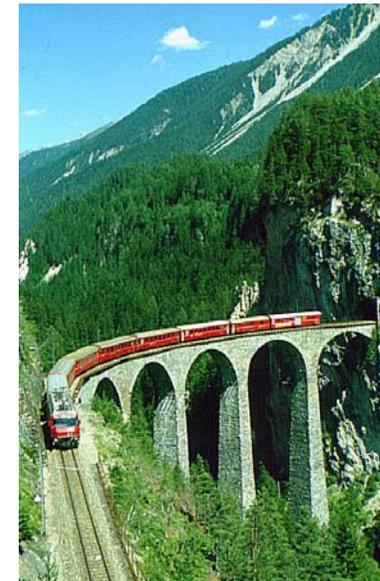


Embedded Systems und Bussysteme zur digitalen  
Steuerung von Modelleisenbahnen – oder, wie viele  
Mikro´ s werden heute in modernen  
Modellbahnsteuerungen eigentlich verbaut?

Dr.-Ing. Wolfgang Kabatzke

Hansasstraße 9  
21 502 Geesthacht



# Ziel des Hobbys Modelleisenbahn: Vom Vorbild zum Modell

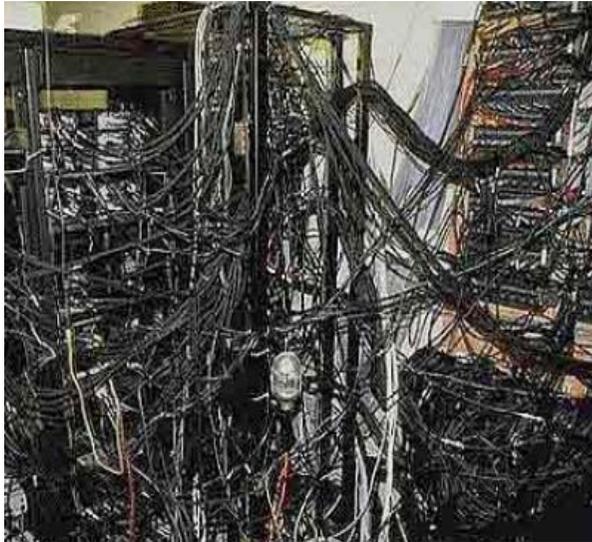


# Warum Digitaltechnik in und an der Modelleisenbahn?

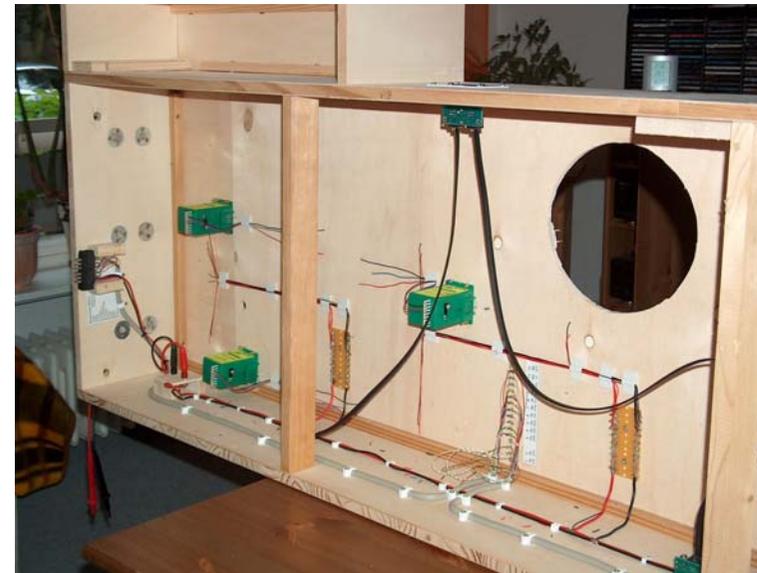
- Vereinfachung des Fahrbetriebes
  - keine Blockstrecken nötig (kein Zersägen der Gleise 😊)
  - mehrere Loks auf demselben Gleis
  - eindeutige Zuordnung der Fahrregler zu den Loks (kein Chaos 😊)
- verbesserte Fahreigenschaften
  - Anpassung an jeweilige lokomotivspezifische Eigenheiten
  - Vorspann- und Schiebebetrieb ohne Probleme
- Optimaler Aufbau und Betrieb
  - kein Kabelsalat 😊
  - Betrieb mit mehreren Personen ist leicht realisierbar



# Vom Kabelchaos zur „digitalen Ordnung“ (1)



So???

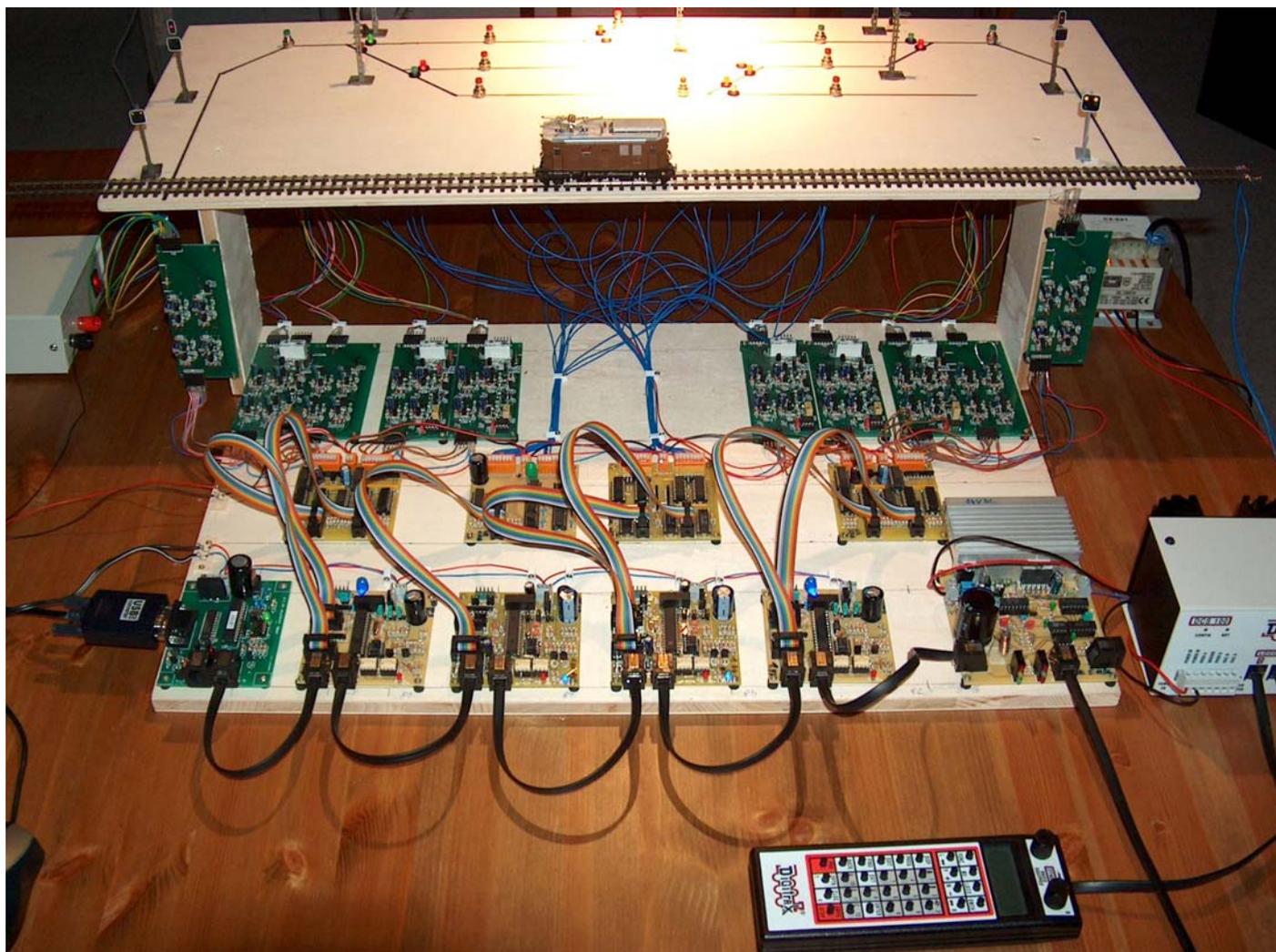


oder besser

So!!!



## Vom Kabelchaos zur „digitalen Ordnung“ (2)



# Warum digitaler Fahrbetrieb? (1)

## „klassischer“ Betrieb

- mit Gleichstrom
- (oder Wechselstrom)

- **Vorteile:**

- Preiswerte Lösung
- Einsteigerlösung

- **Nachteile:**

- Nur 2 Funktionen des Fahrzeuges werden gesteuert: die Motordrehzahl über die Spannung und die Drehrichtung über die Polarität der angelegten Spannung.
- Die Funktion Beleuchtung wird zwangsläufig mit der Motordrehzahl gekoppelt
- Es kann nur ein Fahrzeug autark pro Stromkreis betrieben werden, weil Polarität und Fahrtrichtung fest verkoppelt sind
- Hoher Verdrahtungsaufwand bei Mehrlokbetrieb



