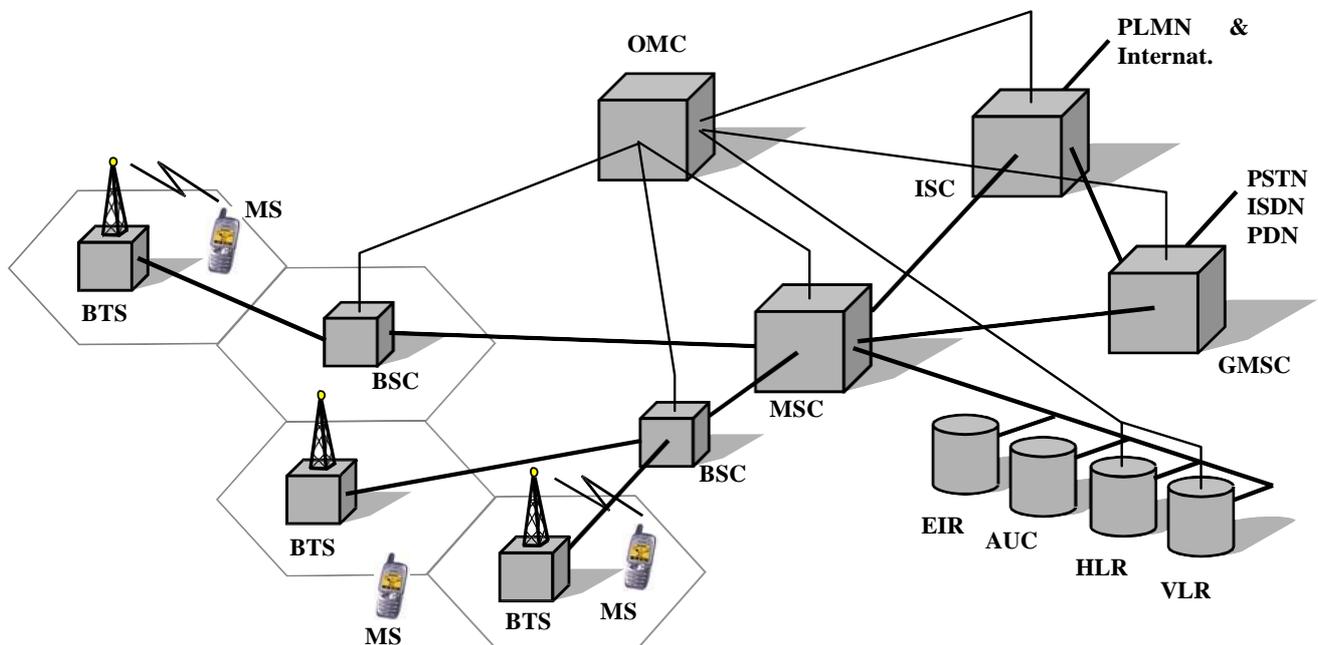
**Bitte die Messprotokolle (Kapitel 6) jeweils auf einer ganzen Din A4 Seite ausdrucken und mitbringen.**

## 2 Grundlagen

### 2.1 Die GSM-Systemarchitektur

In **Abbildung 1** ist eine Übersicht des GSM-Systems dargestellt. Es besteht aus zwei wesentlichen Bestandteilen: die fest installierte Infrastruktur (das Netz im eigentlichen Sinn) und die Mobilteilnehmer, welche über die Funkschnittstelle die Dienste des Netzes nutzen und kommunizieren. Die Nutzer können sich in dem Versorgungsgebiet des GSM-Netzes frei bewegen, welches aus einer Vielzahl von Zellen zusammengesetzt ist.

Dieser Versuch stellt die komplette Funktionalität eines Base Station Controllers (BSC) zur Verfügung. Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile und die wesentlichen Funktionalitäten des GSM-Netzes vorgestellt.



**BTS** Base Transceiving Station  
**BSC** Base Station Controller  
**MSC** Mobile Switching Center  
**GSMC** Gateway MSC  
**ISC** International Switching Center

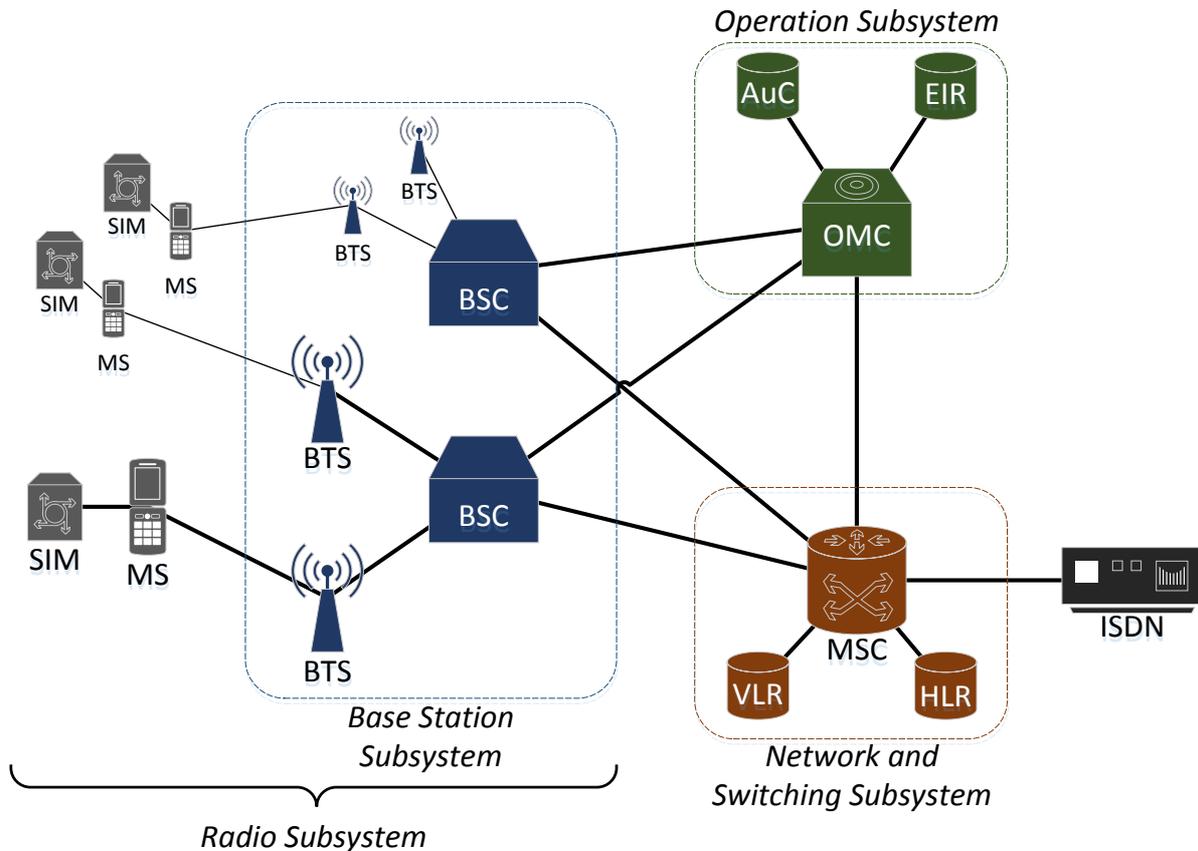
**MS** Mobile Station  
**HLR** Home Location Register  
**VLR** Visited Location Register  
**EIR** Equipment Identity Register  
**AUC** Authentication Center  
**OMC** Operation and Maintenance Center

**Abbildung 1: GSM Systemarchitektur**

Das GSM-System kann in die folgenden Sub-Systeme eingeteilt werden, schematisch in **Abbildung 2** dargestellt:

- Radio Subsystem - Funkteilsystem (Mobile Station (MS) und Base Station Subsystem (BSS))
- Network and Switching Subsystem (NSS) - Vermittlungsteilsystem
- Operation Subsystem (OSS) – Teilsystem für Betrieb und Wartung

Das Base Station Subsystem, das Network and Switching Subsystem und das Operation Subsystem bilden dabei die fest installierte Infrastruktur.



**Abbildung 2: Sub-Systeme von GSM**

### 2.1.1 Mobile Station (MS)

Die Mobile Station bezeichnet die gesamte physikalische Ausrüstung des Teilnehmers und besteht aus zwei wesentlichen Teilen: Dem Endgerät (Handy) und einem Subscriber Identity Module (SIM), bekannt als SIM-Karte). In jedem Endgerät ist eine IMEI-Nummer (International Mobile Equipment Identity) gespeichert, über die jedes Handy eindeutig identifiziert werden kann. Das SIM beinhaltet alle nutzerspezifischen Details, unter anderem die für uns nicht sichtbare IMSI-Nummer (International Mobile Subscriber Identity) mit der das System den Kunden identifizieren kann. Diese Nummer wird vom Netzbetreiber intern vergeben und besteht aus drei Komponenten:

- Drei Ziffern **Mobile Country Code** (MCC), das „Heimatland“ der Karte (für z.B. Deutschland 262)
- Zwei Ziffern **Mobile Network Code** (MNC), das „Heimatnetzwerk“ der Karte (T-Mobile: 01, Vodafone : 02, E-Plus : 03, O<sub>2</sub> : 07)
- Die **Mobile Subscriber Identification Number** (MSIN), die bis zu zehn Stellen lang sein kann. Sie bestimmt eindeutig einen Teilnehmer innerhalb des Netzwerks.

Neben der IMSI gibt es auch noch die uns bekannte offizielle Rufnummer, die **MSISDN** (Mobile Station International ISDN Number).

Des Weiteren beinhaltet das SIM Funknetzinformationen, wie z.B. den letzten

Aufenthaltsbereich der Mobile Station (siehe Abschnitt 2.2.8) oder eine Liste bevorzugter Netze im Ausland.

### 2.1.2 Base Station Subsystem (BSS)

Das Base Station Subsystem ist die Funkkomponente des GSM-Netzes. Sie ermöglicht die Kommunikation mit den Mobilteilnehmern in einem bestimmten Zellbereich des GSM- Netzes. Außerdem stellt es die Funkkanäle für Signalisierung und Nutzverkehr zur Verfügung und erledigt die Fehlerschutzcodierung und – decodierung für die Funkkanäle.

Das BSS beinhaltet:

- **Base Transceiver Station (BTS)**

Die Base Transceiver Station beinhaltet die Funkkomponenten (Sende- und Empfangsanlagen einschließlich Antennen) die für die Funkverbindung mit der MS verantwortlich sind. Die Reichweite liegt theoretisch bei 37.8km, fällt aber in der Praxis je nach Geländesituation aufgrund von Ausbreitungsdämpfung deutlich geringer aus. Je nach Antennentypen können ein oder mehrere (i.A. 3) Zellen durch eine BTS versorgt werden.

- **Base Station Controller (BSC)**

Ein Base Station Controller kontrolliert eine oder mehrere BTS und wirkt als Digitalverarbeitungsschnittstelle zum Rest des Netzes. Die Hauptfunktion besteht darin Funkkanäle und Kontrollnachrichten von oder zu (Uplink bzw. Downlink) der MS zu organisieren. Außerdem steuert das BSC Handovermechanismen, d.h. die Übergabe von Mobilteilnehmern innerhalb einer oder zwischen zwei Zellen auf einen anderen Funkkanal (siehe Abschnitt 2.2.3). Eine weitere Aufgabe ist die Steuerung von Funkrufen (Paging). Der BSC ist über das MSC mit dem Network and Switching Subsystem verbunden.

### 2.1.3 Network and Switching Subsystem (NSS)

Das Network and Switching Subsystem besteht aus dem Mobile Switching Center und den Datenbanken, welche zur Vermittlung und Diensterbringung notwendigen Daten speichern. Die Bestandteile des NSS sind im Einzelnen:

- **Mobile Switching Center (MSC)**

Ein Mobile Switching Center ist der Vermittlungsknoten des GSM-Netzes zu einem anderen Netz (analoges Fernsprechnet, ISDN, anderes Mobilfunknetz, Datennetz). Es liefert verschiedene Funktionen für die Handhabung von Abonnenten wie Registrierung, Identifikation, Handover (Abschnitt 2.2.7) und Location-Update (Abschnitt 2.2.8).

- **Home Location Register (HLR)**

Diese Datenbank ist für die Teilnehmerregistrierung und -lokalisierung

verantwortlich und existiert genau einmal. Sie ist das Heimatregister, das von jedem Teilnehmer die **IMSI** und seine **MSISDN**-Rufnummer registriert, der in seinem Netz „beheimatet“ ist. Zu den gespeicherten Daten gehört neben festen Einträgen, wie abonnierte Dienste und Berechtigungen, vor allem auch ein Verweis auf den aktuellen Aufenthaltsort einer Mobilstation (Kennziffer der aktuellen MSC, Location Area -> siehe 2.2.5). Das HLR wird zur Suche von registrierten Teilnehmern für eingehende Rufe verwendet.

- **Visited Location Register (VLR)**

Das Besucherregister verwaltet die Daten aller Mobilteilnehmer, die sich momentan im Verwaltungsbereich des zugehörigen MSC aufhalten. Das VLR beinhaltet dabei eine Kopie der Daten aus dem HLR dieser Teilnehmer. Bei einem eingehenden Anruf wird zuerst über die Rufnummer das HLR des Netzbetreibers ermittelt. Im HLR wiederum verrät die dem Teilnehmer zugehörigen Kennziffer des MSC welches VLR für diesen zuständig ist. Das VLR startet dann in der ihm bekannten Location Area des gesuchten Teilnehmers einen Aufruf zum Verbindungsaufbau. Insbesondere für das Roaming wichtig.

## 2.1.4 Operation Subsystem (OSS)

Der laufende Netzbetrieb wird mit dem Operation Subsystem gesteuert und gewartet. Steuerfunktionen des Netzes werden vom Operation and Maintenance Center (OMC) überwacht und ausgelöst. Zu den Funktionen gehören:

- Verwaltung von Teilnehmern, Endgeräten und kommerzieller Betrieb (Abrechnung)
- Sicherheitsmanagement (z.B. Verlust, Diebstahl: Sperrung des SIM)
- Netzfunktionen, Netzbetrieb und Performance Management
- Wartungsarbeit

## 2.2 GSM-Technik

### 2.2.1 Funkschnittstelle

Die *International Telecommunication Union* (ITU), welche die Vergabe der Funkfrequenzen überwacht, hat für den GSM-Standard zwei Frequenzbänder festgelegt. Für GSM-900 sind die Bereiche 890-915 MHz für den Uplink (MS zu BTS), sowie 935 - 960 MHz für den Downlink (BTS zu MS) vorgesehen. Für GSM-1800 wurden für Uplink und Downlink die Bänder 1710-1785 MHz bzw. 1805-1880 MHz bereitgestellt.

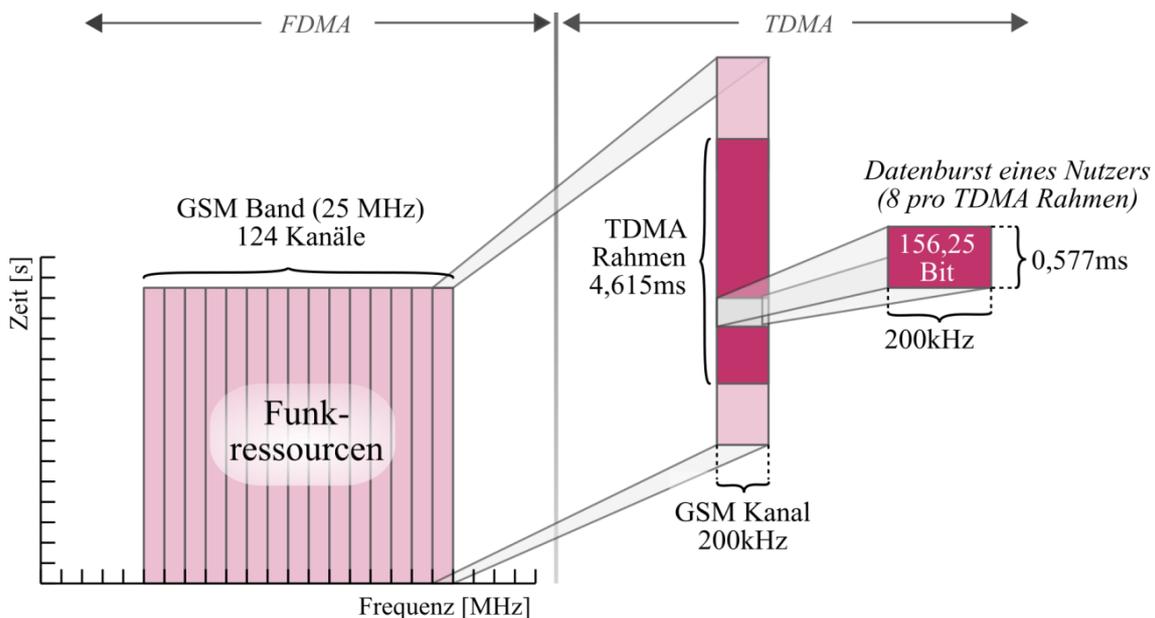
### 2.2.2 Zugriffsverfahren

Beim Funkkanal handelt es sich um ein von vielen Teilnehmern gemeinsam genutztes Übertragungsmedium. Die Mobilstationen „konkurrieren“ um die Ressource „Frequenz“, um ihre Daten übertragen zu können. Ohne eine zusätzliche Regelung des gleichzeitigen Zugriffs vieler Benutzer käme es zwangsläufig zu Kollisionen, was äußerst unerwünscht wäre. Zudem sollen möglichst viele Nutzer mit möglichst wenig Frequenzspektrum versorgt werden. Für die Koordination der

Ressourcen zwischen den Nutzern existieren die zwei **Multiplexverfahren** FDMA und TDMA:

- *Frequency Division Multiple Access (FDMA):*  
Beim FDMA wird das Frequenzband in gleich große Frequenzbereiche zerlegt, so dass die Gesprächsverbindung auf unterschiedlichen Frequenzen geführt wird. Beispielsweise wird bei GSM 900 ein Frequenzband von 25 MHz Bandbreite in 124 einzelne FDM-Kanäle mit jeweils 200 KHz Bandbreite unterteilt.
- *Time Division Multiple Access (TDMA):*  
Hierbei teilen sich alle Teilnehmer dieselbe Frequenz, benutzen aber nur einen zugewiesenen Zeitschlitz als Verbindung. TDMA ist ein sehr aufwendiges Verfahren, da es eine hochgenaue Synchronisation zwischen Sender und Empfänger benötigt. Bei GSM wird jeder der 124 Kanäle mit jeweils 200 KHz Bandbreite in 8 Zeitschlitz unterteilt.