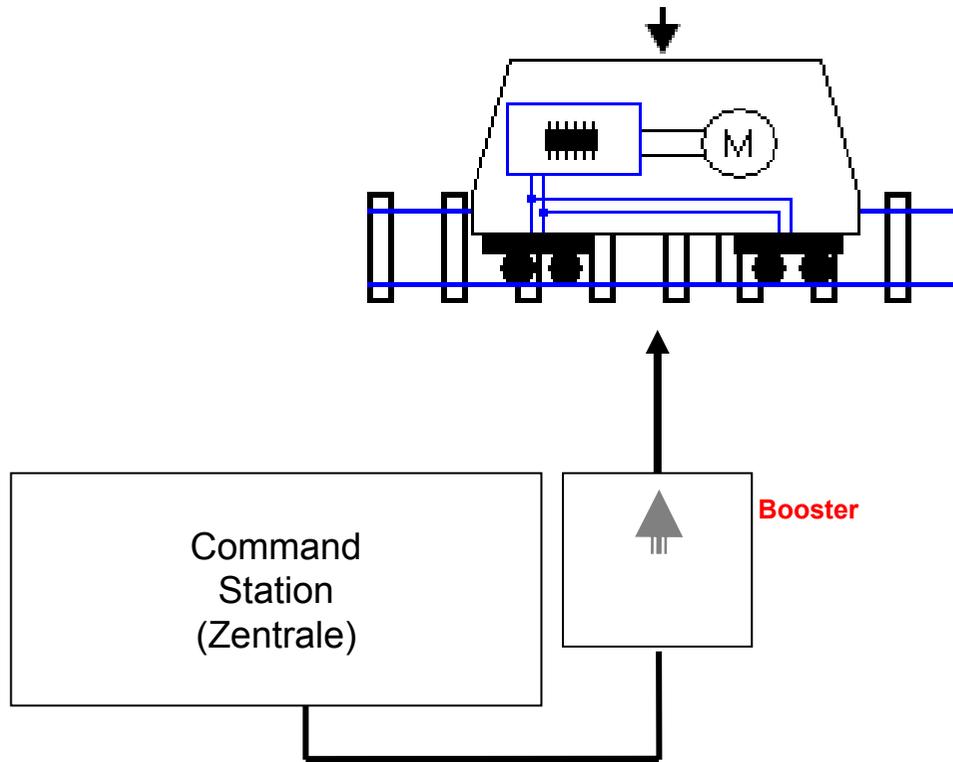
## Warum digitaler Fahrbetrieb? (2)

### Die digitale Mehrzugsteuerung DCC (Digital Command Control)

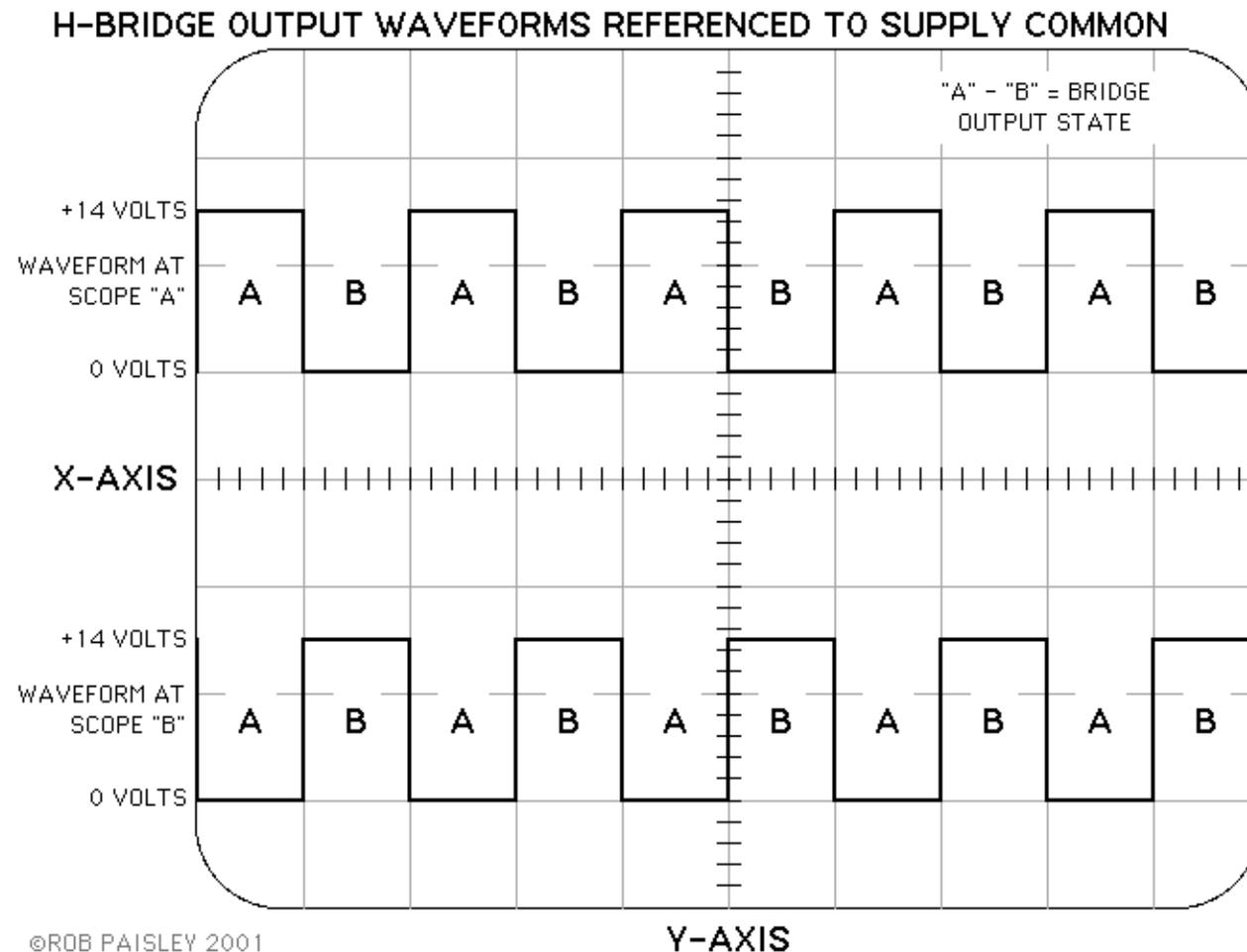
- **Vorteile:**
  - Mehrere Lokomotiven sind unabhängig voneinander steuerbar
  - Konstante Zugbeleuchtung, gleichbleibende Helligkeit
  - Bessere Fahreigenschaften der Lokomotiven, auch wenn der Fahrzeugdecoder nicht über eine Drehzahlregelung verfügt.
  - Simulation der Zugmasse (Anfahr- / Bremsrampen)
  - Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit auf maßstäbliche Werte
- **Nachteile:**
  - Preis
  - Anpassungen für den Analogbetrieb müssen vorher mit eingeplant werden



# Minimalversion einer DCC-Modellbahnsteuerung – digitaler Fahrbetrieb



# DCC Signalform – „Wechselspannung“

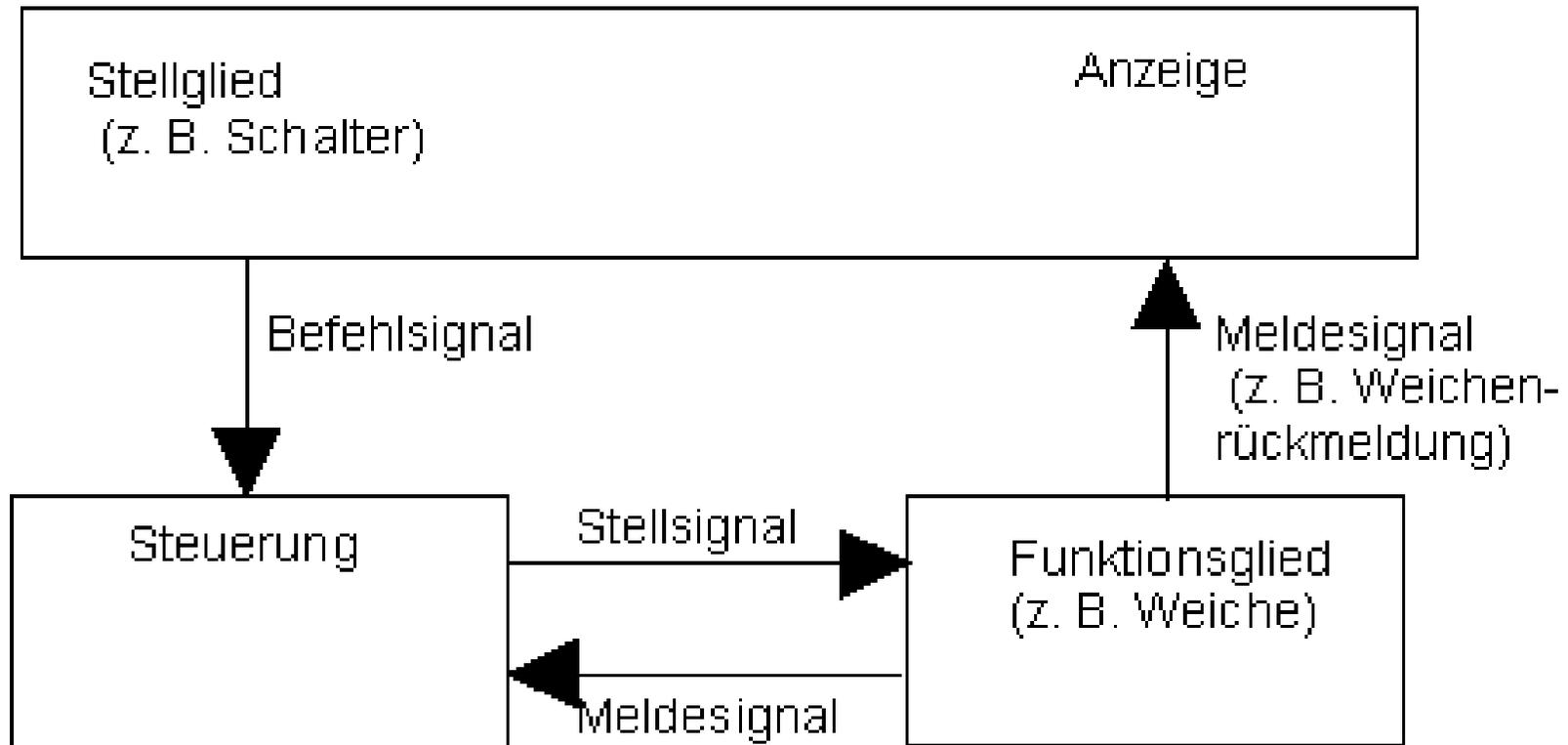


©ROB PAISLEY 2001  
DCC Volts Scope 1a

<http://home.cogeco.ca/~rpaisley4/CircuitIndex.html>



# Digitaler Fahrbetrieb mit Erweiterung zum digitalen Fahr- und Steuerbetrieb (1)



## Digitaler Fahrbetrieb mit Erweiterung zum digitalen Fahr- und Steuerbetrieb (2)

- Integration der Steuerelemente einer Modelleisenbahn in ein DCC-System
- Konkret werden über das Gleissignal digitale Funktionen (Ausgänge) der Modellbahnanlage gesteuert.
  - Weichen
  - Signale
  - Laternen
  - Entkuppler sind nur einige Beispiele.
- Die Ansteuerung der Zubehördecoder über das Gleissignal und demzufolge ein verringerter Verdrahtungsaufwand.
- Natürlich muss hierbei erwähnt werden, dass die Energie der digitalen Aktoren aus dem digitalen Gleissignal gewonnen wird.
- Dies erfordert einen erhöhten Aufwand bei der Signalerzeugung des DCC-Signals oder es müssen unbedingt eigene Laststromversorgungskonzepte implementiert werden.



## Die Funktionalität sei am Beispiel einer Weiche zu erläutern

- Schalter im Stellpult geben das Befehlssignal die Steuerung, die es in ein Stellsignal umwandelt (z. B. durch Stromverstärkung).
- Dieses Stellsignal bewirkt im Funktionsglied Weiche das Umlaufen in die andere Position.
- Dieser Vorgang wird von der Steuerung überwacht, indem sie Meldesignale in Form der Weichenrückmeldung vom Funktionsglied Weiche einliest.
- Dieselben Meldesignale werden in der Anzeige (Stellpult) verwendet.



Zu einer Steuerung gehören damit folgende Komponenten:

- **Stellglieder**
  - Die Stellglieder geben Befehle an die Steuerung. Dies können Schalter, Taster, Reed-Kontakte etc. sein.
- **Funktionsglieder**
  - Die Steuerung wirkt auf die Funktionsglieder und steuert sie. Bei einer Modellbahn fallen z. B. Weichenantriebe, Lokomotiven oder Lämpchen darunter.
- **Steuerglieder**
  - Hierzu zählen Verstärker (z. B. Booster), Zeitgeber, Speicher, Prozessoren etc.



## Von Bussen und Netzen

- Die meisten Digitalssysteme bestehen aus verschiedenen Komponenten: Zentralen (Command Station), Booster, stationäre und mobile Regler, sowie Decoder, Stellpulte und Interfaces, die allesamt irgendwie zu verbinden sind.
- Probleme: Positionserfassung und „Transponding“ (Zugverfolgung)
- Neue Verbindungsarchitekturen sind notwendig
- Dazu bieten die unterschiedlichen Digitalssysteme Möglichkeiten an, die meist aus der Computer- bzw. Netzwerktechnik stammen.
- Offensichtlich bietet die Topologie „Netz“ die größte Flexibilität bei der Verkabelung und bei der Ergänzung bestehender Installationen. Warum? Nun, es können an beliebigen Stellen Verzweigungen eingebaut werden. Der Vorteil eines Netzes ist es auch beim Ausfall einzelner Verbindungen noch funktionsfähig sein zu können. Jedoch ist nicht nur die Topologie allein, sondern auch das darauf laufende Protokoll und natürlich die Eigenschaften der Knoten relevant.



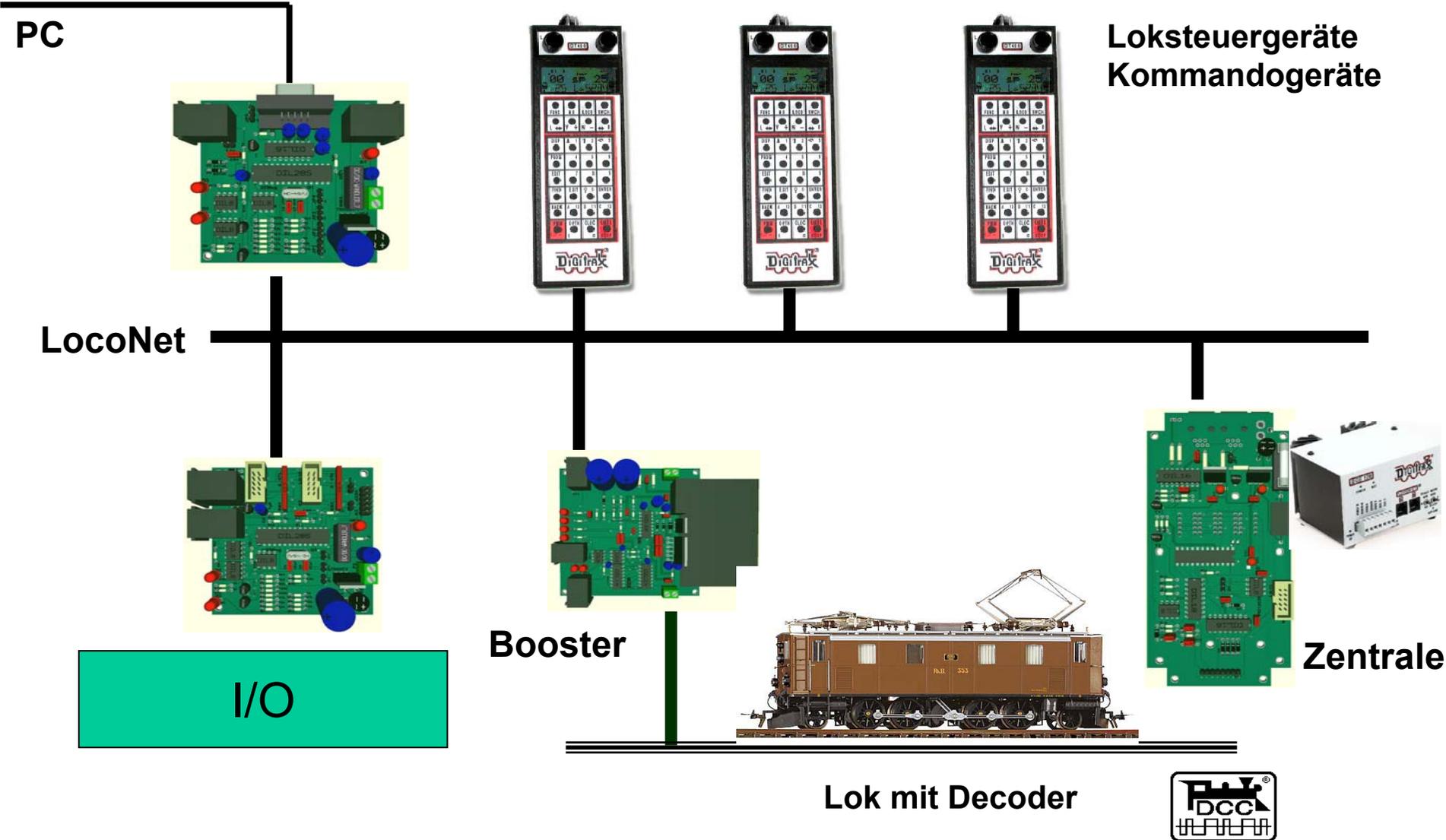
## LocoNet als offenes System zur Entwicklung angepasster und multivalent erweiterbarer Komponenten „Digital fahren und Digital schalten“

- LocoNet ist ein Peer-to-Peer Netzwerk, welches auf Technologien der Netzwerktechnik aufsetzt, d. h. es ist ein Netzwerk ohne zentralen Server oder Sender.
- Das Management wird von den an der Kommunikation beteiligten Komponenten vorgenommen.
- LocoNet arbeitet nach dem CSMA/CD bzw. CSMA/CA Zugriffsverfahren.
- Eine typische Implementierung mit LocoNet erlaubt es ungefähr 98% von der Netzverkehrskapazität zu nutzen und die Zusammenstöße der Daten unter weniger als 1% zu reduzieren.
- Die nicht vorhandene zentrale Netzwerk-Komponente darf nicht mit der Zentraleinheit des Digitalsystems verwechselt werden, welche für die Signalerzeugung am Gleis zuständig ist.
- Es gibt eine Begrenzung auf 127 Teilnehmer, was aber selbst auch für größte Anlagen ausreichende sein dürfte.

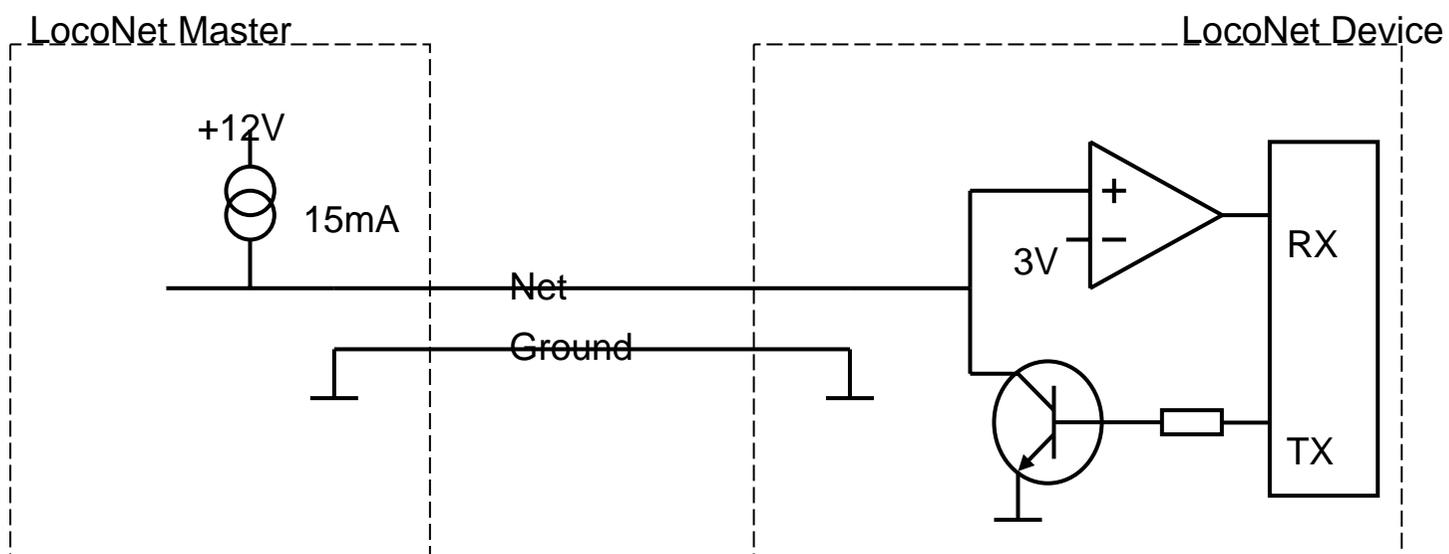
LocoNet® ist ein Warenzeichen der Digitrax® Inc Norcross USA