Bei GSM wird TDMA und FDMA kombiniert eingesetzt wie in Abbildung 3 gezeigt wird:

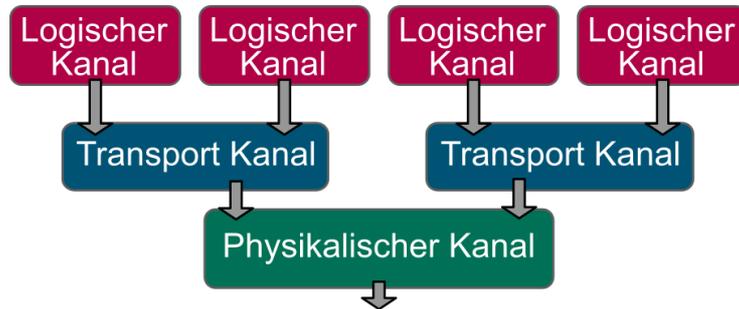


**Abbildung 3: Aufteilung der Funkressourcen auf Frequenz- (FDMA) und Zeitbasis (TDMA)**

Eine Abfolge von acht Zeitschlitz wird TDMA-Rahmen genannt und dauert 4,615 ms. Daraus folgt, dass ein Zeitschlitz ca. 0,577 ms dauert. Die pro Zeitschlitz übertragene Datenmenge wird als Daten-Burst bezeichnet. Ein solcher Burst beinhaltet im GSM-System immer 156,25 Bit (1 Bit = 3,692  $\mu$ s) – Abbildung 4. Die Datenmenge eines Bursts und deren Übertragungszeit lassen auf eine Datenrate von ca. 271 Kbit/s schließen, was durch die verwendete Modulation (GMSK) festgelegt ist.

### 2.2.3 Funkkanäle

Eine Beschreibung des Funkkanals in GSM gliedert sich in 3 Ebenen:



**Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Logischen, Transport und Physikalischen Kanälen**

- *Physikalischer Kanal*: Kennzeichnung durch die Angabe der Frequenzen und Zeitschlitzte wie in Abbildung 3 gezeigt.
- *Transportkanal*: Charakterisierung des Funkkanals hinsichtlich des Formats für die Übertragung der Informationen
- *Logischer Kanal*: Kennzeichnung durch die Art der Information (z.B. Nutzdaten, Steuerungsdaten) die er überträgt, bzw. durch die Aufgaben, die durch den logischen Kanal wahrgenommen werden.

Unser Testgerät kann zwei verschiedene Transportkanäle simulieren (s. Abb. 5):

- *Normal Burst*:

Dieser wird verwendet um Informationen von Verkehrs- und Steuerkanälen zu übertragen. Die einzelnen Bursts sind durch die sog. *Guard Period* (s. Abb. 5) getrennt (8,25 Bit bzw. 30,46  $\mu$ s). Die Tail-Bits füllen die Zeitperiode aus, in der die Sendeleistung zu Beginn und am Ende eines Bursts hoch- bzw. heruntergetastet wird und daher für eine korrekte Datenübertragung nicht zur Verfügung steht. Die Stealing-Flags geben an, ob der Burst Nutzdaten oder Signalisierung-Informationen beinhaltet. Die Trainings-Sequenz besteht aus vordefinierten Bitmustern, die für die Kanalschätzung und Synchronisation relevant sind. Es sind 8 verschiedene Trainings-Sequenzen definiert, mit denen bis zu 16 $\mu$ s ausgeglichen werden können

- *Access Burst*:

Der AB dient der Verbindungsaufnahme einer MS mit einer BTS. Der „Zugriffsburst“ wird für wahlfreien Vielfachzugriff auf dem RACH (Random Access Channel, siehe Abschnitt 2.2.4) verwendet. Wesentlich ist, dass der AB eine viel größere Guard Period als die übrigen Bursts besitzt (68,25 Bit gegenüber 8,25 Bits), um Kollisionen auf dem RACH durch nicht synchronisierte MS's zu verringern. Das ergibt eine Schutzzeit von mindestens 233  $\mu$ s. Dieser Wert ist im Standard als maximaler Schutzabstand festgelegt, und erlaubt einer MS über eine maximale Distanz von 35km mit der BTS zu kommunizieren. Die Trainingssequenz ist der BTS bekannt und ermöglicht ihr dadurch das Entdecken

des AB's. Die Datenbits beinhalten Informationen der MS.

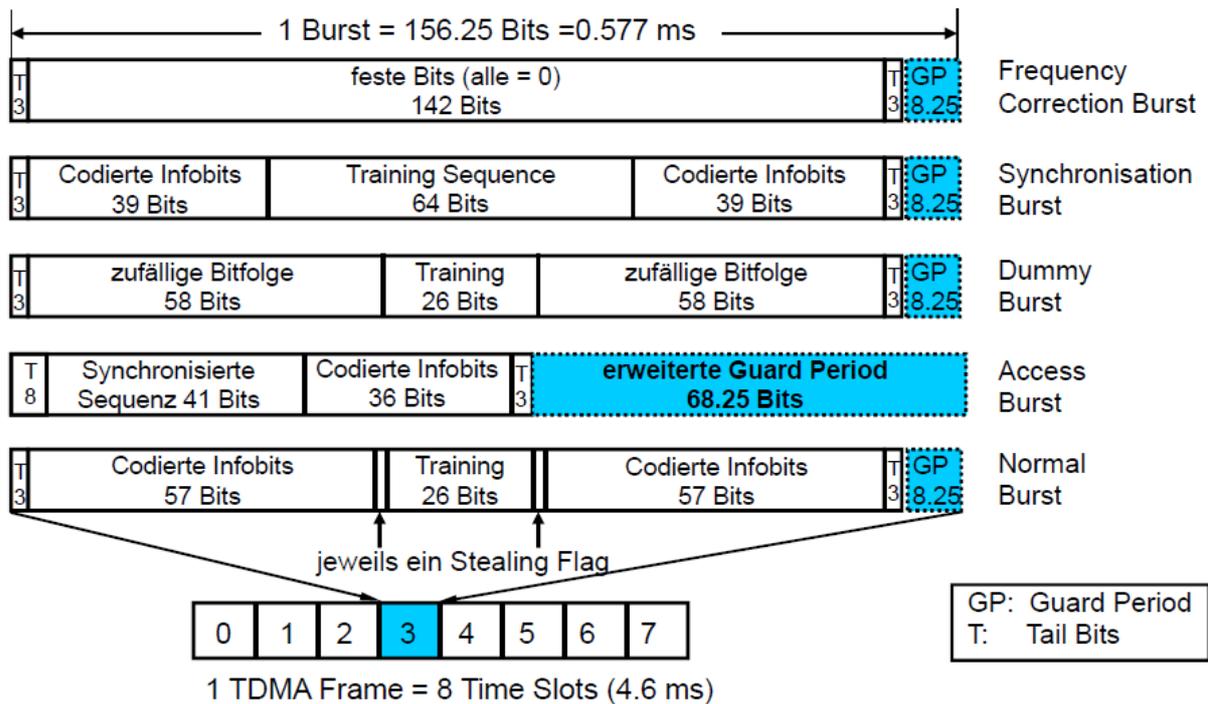


Abbildung 5: Burst bei GSM

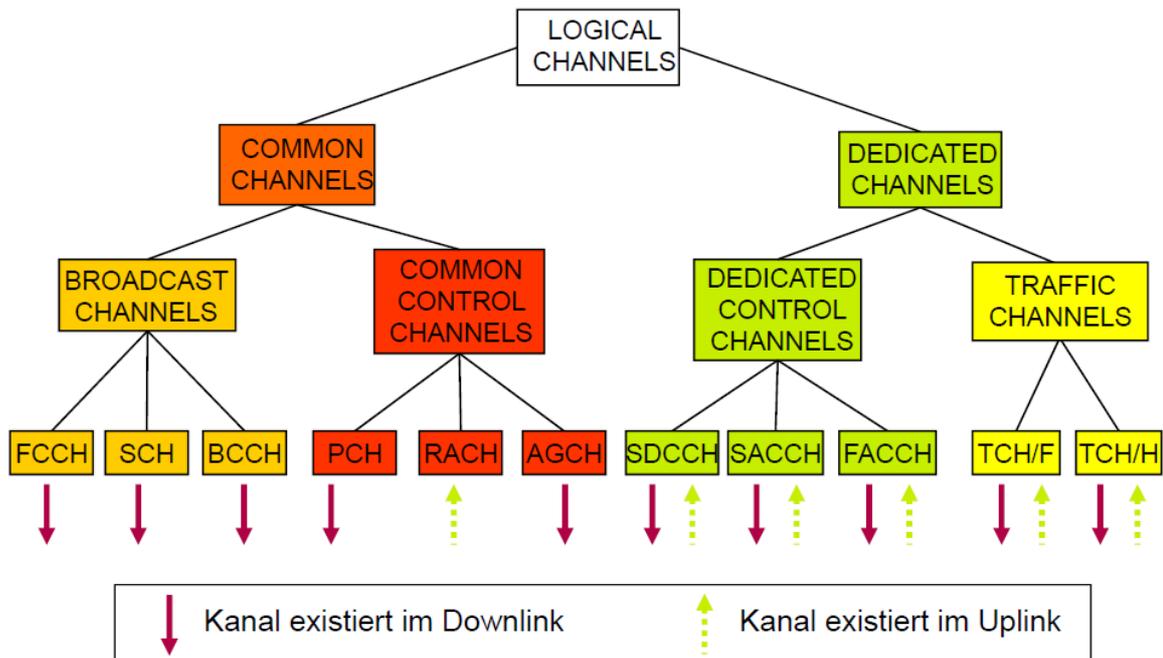
In Abbildung 5 sind neben den obengenannten *Normal Burst* und *Access Burst* noch die Struktur weiterer Bursts zu sehen.: *Frequency Correction Burst*, *Synchronisation Burst* und *Dummy Burst*. **Wozu könnten diese dienen? Bitte in Stichworten eintragen:**

Frequency Correction Burst	Synchronisation Burst	Dummy Burst

### 2.2.4 Logische Kanäle

Logische Kanäle werden in die Gruppe der dedizierten Kanäle (Dedicated Channels) und in die Gruppe der gemeinsamen Kanäle (Common Channels) unterteilt (Abbildung 6). Dedizierte Kanäle werden exklusiv für einen Nutzer eingerichtet und können nur von diesem genutzt werden. So wird z.B. ein Telefongespräch über den Dedizierten Traffic Channel (TCH) abgeführt. Dedizierte Kanäle werden nutzerspezifisch verschlüsselt und können nur von dem gewünschten Nutzer empfangen bzw. zum Senden genutzt werden.