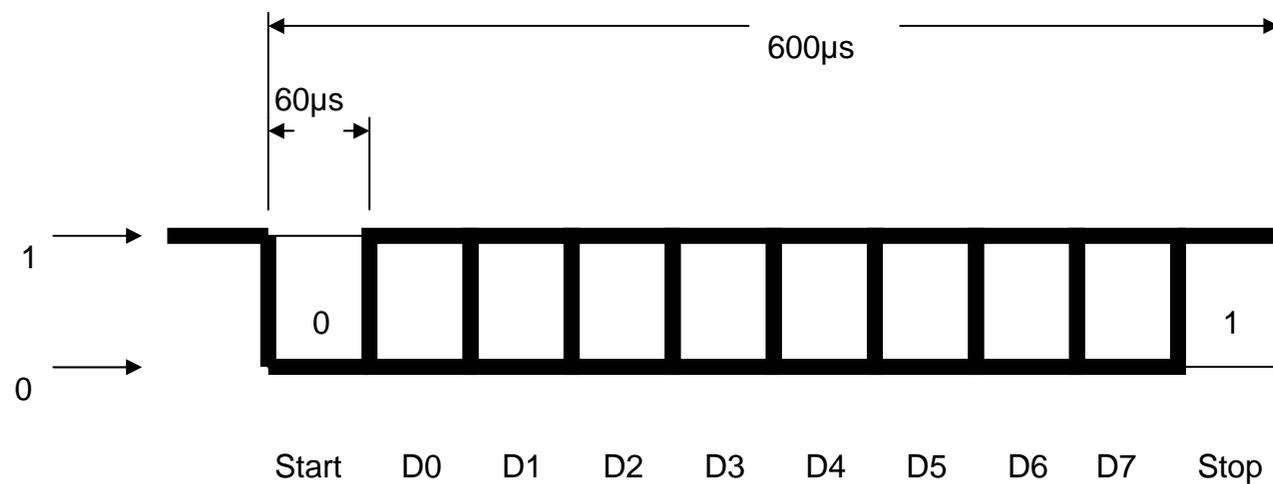
# Aufbau eines Netzwerkes zur Modellbahnsteuerung



# Datenübertragung - Hardware



## Datenübertragung - Zeitablauf



- 16666 Baud, 60µs Bit-Zeit
- 8N1

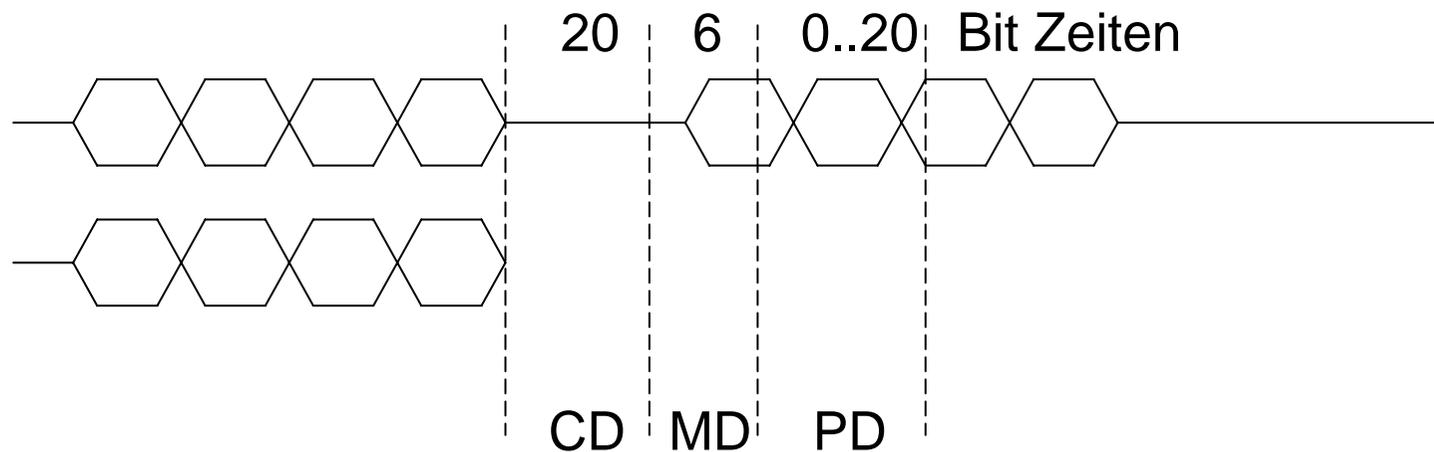


## Datenübertragung - Datentelegramme



- Preamble mindestens 10 x „1“
  - „0“ als Trenner zwischen den Datenpaketen
- 1. Byte -> Opcode (Was)
  - „0“ als Trenner zwischen den Datenpaketen
- n. Byte -> Data (Wie, Wer)
  - „0“ als Trenner zwischen den Datenpaketen
- n+1. Byte -> Check (EXOR über alle Bytes für Fehlererkennung)
  - „1“ als Datenpaketende

# Datenübertragung – Zeitablauf – Pakettiming - Netzzugang



CD: carrier detect (bestimmt Ende des Paketes)(1.2ms)

MD: master delay (Master hat Sendevorrang)(360us)

PD: priority delay (hohe Priorität = kleine PD)(0-1.2ms)



## Datenübertragung – Zeitablauf – Pakettiming - Kollisionen

- Eine Kollision wird erkannt wenn eine „0“ auf dem Netz gesehen wird obwohl eine „1“ gesendet wird.
- Bei einer Kollisionserkennung wird ein „Break“ gesendet (15 Bitzeiten einer „0“ -> 900µs)



## Datenübertragung – Slot und Funktionen eines Slots

- In der Zentrale gibt es eine Tabelle mit allen Lok-Daten
- Slot # = Index in Tabelle = Handle
- Slot # ist eine 7 Bit Zahl
- Damit sind 128 Slots möglich:
  - Slot # 1..120 sind Lok-Slots
  - Slot # 0 ist ein Dispatch-Slot (Übergabe-Slot)
  - Slots # >120 sind Spezial-Slots (Fast clock, Programmierung)



## Datenübertragung – Datenfelder eines Slots

- Lok-Slots haben folgende Felder:
  - Lokadresse (14 Bit)
  - Slotstatus (free/common/idle/IN\_USE)
  - Protokollauswahl (# der Geschwindigkeitsstufen, ...)
  - Lokstatus
    - Geschwindigkeit (7 Bit)
    - Funktionen (9 bits, F0, F1, ..., F8)



## OP-Codes an einem Slot (requests)

- requests to master:
  - OPC\_LOCO\_ADR: get slot by (loco) address
  - OPC\_RQ\_SL\_DATA: get slot by slot #
  - OPC\_WR\_SL\_DATA: write slot by slot #
  - OPC\_MOVE\_SLOTS: move slot from # to #
    - dispatch put (destination=0)
    - dispatch get (source=0)
    - NULL move (source=destination!=0)
  - OPC\_SLOT\_STAT1: modify slot status

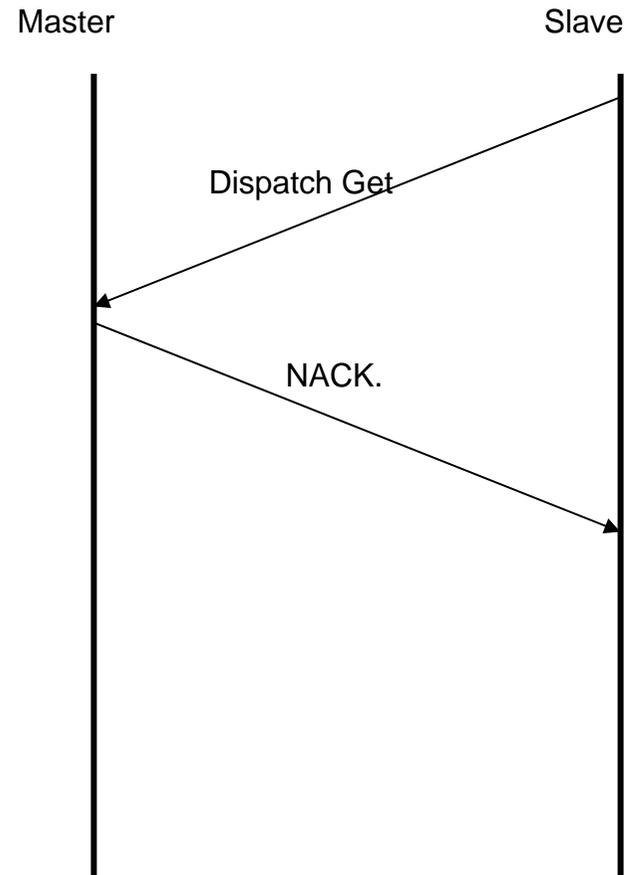
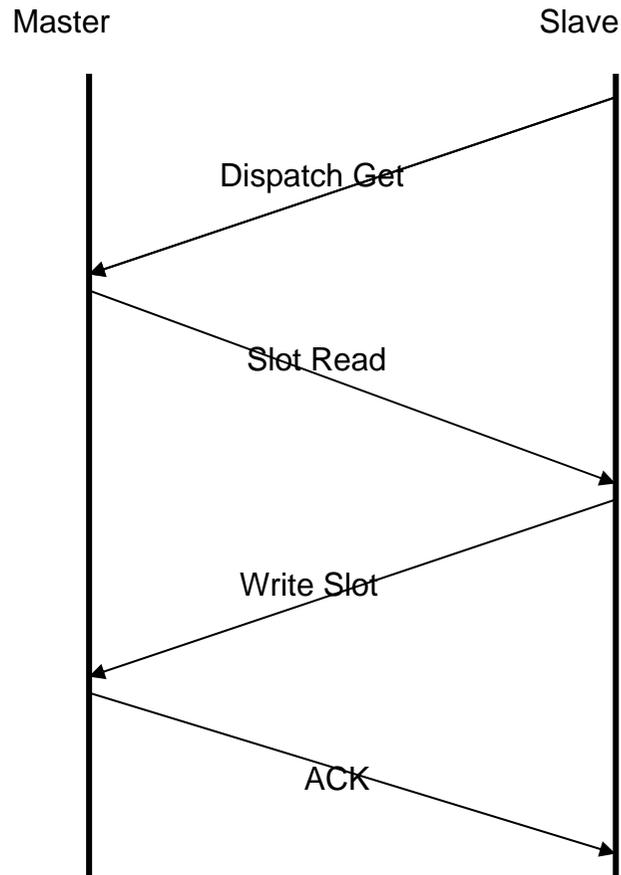


## OP-Codes an einem Slot (responses, operation)

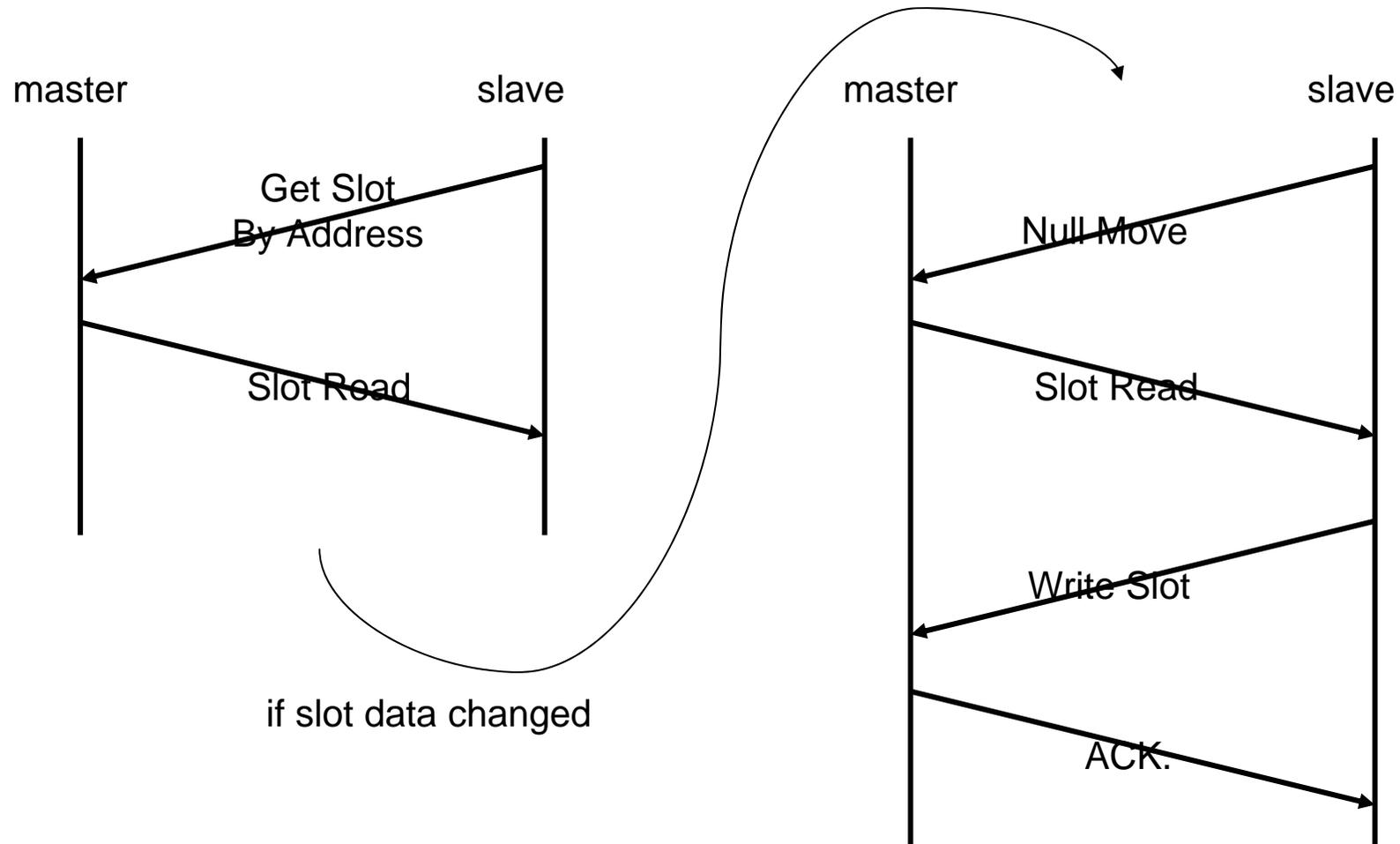
- responses from master:
  - OPC\_LONG\_ACK: simple acknowledge
  - OPC\_SL\_RD\_DATA: slot data
- realtime operation
  - OPC\_LOCO\_SPD: 7 bits of speed
  - OPC\_LOCO\_DIRF: direction and F0, ..., F4
  - OPC\_LOCO\_SND: F5, ..., F8



# Datenübertragung – Master - Slave



# Datenübertragung – Master – Slave - FRED: Protokollbeispiel (reconnect)



## Modularität als Designvorteil für erweiterbare Digitalsteuerungssysteme (1)

- Für Modellbahnsteuerungen auf der Basis von LocoNet gibt es von kommerziellen Anbietern eine Vielzahl von Komponenten, die man auswählen und einsetzen kann.
- Allerdings gibt es häufig die Fälle, dass z. B.:
  - die Signalpegel nicht passen
  - die Anzahl der Eingänge und Ausgänge stark von den Erfordernissen abweicht
  - die Kommunikation zu einem PC-System angepasst werden muss
  - einfache Handsteuergeräte nicht vorhanden sind
- Für solche Fälle zeigt es sich wie weitsichtig die Entwicklung eines offenen Kommunikationssystems ist mit zudem offengelegtem Protokoll und offengelegter Physik

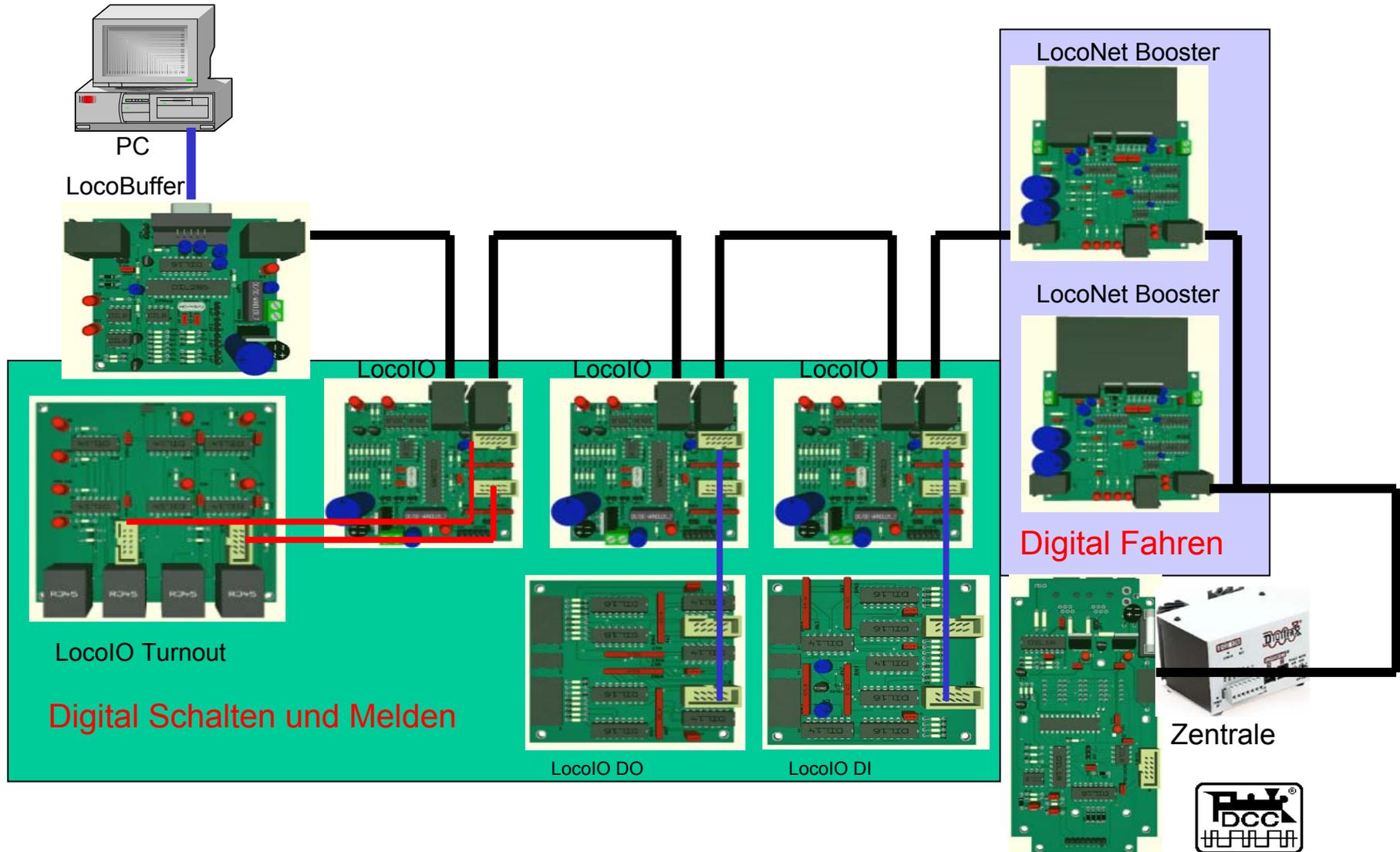


## PC-basierte Steuerungen sind heute „State of the Art“

- Entscheidend ist die Auslagerung der Regeln und logischen Zusammenhänge weg von starrer Verdrahtung hin zu flexibler Verwaltung und Prüfung sowie dynamischen Ablauf, alles Dinge, die ein PC eben sehr gut lösen kann.
  - Jeder Magnetartikel (Funktionsglied) wird über eine Nummer, die Adresse, angesprochen
  - der Verdrahtungsaufwand sinkt
  - eine "Zentrale" verwaltet Lokomotivparameter und Weichen
- Eine wichtige Voraussetzung für regelbasierte Steuerungen ist der Einsatz von (rück)meldenden Funktionsgliedern, damit die Steuerung in Abhängigkeit vom aktuellen Anlagenzustand Entscheidungen treffen kann.
- Während man häufig aus Aufwandsgründen auf eine Rückmeldung bei Weichen und Signalen verzichtet, ist eine gewisse Zahl an Gleisbesetzmelder in der Regel unverzichtbar.
- Da alle Schaltbefehle in der Zentrale zusammenlaufen, gibt es jetzt hier eine Stelle an der alle Informationen über den Zustand der Anlage zusammenlaufen. Somit ist es möglich, beliebige Verknüpfungen untereinander zu realisieren.