Im Gegenzug dazu können gemeinsame Kanäle von allen Nutzern empfangen und decodiert werden bzw. für einen Sendevorgang genutzt werden. Gemeinsame Kanäle enthalten beispielsweise Steuer- und Synchronisationsdaten.



**Abbildung 6: Logische Kanäle bei GSM**

### Traffic Channel (TCH)

Der Traffic Channel überträgt Nutzerinformationen zwischen Teilnehmern, wie Sprach- und Datenpakete. Er besteht aus einem Multirahmen mit einer Länge von ca. 120 ms, zusammengesetzt aus 26 einzelnen TDMA-Rahmen. Von den 26 Rahmen werden 24 für den Nutzverkehr und einer für den *Slow Associated Control Channel* (SACCH, siehe unten) genutzt. Der übrige Rahmen ist zurzeit ungenutzt. Damit die Mobilstation nicht gleichzeitig empfangen und senden muss (einfachere Elektronik), sind der Uplink und Downlink des TCHs mit einer Periode von 3 Bursts zeitlich getrennt.

Je nach Art des Dienstes (Sprache, Kurzmitteilung, etc.) können unterschiedliche Übertragungsraten bereitgestellt werden. Bei einem *Full-Rate TCH* wird eine Bruttodatenrate von 22.8 Kbit/s angeboten, wovon 13 Kbit/s für die Sprachinformationen und der Rest zum Fehlerschutz verwendet werden. Für Daten können 12, 6 oder 3.6 Kbit/s angeboten werden.

### Control Channels

Die Control Channels werden benutzt, um Signalisierungsinformationen zwischen Basisstation und Mobilstation auszutauschen. Im inaktiven Zustand (*idle mode*) werden Signalisierungen vorgenommen um eine Verbindung aufzubauen. Während einer aktiven Verbindung (*dedicated mode*) werden unter anderen Informationen über umliegende Basisstationen ausgetauscht, die für den Handover-Prozess benötigt werden (siehe Abschnitt 2.2.7).

- *Broadcast Control Channel* (BCCH):  
ein logischer Broadcastkanal, in dem die BTS Informationen über die Zelle ausstrahlt, wie z.B. den Netzprovider oder die Frequenzbelegung.

- *Frequency Correction Channel (FCCH)* und *Synchronisation Channel (SCH)*: werden benutzt, um die Mobilstation mit der Zeitschlitzstruktur der Zelle zu synchronisieren. Es werden pro Zelle genau ein FCCH und ein SCH im Zeitschlitz 0 gesendet.
- *Random Access Channel (RACH)*  
der (Uplink-)Kanal, auf dem das Telefon der BTS seinen Verbindungswunsch mitteilt.
- *Paging Channel (PCH)*:  
wird benutzt, um eine Mobilstation über einen eingehenden Anruf zu informieren.
- *Slow associated Control Channel (SACCH)*:  
Signalisierungskanal, der jedem Übertragungskanal zugeordnet wird, um z.B. Messwerte (Uplink) oder Timing Advance Daten (Abschnitt 2.2.6) (Downlink) zu übertragen.

### 2.2.5 Fehlerschutzmechanismen

Da bei der Sprachübertragung per Funk die Bitfehlerrate sehr hoch ist wird beim GSM-System ein erheblicher Aufwand zur Sicherung der Daten gegen Übertragungsfehler betrieben.

Die maximale Nutzdatenrate bei einem GSM-Telefongespräch liegt bei 13kbit/s. Dabei werden 260 Bit pro Sprachrahmen übertragen. Diese 260 Bit werden nun durch die Kanalkodierung (d.h. durch Zugabe von Redundanz für Fehlerschutzmechanismen) sukzessive auf 456 Bits aufgestockt. Die Bruttodatenrate eines Zeitschlitzes liegt anschließend bei 22,8kbit/s.

Zuerst werden die Daten entsprechend ihrer relevanten Wichtigkeit in drei Klassen aufgeteilt. Dazu werden die 260 Bits in sehr wichtige Klasse1a-Bits (dies betrifft 50 Bits), in wichtige Klasse1b-Bits (betrifft 132 Bits) und in weniger wichtige Klasse2-Bits (betrifft 78 Bits) eingeteilt.

Im nächsten Schritt wird für die 50 sehr wichtigen Klasse1a-Bit eine 3 Bit große CRC- Prüfsumme (Cyclic Redundancy Check) berechnet und diesen 50 Bits angehängt. Die wichtigsten 185 Bit (1a + CRC + 1b Bits) werden zusammengefasst und mit vier Tail-Bits zu 189 Bits aufgefüllt. Diese werden mit Faltungscodierung ( $r=1/2$ ) zu 378 Bit umcodiert und zusammen mit den Klasse 2 Bits ergeben sich 456 Bits:

$$\begin{array}{c}
 \text{geschützt durch Faltungscode (coderate = 1/2)} \\
 \overbrace{[(50 \text{ Bit}_{1a} + 3 \text{ Bit}_{\text{CRC}}) + 132 \text{ Bit}_{1b} + 4 \text{ Bit}_{\text{tail}}] \cdot 2 + 78 \text{ Bit}} \\
 \underbrace{\hspace{10em}} \quad \underbrace{\hspace{10em}} \quad \underbrace{\hspace{10em}} \\
 \text{Klasse 1a Bits} \quad \text{Klasse 1b Bits} \quad \text{Klasse 2 bits} \\
 \text{mit CRC geschützt} \quad \quad \quad \text{nicht weiter geschützt}
 \end{array}$$

Die Frame Error Rate, die wir später kontrollieren, wird damit wie folgt berechnet:

$$\text{FER} = \frac{\text{Blöcke mit inkorrektem CRC}}{\text{Gesamtzahl gesendeter Blöcke}} \times 100 [\%]$$

### 2.2.6 Timing Advance

Die Funkwellen zwischen Endgerät und Basisstation haben eine distanzabhängige Ausbreitungsverzögerung. Beim Senden von Bursts muss nun eine Zeit-Synchronisation stattfinden, so dass die Datenpakete im korrekten Empfangszeitzeitschlitz am Empfänger ankommen.

Der TA-Wert gibt die Anzahl der Bit-Zeiten ( $3,692 \mu\text{s}$ ) an, die der Sendeburst "vorverlegt" werden muss, damit er im korrekten Zeitschlitz des Empfängers eintrifft. Der Wert wird von der BTS ermittelt und dem Mobiltelefon vorgegeben. Die BTS misst dabei die Paketumlaufzeit durch die Funkwellenausbreitung (*Round Trip Propagation Delay*) in Vielfachen der Dauer eines Bits.

Der Wert TA01 entspricht bei reflexionsfreiem Übertragungsweg einer ungefähren Entfernung von 554 m zur Basisstation. *Timing Advance* kann Werte von 0-63 annehmen und entspricht damit Werten von 0 -  $233 \mu\text{s}$ . Der oberste Wert ( $233 \mu\text{s}$ ) ist das maximale Schutzintervall für den Round-Trip-Delay (BTS->MS->BTS) welcher im Standard festgelegt ist und führt zu einer maximalen Größe einer Zelle von 35km.

Mit dem gemessenen TA-Wert kann man auch die Entfernung von der MS zur BTS abschätzen. Die Genauigkeit liegt bei etwa 1km, da die Messung einen maximalen Fehler von  $\pm 0,5$  Bit hat.

$$d = \frac{\text{TA} \times c \times t_{\text{bit}}}{2} = \frac{\text{TA} \times 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 3,692 \times 10^{-6} \text{s}}{2} = \text{TA} \times 554 \text{m}$$

In Abbildung 7 ist noch einmal zu sehen, welchen Einfluss Timing Advance hat wie dadurch erreicht wird die vorgegebenen Zeitschlitz einzuhalten.