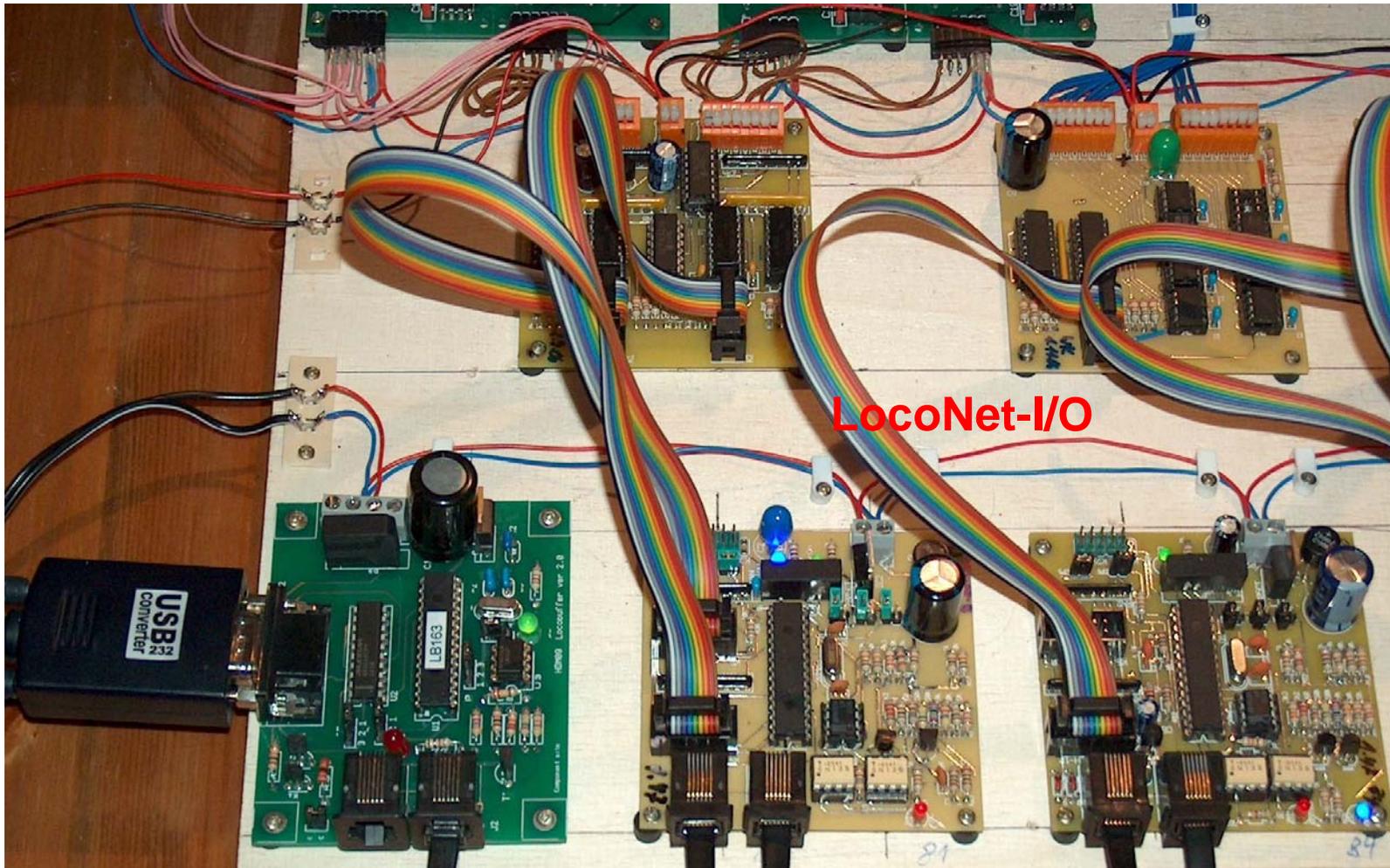


# Loconet als Multi-Computer-Netzwerk Modellbahnsteuerungen – schematische Übersicht (Design)



# Loconet als Multi-Computer-Netzwerk

## Modellbahnsteuerungen – praktische Umsetzung

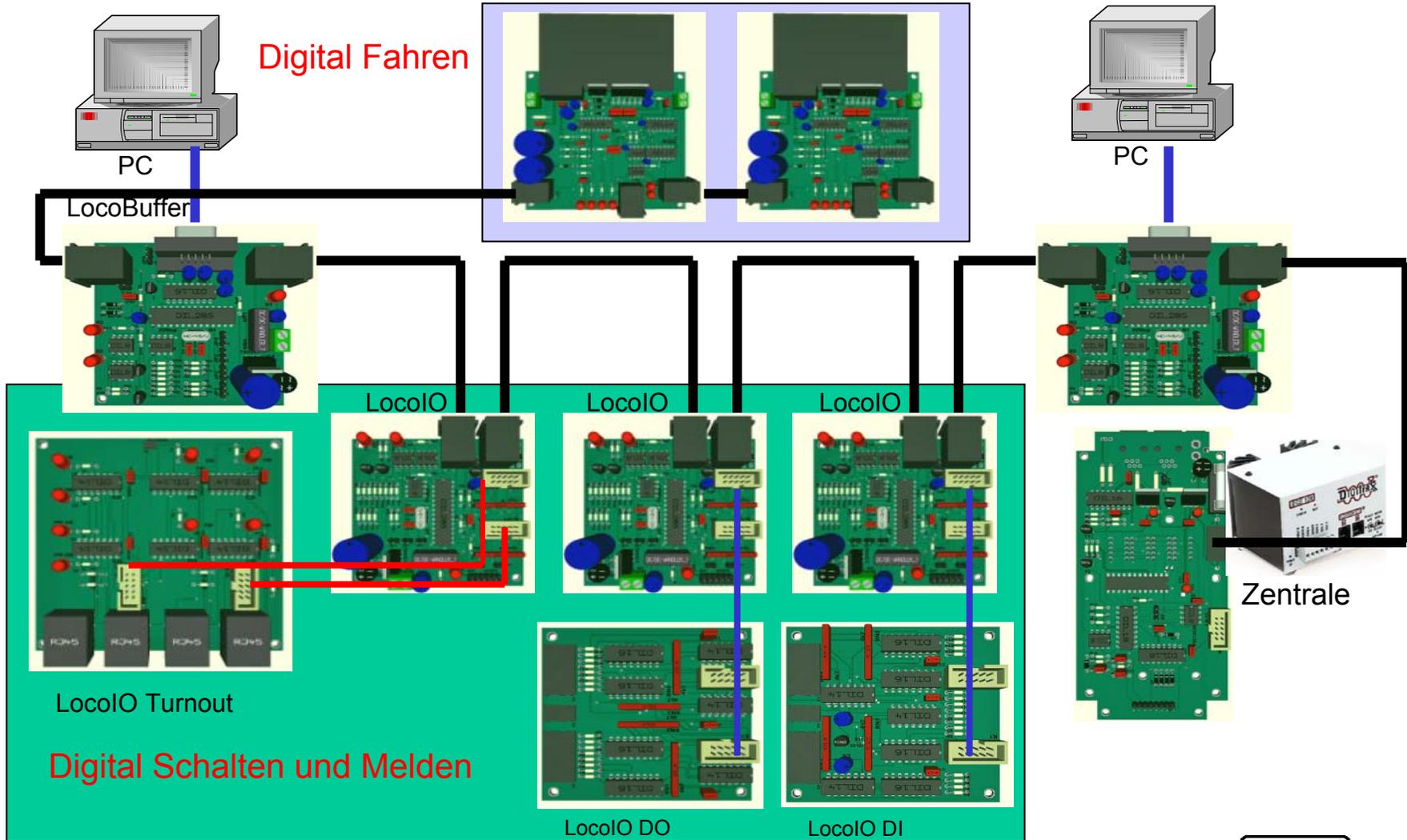


LocoNet-to-PC

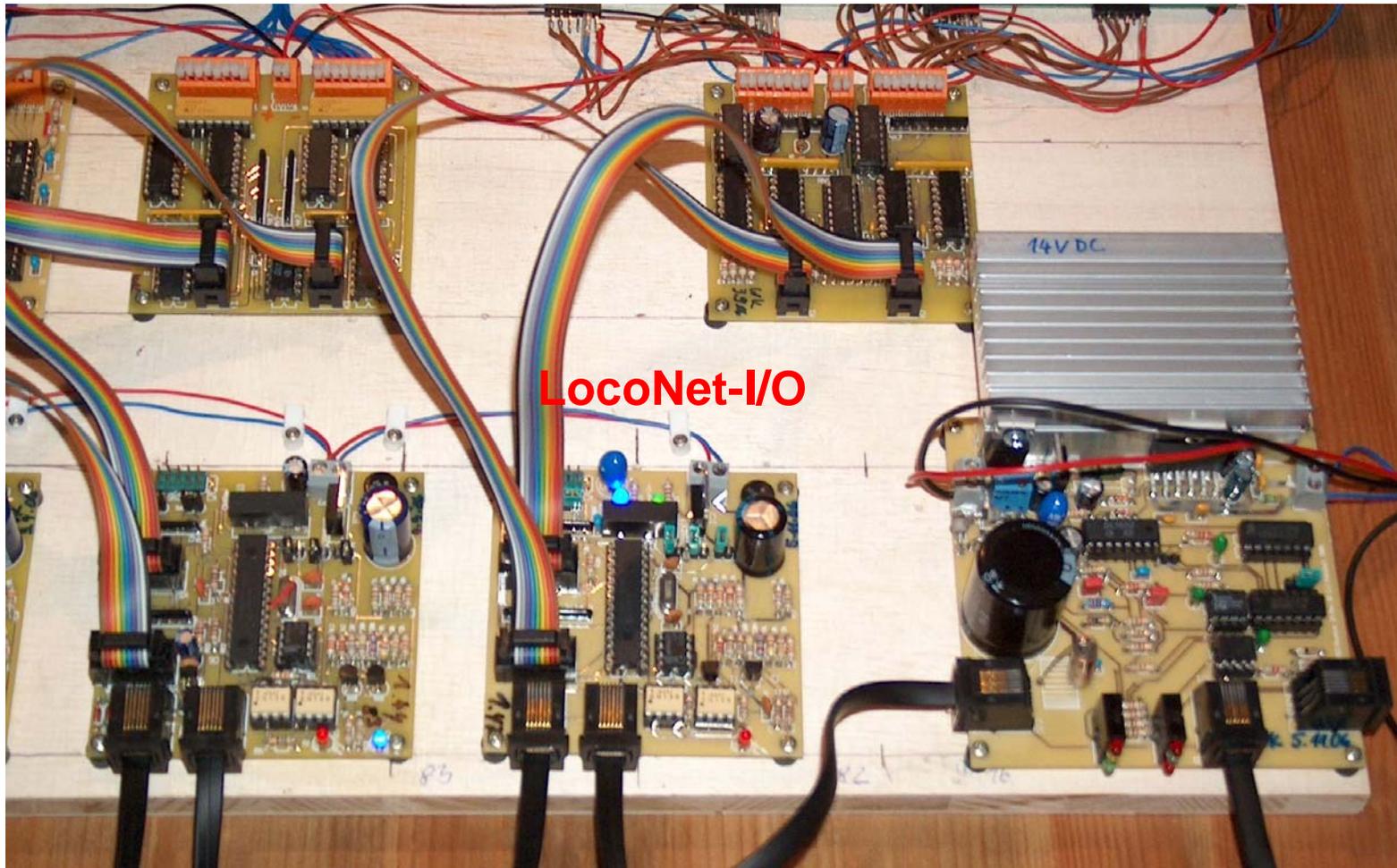
LocoNet-I/O-Basismodule



# LocoNet als Multi-Computer-Netzwerk Modellbahnsteuerungen – mehrere PC steuern das System (Design)



# LocoNet als