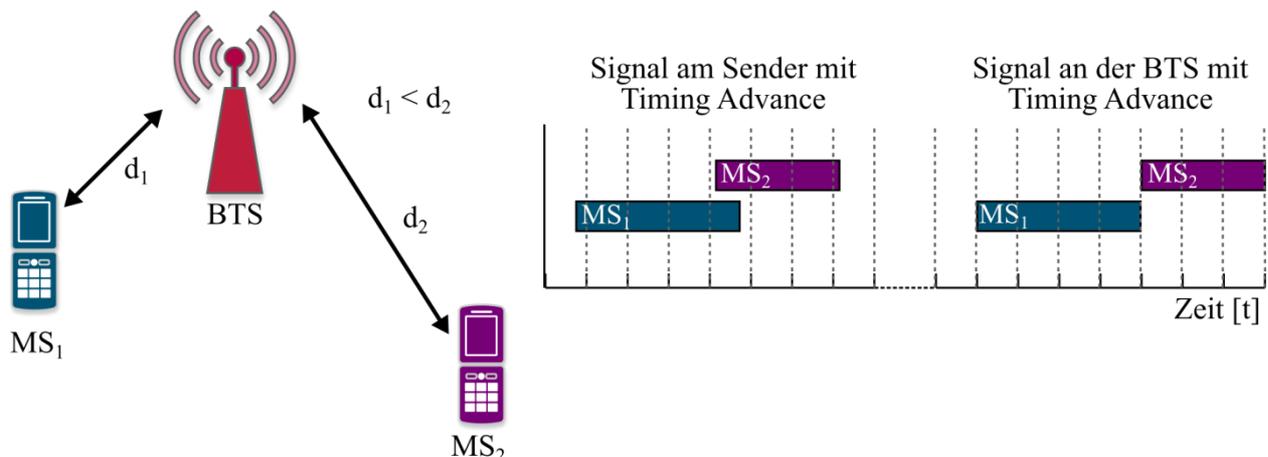


Abbildung 7: Anpassung der Sendezeiten bei Timing Advance

### 2.2.7 Handover

Ein Handover (HO) ist eine automatische Gesprächsübergabe zwischen verschiedenen Funkzellen. Ein Handover wird ausgelöst, um einerseits die Verbindungsqualität zu erhöhen oder andererseits die Netzlast auf die Zellen gleichmäßig zu verteilen, um die Güte des gesamten Netzes zu optimieren.

Man unterscheidet zwischen:

- Intracell-HO:  
Aus administrativen Gründen oder auch wegen der Kanalqualität bekommt eine MS innerhalb derselben Zelle einen neuen Kanal zugewiesen. Dies wird lokal vom BSC entschieden und durchgeführt
- Intercell-HO:  
Die Verbindung einer MS wird über Zellgrenze hinweg einer neuen BTS zugewiesen. Diese Entscheidung wird aufgrund von Messdaten der MS/BSC getroffen. Meist erfolgt der HO dann, wenn eine hohe Bitfehlerrate aufgrund schwacher Empfangsfeldstärke und schlechter Kanalqualität festgestellt wird (z.B. am Zellrand).

### 2.2.8 Location-Area & Location-Update

In einer Location-Area werden mehreren Zellen logisch als Gruppe zusammengefasst, die man als eine geographische Einheit im VLR (siehe Abschnitt 2.1.3) verwaltet. Beim Suchen eines Mobilfunkteilnehmers (bspw. beim Übermitteln einer SMS oder wenn ein Anruf vorliegt) müssen nicht alle Zellen sondern nur der Verbund der Zellen des Netzwerkproviders nach dem Teilnehmer durchsucht werden, in dessen Location-Area sich der Teilnehmer befindet. Dies spart erheblichen Signalisierungsaufwand.

Man spricht von einem Location-Update, wenn der Teilnehmer die Location-Area wechselt. Das Location-Update entspricht einer Aktualisierung des Aufenthaltsortes im VLR bzw. HLR. Manchmal wird diese Prozedur auch in einem sich periodisch wiederholenden Zeitintervall durchgeführt (etwa 2 Stunden; abhängig von den vom Netzbetreiber gewählten Einstellungen).

Beim Location Update startet eine MS jeweils eine Registrierungsprozedur. Das zuständige MSC leitet dabei die Identität der MS und ihre momentane **Local Area Identity (LAI)** an das VLR weiter. Das VLR macht eine Kopie von diesen Daten, trägt diese in seine Datenbank ein und gibt die Informationen anschließend weiter an das HLR. Das HLR wiederum speichert diese Informationen, um die Suche nach Teilnehmern für eingehende Anrufe zu ermöglichen.

### 3 Versuchsaufbau

Für den Versuch benutzen wir das Messgerät CMD-55 (Digital Radiocommunication Tester) von Rohde & Schwarz. Es verfügt über alle Elemente zur Ausführung von wichtigen GSM (900, 1800 und 1900) Messungen. Hiermit ist es möglich, das Mobiltelefon auf **korrekte Sendeleistung, Zeitschlitzdynamik, Verbindungsaufbau, Spektrumsanalysen und Bitfehlerraten** hin zu überprüfen. Mit dem CMD-55 ist eine Messempfindlichkeit von  $-10$  bis  $+37$  dBm und eine Ausgangsleistung von  $-37$ dBm (vgl. Anhang A) gegeben.

Der Versuch (Abbildung 8) stellt ein komplettes *Base Station Subsystem* dar. Es enthält alle Übermittlungs- und Funkübertragungseinrichtungen, die zur Verbindung der Mobilteilnehmer mit dem *Network and Switching Subsystem* notwendig sind. Eine detaillierte Beschreibung der Ein- und Ausgänge des Testgeräts finden sie im Anhang A.2.



Abbildung 8: Die verwendeten Labormessgeräte CMD-55 und CMU-Z11

Es wird eine abgeschirmte Messkammer verwendet, um äußere Einflüsse zu vermeiden. Die Messkammer CMU-Z11 von Rohde & Schwarz ist mit einer empfindlichen Antenne und einer eingebauten Handyhalterung versehen. Die Innenraumdämpfung zwischen Handy- und Messantenne beträgt ca. 7dB. Die Dämpfung des HF-Kabels beträgt ca. 0,2dB.

Für die Versuche steht ein Mobiltelefon als Referenzgerät zur Verfügung (Alcatel). Dieses ist mit einer speziellen SIM-Karte ausgestattet, welches einen Schleifenbetrieb für den Versuch 3 (Bitfehlermessung) zulässt. Für die ersten beiden Versuche können auch eigene Mobiltelefone verwendet werden.

### 4 Versuchsvorbereitung

Bevor sie beginnen, sorgen sie bitte dafür, dass bei den Messvorgängen das HF-Kabel richtig angeschlossen und verschraubt und die Messkammer richtig geschlossen ist, um Fremdeinwirkung zu vermeiden. Achten Sie auch darauf, dass der EXT. ATTENUATION-



Abbildung 9

Wert auf ca. 8 dB eingestellt ist, um die Signaldämpfung durch Luft von Sender- zu Empfänger in der Messkammer zu berücksichtigen. Für die Einstellung dafür drücken sie bitte den Softkey **EXT. ATT.**

*Hinweis:*

Zum Wechseln des Netzwerkes zwischen GSM 900 und GSM 1800 betätigen Sie **NETWORK TYPE** im Hauptmenü.

## 4.1 MANUAL TEST

Nach der Auswahl von „Manual Test“ wechselt der CMD die Anzeige und sendet nach einigen Sekunden einen Control Channel. Dieser Kanal überträgt u.a. einen BCCH. Die Informationen die vom CMD auf dem Control Channel übertragen werden, fordern das Mobiltelefon auf nach dem Einschalten eine „*Location Update*“ – Prozedur durchzuführen. Hiermit wird die Basisstation informiert, dass jetzt ein bestimmtes Mobiltelefon eingeschaltet wurde und bereit ist, Gespräche durchzuführen.

Falls das Gerät kein Location-Update ausführt, gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder schalten Sie das Handy aus und wieder ein, damit sich das Gerät neu in unsere simulierte Zelle einloggen kann oder Sie können ein Location-Update erzwingen, indem sie in dem Untermenü **NETWORK** den Wert für **LOC. AREA** verändern. Mit dem Softkey **↑MENU UP** geht es wieder zurück zum Bildschirm **MOBILE TEST**.

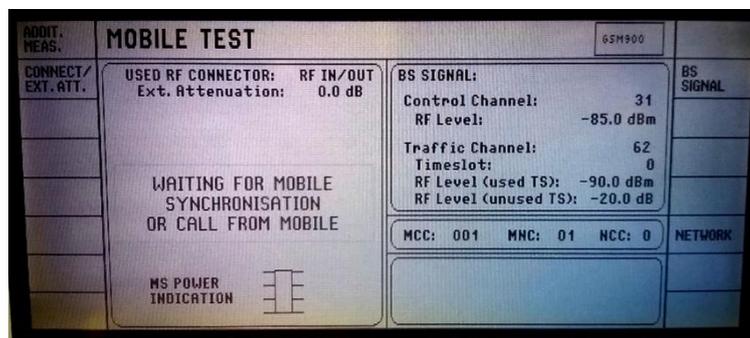


Abbildung 10

Hat das Gerät sich erfolgreich in die Zelle eingeloggt, werden ihnen die gerätespezifischen Daten wie IMSI, IMEI (siehe oben) und Power Class angezeigt. Jedes Gerät gehört zu einer bestimmten Leistungsklasse (Power Class, kurz PC), die die maximale Ausgangsleistung des Gerätes festlegt (vgl. Anhang A.1):

- PC 1=43 dBm
- PC 2=39 dBm
- PC 3=37 dBm
- PC 4=33 dBm
- PC 5=29 dBm.

## 4.2 CALL ESTABLISHED

Bauen Sie jetzt bitte eine Verbindung auf, indem Sie den Softkey **CALL TO MOBILE** drücken und den Anruf abnehmen.

Nach erfolgreichem Verbindungsaufbau befinden Sie sich nun im **CALL ESTABLISHED** Menü. Von hier aus werden die meisten Tests mit dem CMD- 55 durchgeführt. Hier sehen Sie auch die wichtigsten Messwerte des Endgeräts. Der momentan eingestellte RF-Kanal und der verwendete Zeitschlitz werden zusammen mit den Sendermessungen des Phasen- und Frequenzfehlers angezeigt. Sollte ein Messergebnis außerhalb der Toleranz liegen, wird dies sofort farblich hervorgehoben. Ebenfalls werden die vom Mobiltelefon gemeldete (Reported) sowie die gemessene Durchschnittsleistung (Meas. Avg.) angezeigt.

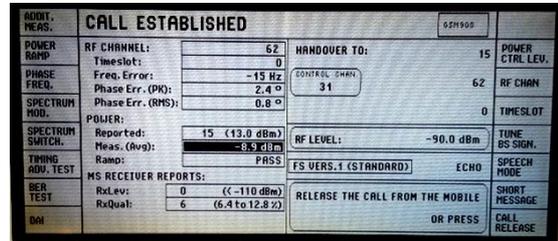


Abbildung 11

### MS Receiver Reports

GSM-Mobiltelefone messen zyklisch die Signalstärke- und Qualität mehrerer nahe gelegener Basisstationen. Die Messwerte werden in den so genannten „Measurement Reports“ regelmäßig zur aktiven Basisstation gesendet. Die wichtigsten Werte sind die der gerade für das Gespräch benutzten Basisstationen. Die Tabelle rechts zeigt die Klasseneinteilungen nach der GSM-Spezifikation.

Wert von RXLev	entsprechende Signalstärke
63	größer als -48 dBm
62	-49 dBm bis -48 dBm
61	-48 dBm bis -47 dBm
...	...
02	-109 dBm bis -108 dBm
01	-110 dBm bis -109 dBm
0	kleiner als 110 dBm

Wert von RXQual	Signalempfangsqualität
0	BER < 0,2%
1	0,2% < BER < 0,4%
2	0,4% < BER < 0,8%
3	0,8% < BER < 1,6%
4	1,6% < BER < 3,2%
5	3,2% < BER < 6,4%
6	6,4% < BER < 12,8%
7	12,8% < BER

## 5 Versuchsdurchführung

### 5.1 Phasen- und Frequenzfehler

Die GSM-Mobiltelefone müssen sich auf die Sendefrequenz der Basisstation synchronisieren. Der CMD-55 misst deshalb den Frequenzfehler und nicht die absolute Sendefrequenz. Der Phasenfehler wird ermittelt, indem der erwartete und der gemessene HF-Phasenverlauf verglichen werden. GSM spezifiziert dabei den Maximal- (Peak) als auch den Durchschnittsfehler (RMS, root-mean-square) je Burst.

Der GSM Standard legt dafür folgende Toleranzen fest:

- Frequenzfehler:  $\pm 115$  Hz bei GSM-900 und  $\pm 230$  Hz bei GSM-1800
- RMS Phasenfehler: maximal  $5^\circ$  Abweichung
- Peak Phasenfehler: maximal  $20^\circ$  Abweichung

Im Menü **PHASE FREQ** werden der aktuelle, der durchschnittliche und der maximale Phasen- und der Frequenzfehler, bezogen auf eine spezifizierte Anzahl von Bursts, dargestellt. Diese Anzahl kann im Konfigurationsmenü (Softkey **CONFIG**) der Phasen- und Frequenzfehlermessung eingestellt werden. Die grafische Anzeige kann sowohl im Oszilloskopbetrieb für den Phasenfehler als auch im Balkendiagramm erfolgen.

Im Konfigurationsmenü ist es möglich verschiedene Messmöglichkeiten auszuwählen:

- *Continuously*: Die Messung läuft weiter, unabhängig davon, ob die Toleranzen eingehalten werden.
- *Stop*: Der Test wird angehalten, sobald eine Messung außerhalb des Toleranzbereiches liegt
- *Single Shot*: Die Messung wird genau noch einmal wiederholt, sobald der Softkey **PHASE FREQ.** gedrückt wird.

**Messen Sie für die ausgewählten Mobilfontypen den Frequenzfehler, RMS-Phasenfehler und Peak-Phasenfehler jeweils für GSM 900 und GSM 1800. Notieren Sie die Messwerte in Tabelle 6.1 und entscheiden Sie ob die Mobiltelefone dem GSM-Standard entsprechen. Stellen sie dabei eine ausreichend große Anzahl von Bursts ein (CONFIG - NO. OF BURSTS -  $\uparrow$  MENU UP).**

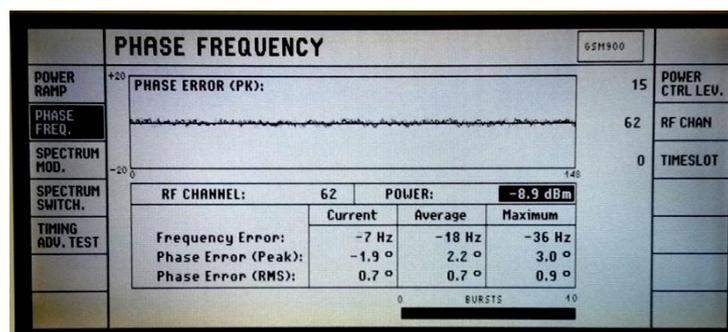


Abbildung 12

## 5.2 Power Ramp - Messung

Wie in Abschnitt 2.2.1 erläutert wurde, teilen sich mehrere Nutzer unter Verwendung von TDMA einen Frequenzbereich. Um Interferenzstörungen zu vermeiden, wird die Sendeleistung eines Nutzers während seiner inaktiven Phase heruntergefahren. Zum Beginn "seiner" Zeitschlitzes muss dann die Sendeleistung wieder hochgetaktet werden. Dies kann nicht in unendlich kleiner Zeit geschehen (siehe Abbildung 13). Da sich zwangsläufig die Zeitbereiche überschneiden, wurden einerseits die Tail-Bits als Schutz eingefügt, andererseits wurden Grenzen definiert die während des

Erhöhen bzw. Erniedrigen der Sendeleistung eingehalten werden müssen. Dieser Versuch untersucht das Verhalten des Mobiltelefons in dessen Zeitschlitz.

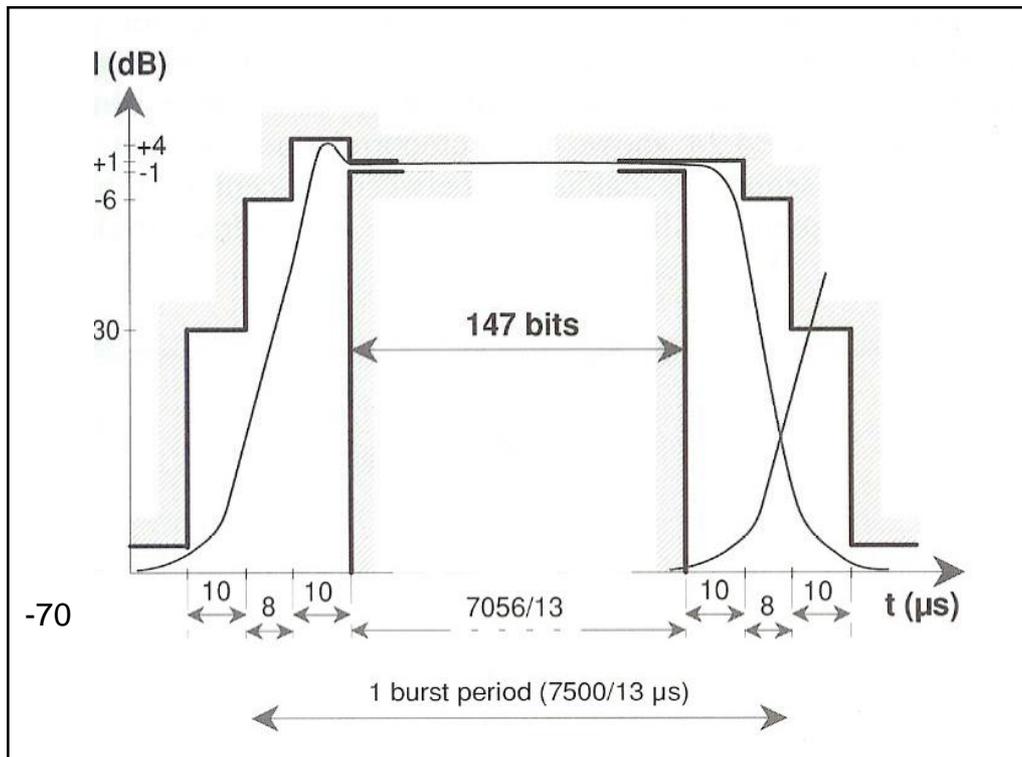


Abbildung 13

Drücken sie bitte den Softkey **POWER RAMP** um die Kurve anzuzeigen.

Die Leistungsrampe (Abbildung 13) wird mit einer Dynamik von ca. 75 dB gemessen und dargestellt. Die Toleranzen entsprechen den Werten, die in den GSM-Spezifikationen definiert sind. Die grafisch dargestellte Toleranzmaske darf von der Messkurve nicht unter- oder überschritten werden.