Multi-Computer-Netzwerk Modellbahnsteuerungen – mehrere PC steuern das System (Design)



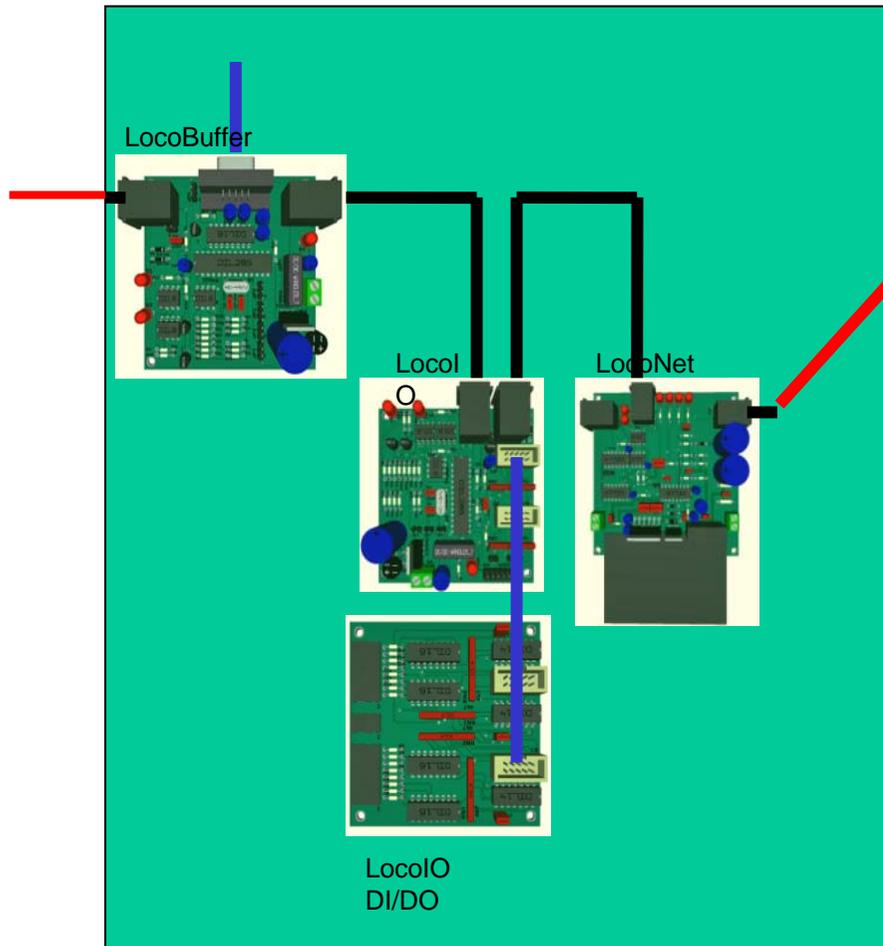
LocoNet-I/O-Basismodule

Booster

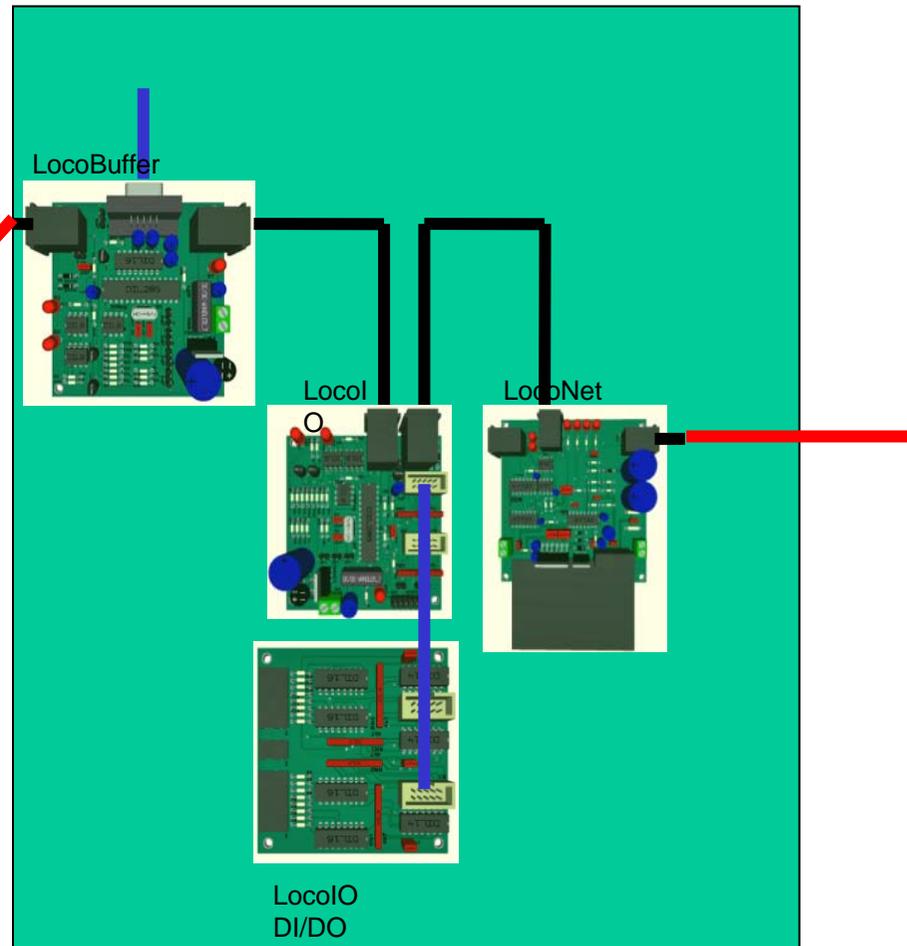


# LocoNet in modularen Anlagen (Design)

## Modul 1



## Modul 2

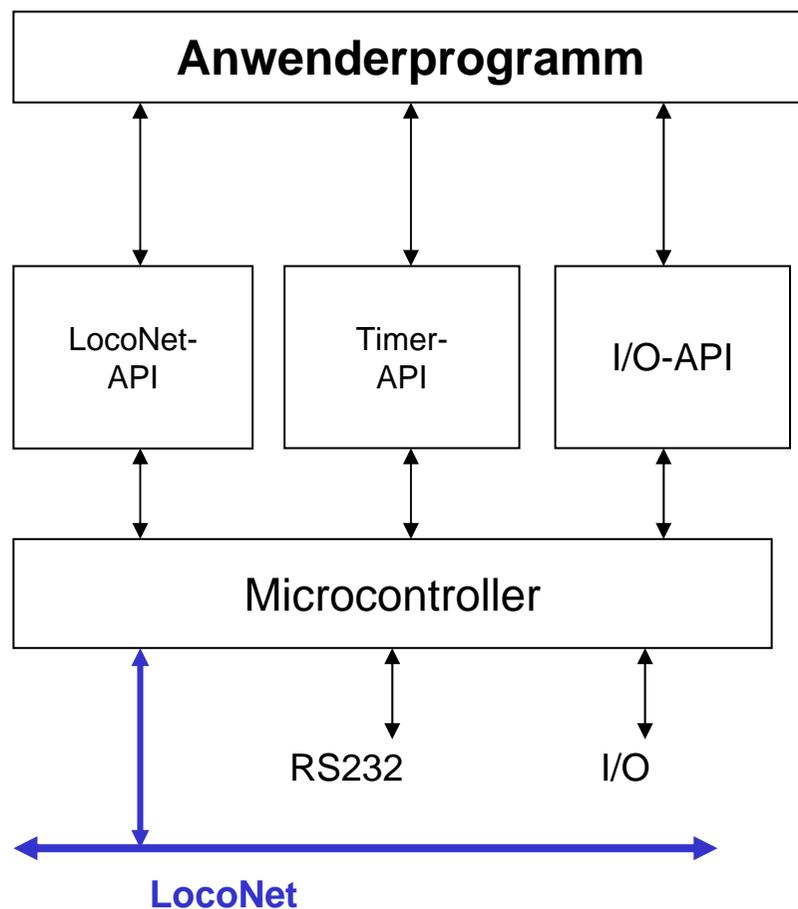


Der Aufbau und die Funktionen der Embedded Systems-Komponenten zur Umsetzung einer Digitalsteuerung nach dem Schema „Digital Schalten und Melden und Digital Fahren“