In dem Untermenü **DISPLAY RANGE**, kann mit Hilfe des Rades der angezeigte Ausschnitt verändert werden. Der Leistungsverlauf über der Zeit kann über mehrere Bursts gemittelt gemessen werden. Wählen sie dazu im Untermenü **DISPLAY MODE** den Modus **MAX**. (Maximum). Wahlweise können auch die minimalen oder durchschnittlichen Ergebnisse angezeigt werden (**MIN/AVG HOLD**).

Im Textteil finden Sie den Frequenzkanal, auf dem die Messung erfolgt, sowie die gemessene Zeit (Auflösung 0,25 Bit), mit der die Mobile Station zu spät (positiv) oder zu früh (negativ) antwortet, angezeigt (**Timing Error**). **MARKER** zeigt den Wert für die aktuelle Cursorposition (schwarzes Dreieck) an. Bei **BURSTS OUT OF TOL.** wird der Prozentsatz der Bursts angezeigt, die während des Mittelungszeitraumes außerhalb der Toleranz lagen.

**Kontrollieren Sie nun die Messkurve, ob diese im „Toleranzschlauch“ liegt. Notieren Sie die durchschnittliche Burst Power und die Zeitverzögerung des Signals. Schalten Sie auf **DISPLAY MODE: MAXIMUM** und betrachten Sie die **RISING EDGE**. Überprüfen Sie, ob die Messkurve innerhalb der **Guard Period-Zeit** wirklich unter **-70dB** absinkt. Ändern sie den **BURST MODE****

(links oben) zu **ACCESS BURST** und vergleichen Sie die Werte.

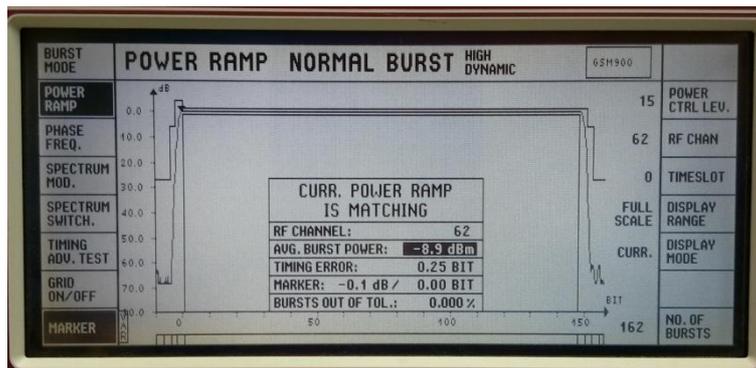


Abbildung 14

### 5.3 Timing Advance

Wie in Abschnitt 2.2.4 bereits erklärt wird beim Timing Advance die distanzabhängige Zeitverzögerung gemessen, und anschließend für die Zeitsynchronisation kompensiert. In diesem Versuch kann mit Hilfe des Drehreglers der TA-Wert verändert werden (nominal). Die Basisstation gibt diese Information der Mobilstation weiter und diese versucht es auszugleichen (actual). Dabei kann es zu Fehlern kommen, die man als **Timing Advance Error** ablesen kann.

**Drücken Sie den Softkey TIMING ADVANCE.**

**Messen Sie für verschiedene Bits die Timing Advance Error Rate und notieren Sie diese in Tabelle 6.1.**

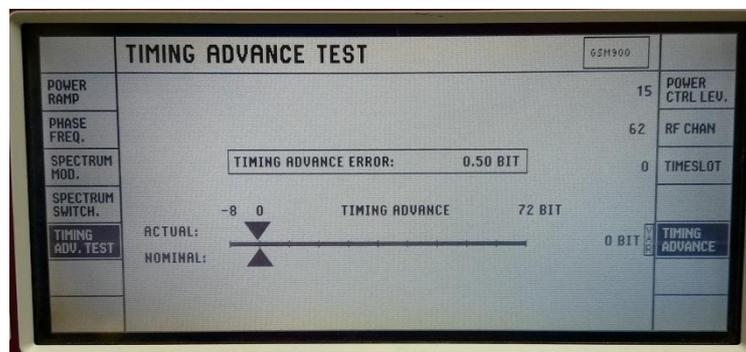


Abbildung 15

### 5.4 Bitfehlerratenmessung

Die Sprachbits die im GSM-System übertragen werden, sind, wie im Kapitel 2.2.3 beschrieben, in Klassen unterteilt. Klasse II Bits haben keinen Fehlerschutz und erzeugen deshalb auch rasch Übertragungsfehler. Klasse Ib Bits besitzen einen gewissen Fehlerschutz und die Klasse Ia Bits sind sehr gut geschützt. Die Bits werden in Sprachrahmen (Frames) von 260 Bits (ohne Fehlerschutzbits) übertragen. Das Mobiltelefon selbst kann Fehler der Klasse Ia Bits erkennen, damit einen kompletten Sprachrahmen für fehlerhaft, folglich für ungültig erklären, und dies dem CMD mitteilen. Das Verhältnis von guten zu ungültigen Frames wird FER = Frame Error Rate (Rahmenfehlerrate) genannt.

In diesem Praktikumsversuch wird eine spezielle Test-SIM-Karte von Rhode&Schwarz verwendet, um die Empfindlichkeit (BER = Bit Error Rate) in einem Schleifenbetrieb zu gewährleisten. In dieser Betriebsart werden die vom CMD gesendeten Bits vom Mobiltelefon empfangen und sofort zurückgesendet. Der CMD kann damit die Bits vergleichen und das Verhältnis aus korrekten zu fehlerhaften Bits in Prozent berechnen (siehe Tabelle A.1).

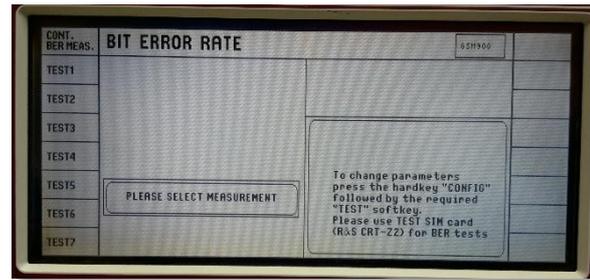


Abbildung 16

Unser vorgefertigter Testablauf (TEST 6) sendet eine bestimmte Anzahl von Frames mit einer bestimmten Anzahl von Bits der verschiedenen Klassen. Die Bits entsprechen den „Samples“, die gesendet werden sollen. Es kann bei einem bestimmten (niedrigen) HF-Pegel akzeptiert werden, dass eine bestimmte Anzahl von Frames oder Bits fehlerhaft sind. Diese fehlerhaften Samples nennt man „Events“.

Im Vergleich zu TEST 6 benutzen sie bitte den Continuous Test **CONT BER MEAS.**, stellen sie dabei eine möglichst große Anzahl von Frames (**AVERAGE**) ein. Der Messmodus **MEAS. MODE** sollte auf RBER eingestellt sein.

**Drücken Sie jetzt bitte den Softkey **BER TEST** und schalten Sie ins Menü **SING. MEAS.** Zur Messung lassen wir hier mit den verschiedenen Dämpfungsgliedern den voreingestellten TEST 6 ablaufen.**

**Vergleichen Sie die zugehörigen RxLev und RxQual aus dem Hauptmenü (2x **MENU UP**) mit der Tabelle aus Kap. 4.2. Notieren Sie diese in der Tabelle 6.2.**

**Um verschiedene Sendeleistungen zu testen, passen Sie bitte die jeweiligen Werte gegeben in Tabelle 6.2 an. Dazu drücken Sie die Taste **CONFIG**, dann wählen Sie dort den TEST 6 aus und stellen die jeweilige Sendeleistung ein (used Timeslot). Mit **MENU UP** gelangen Sie wieder in den Test zurück.**

**Notieren sie die Bitfehler-Messwerte für das gegebene Mobiltelefon für GSM 900 und GSM 1800. Tragen Sie diese in die Tabelle 6.2 ein und erstellen Sie daraus ein Diagramm.**

## 6 Messprotokolle

### 6.1 Phasen- Frequenzfehler

Mobiltelefon 1:			
GSM 900		GSM 1800	
RMS Phase [°]		RMS Phase [°]	
Peak Phase [°]		Peak Phase [°]	
Frequenzfehler [Hz]		Frequenzfehler [Hz]	
Timing Advance Error		Timing Advance Error	

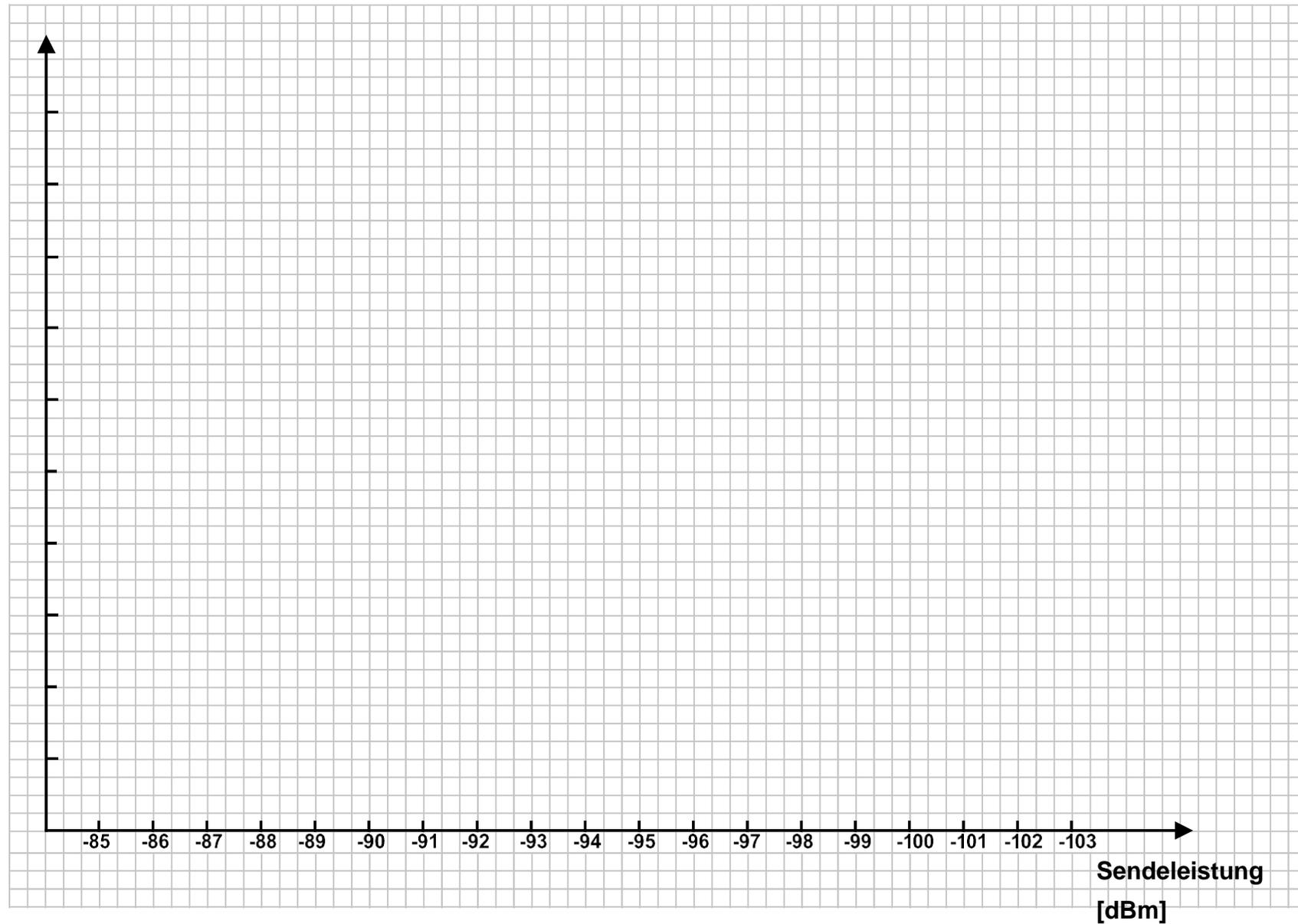
Mobiltelefon 2:			
GSM 900		GSM 1800	
RMS Phase [°]		RMS Phase [°]	
Peak Phase [°]		Peak Phase [°]	
Frequenzfehler [Hz]		Frequenzfehler [Hz]	
Timing Advance Error		Timing Advance Error	

Mobiltelefon 3:			
GSM 900		GSM 1800	
RMS Phase [°]		RMS Phase [°]	
Peak Phase [°]		Peak Phase [°]	
Frequenzfehler [Hz]		Frequenzfehler [Hz]	
Timing Advance Error		Timing Advance Error	

## 6.2 Bitfehlerratenmessung für GSM-900 und GSM-1800

Sendeleistung der Basisstation	BER Class II [%]		BER Class Ib [%]		FER [%]		RxLe v		RxQual	
	GSM-900	GSM-1800	GSM-900	GSM-1800	GSM-900	GSM-1800	GSM-900	GSM-1800	GSM-900	GSM-1800
-85										
-86										
-87										
-88										
-89										
-90										
-91										
-92										
-93										
-94										
-95										
-96										
-97										
-98										
-99										
-100										
-101										
-102										
-103										

Bitte als ganze Din A4 Seite ausdrucken und mitbringen.



Bitte als ganze Din A4 Seite ausdrucken und mitbringen.

## 7 Anhang

### 7.1 Umrechnungstabellen

**Pegel (Level):** logarithmische Verhältnisses zweier Leistungen.

$$L[\text{dBm}] = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{1\text{mW}}\right)$$

**Leistung (Power):**

$$P[\text{mW}] = 10^{L[\text{dBm}]/10}$$

**Umrechnungstabelle zwischen Powercontrol Level / dBm / mW (ETSI GSM05.05)**

PL GSM						19		18		17	
Pegel [dBm]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Leistung [mW]	1,0	1,3	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6,3	8	10
PL GSM	16		15		14		13		12		11
Pegel [dBm]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Leistung [mW]	13	16	20	25	32	40	50	63	79	100	126
PL GSM		10		9		8		7		6	
Pegel [dBm]	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Leistung [mW]	158	200	251	316	398	501	631	794	1000	1260	1580
PL GSM	5		4		3		2-0				
Pegel [dBm]	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
Leistung [mW]	2	2,51	3,16	3,98	5	6,31	8	10	12	15,8	20

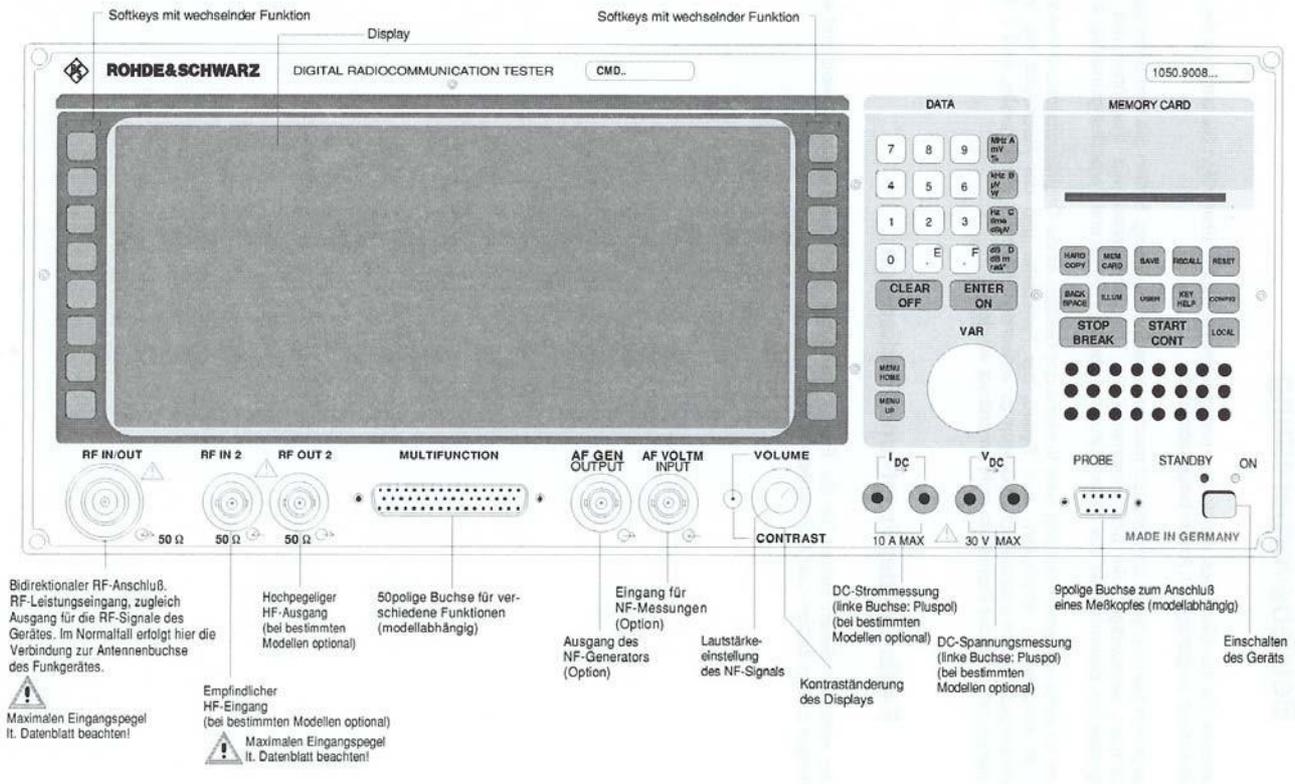
**Umrechnungstabelle QF / QS nach % Bitfehler (ETSI GSM05.08)**

QF/QS	0	1	2	3	4	5	6	7
Bitfehler	< 0,2 %	< 0,4 %	< 0,8 %	< 1,6 %	< 3,2 %	< 6,4 %	< 12,8 %	> 12,8 %

**Umrechnungstabelle Power Class / max. Sendeleistung (ETSI GSM05.05)**

Power Class	1	2	3	4	5	6	7	8
GSM MS		8 W	5 W	2 W	0,8 W			
GSM BTS (W)	320 - 640	160 - 320	80 - 160	40 - 80	20 - 40	10 - 20	5 - 10	2,5 - 5

## 7.2 Communication Mobile Digital Tester 55



### Verwendete Einstellungen

Hauptmenü: EXT. ATT.: ca. 8 dB (Dämpfung des Kabels) Controll Channel: RF Level -80dBm  
 Traffic Channel: RF Level -90 dBm (used Timeslot)  
 Traffic Channel: RF Level -20 dB (unused Timeslot)

### 7.3 Quellen

- B. Walke: *Mobilfunknetze und ihre Protokolle*, Band 1, Teubner 2000
- www.nobbi.com
- C. Lüders: *Mobilfunksysteme*, Vogel-Verlag 2001
- Prof. Kürner: Vorlesungsskript "Grundlagen des Mobilfunks"