- Der typische Funktionsumfang einer LocoNet-Komponente orientiert sich am Einsatzumfeld und am Grad der Integration in ein Multikomponentensystem ggf. mit PC-Anbindung. Dabei kommt dem Einsatz von Mikrocontrollern (Microchip PIC, Zilog Z8, ATMEL ATMEGA) eine große Bedeutung zu.
- Die Basisfunktionen beziehen sich auf:
  - LocoNet-Interface
  - I/O-Interface
  - Optional ergänzt werden die Basisfunktionen durch:
    - RS232-Anbindung oder USB
    - Zeitgeberfunktionen

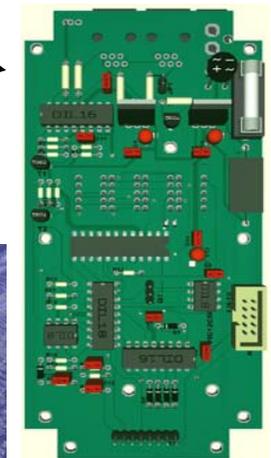


## Aufbau einer LocoNet-Komponente: I/O-Modul, Booster



# Multikomponenten und erweiterbare Komponenten

- Im Zuge der Schaffung von modular strukturierten Plattformen wird ein neuer Weg beschritten.
- Dabei werden Funktionsmodule geschaffen, welche in Basismodule und Optionsmodule unterschieden werden.
- Die Basismodule sind bei den Platinen immer bestückt und sie sind auch immer in der Firmware vorhanden.
- Optionsmodule hingegen sind auf der Platine vorbereitet, aber sie müssen nicht immer bestückt werden und sie können modular in die Firmware integriert werden.
  - Zentrale
  - Throttle
- Basis
  - 1 - 2 x LocoNet Steckverbinder
  - 1 x RS232 Interface mit DB9-Steckverbinder
  - diverse LED
- Option (nicht bestückt oder nachträglich bestückt)
  - 1 x 4bit Write only LCD Display oder LED-7-Segment-Display
  - 1 x 4x4 Keypad (Tastatur)
- Steuerelemente:
  - 2 x Encoder (rotatorisch)
  - 2 x Umschalter
- Energieversorgung:
  - extern
  - LocoNet RailSync
- 1 x Summer



# Software

- Bei der Struktur der Software kann der Entwickler zwei Wege gehen.
  - Nutzung der Technologie einer „Geradeausprogrammierung mit Interruptunterstützung“
  - Nutzung eines einfachen Echtzeitkernels zur optimalen Strukturierung und Umsetzung der Funktionalitäten
- Die Entscheidung wird dabei hauptsächlich vom Umfang an Aufgaben bestimmt.
- Die größte Reglementierung ist bei Speicher zu sehen. Vor der Erstellung einer Applikation ist die Struktur zu bestimmen.
- Eine Portierung einer bisher laufenden und als „Geradeausprogramm“ erstellten Firmware auf der Basis eines Echtzeitkernels befindet sich in der Umsetzung. Diese ist für das Jahr 2007 vorgesehen.



## LocoNet-Komponente in Assembler (PIC 16F873)

```
; *****  
; Main  
; *****  
;          BTFSF    PORTA,RX      ; SPACE/LOW on RXD?  
;          GOTO     Main2         ; yes, go see  
;          CALL     CD_Backoff    ; keep track of cd backoff  
;          CALL     Housekeep_Ln_Out ; keep track of output buffer  
;          BTFSF    PORTA,RX      ; SPACE/LOW on RXD?  
;          GOTO     Main2         ; yes, go see  
;          BSF     LN_Flags,ACTIVE ; flag connected  
;          CALL     CD_Backoff    ; keep track of cd backoff  
;          CALL     Check_All_Inputs  
;          BTFSF    PORTA,RX      ; SPACE/LOW on RXD?  
;          GOTO     Main2         ; yes, go see  
;          CALL     CD_Backoff    ; keep track of cd backoff  
;          CALL     Transmit_Packet  
;          BCF     PORTA,LED      ; activity LED off  
;          BSF     LN_Flags,ACTIVE ; flag connected  
Main1     CALL     Disconnect     ; keep track of connect state  
;          BTFSF    PORTA,RX      ; SPACE/LOW on RXD?  
;          GOTO     Main2         ; yes, go see  
;          BSF     LN_Flags,ACTIVE ; flag connected  
;          CALL     CD_Backoff    ; keep track of cd backoff  
;          CALL     Housekeep_Ln_In ; keep track of input buffer  
;          BTFSF    PORTA,RX      ; SPACE/LOW on RXD?  
;          GOTO     Main2         ; yes, go see  
;          CALL     CD_Backoff    ; keep track of cd backoff  
;          CALL     Decode_Packet  
;          BTFSF    PORTA,RX      ; SPACE/LOW on RXD?  
;          GOTO     Main2         ; yes, go see  
;          BSF     PCLATH,3       ; select page 1  
;          CALL     Blink         ; keep track of blink state  
;          BCF     PCLATH,3       ; select page 0  
;          GOTO     Main  
; Main2  
Main2     BCF     INTCON,GIE      ; disable global interrupt  
;          CALL     Receive       ; get a byte from LocoNet  
;          BSF     INTCON,GIE     ; enable global interrupt  
;          CALL     wait_90       ; sync on next startbit (if any)  
;          GOTO     Main1
```



## LocoNet-Komponente in C

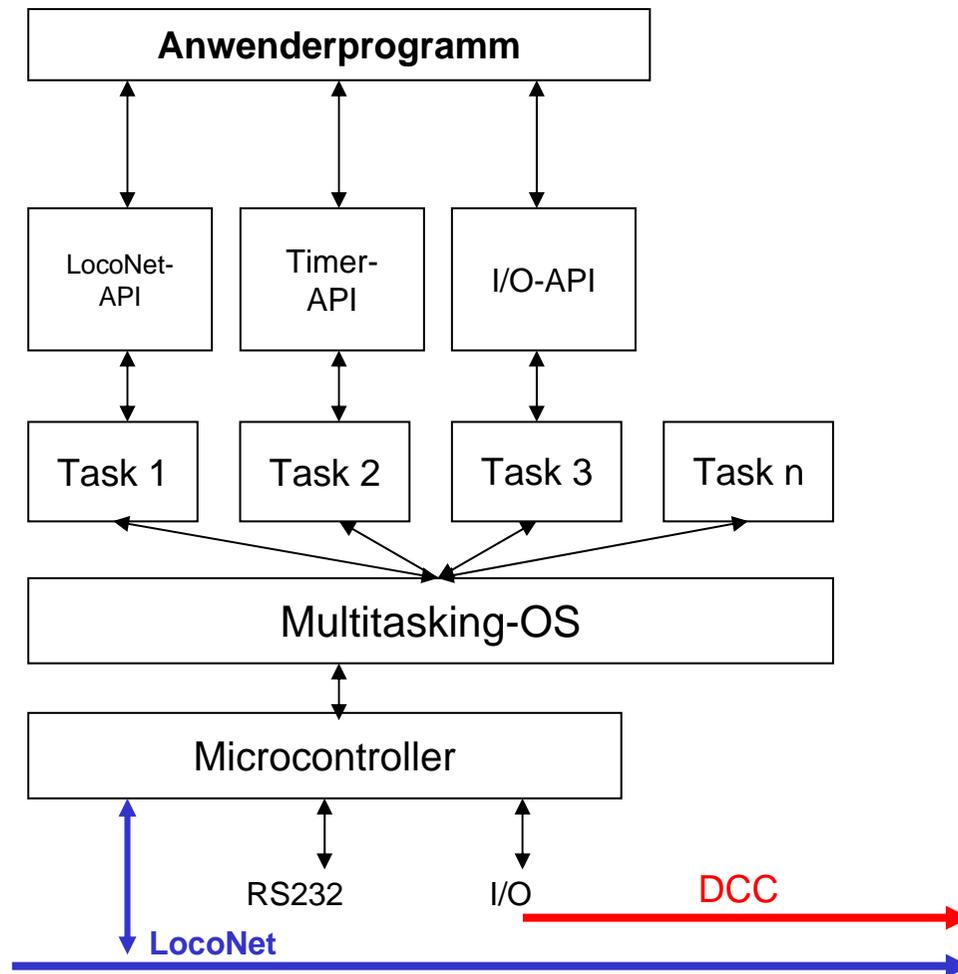
```
int main(void)
{
    init_main();           // alle io's
    init_dccout();        // Zeitsteuerung für DCC
    init_organizer();     // Maschine zur Kommandowiederholung
                        // slots und Lokspeicher
    init_interrupt();
    init_tick();          // 5ms Timertick

    set_device_state(RUN_OFF); // abgeschaltet

    while(1)
    {
        run_state();      // Test der Tasten, Kurzschluss am DCC etc.
        run_organizer();  // Start des Kommandoorganizers
    }
}
```



# Nutzung eines Echtzeitkerns für eine LocoNet-Komponente mit vielfältigen Funktionen: I/O, Booster, Anzeige- und Eingabeterminal, Zentrale



## Zusammenfassung

- Um die eingehende Frage abschließend zu beantworten: Wie viele Mikrocontroller werden denn nun benötigt? Nun, minimal 3 (Steuergerät, Zentrale mit Interface, Lokdecoder), maximal sind keine Grenzen gesetzt.
- Die Zukunft wird hier noch viele Überraschungen bringen. Neben LocoNet sind auch Arbeiten im Gange Gateways über TCP/IP zu realisieren.



## Zusammenfassung

- Damit steht einer global vernetzten Multicomputersteuerung nichts mehr im Wege.
- Auch wenn hier die Frage erlaubt sein sollte: Wer braucht dies?
- Nun, diese Fragen haben wir uns in der Vergangenheit schon vielfach gestellt und wir wurden immer eines Besseren belehrt.....



Zusammenfassung

**Digital is cool!**  
**DIY Digital is outstanding!**

